Stratégies alimentaires

Truies & vaches laitières

Charlotte Gaillard

Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches - 2022

Stratégies alimentaires

Truies & vaches laitières

Mémoire présenté en vue de l'obtention de

l'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)

Université de Rennes 1
Spécialité : Sciences Agronomiques
Ecole doctorale : EGAAL

par

Charlotte GAILLARD

UMR PEGASE, Unité Mixte de Recherches Physiologie,
Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Elevage

INRAE - AGROCAMPUS-Ouest

Année 2022

Avant-propos

Ce document a été rédigé en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des travaux de Recherche (HDR). Il a donc pour objectif de montrer mon aptitude à diriger et encadrer des travaux de recherche.

Afin d'en faciliter la lecture et la compréhension, les références bibliographiques listées dans mes articles, publiés et référencés par des nombres entre crochets (Annexe 2), n'ont pas été insérées dans le texte.

Soutenance présentée publiquement le vendredi 29 avril 2022 devant le jury composé de :

Marie-Pierre ELLIES-OURY / Rapportrice
Maître de Conférences – Chercheure à Bordeaux Sciences Agro

Giuseppe BEE / Rapporteur
Chef de l'unité de recherche porcine à AGROSCOPE, Suisse

Philippe SCHMIDELY / Rapporteur
Professeur à l'Université de Paris-Saclay

Catherine BLOIS-HEULIN / Examinatrice
Professeur, Maitre de conférence à l 'Université de Rennes 1

Luc MOUNIER / Examinateur
Professeur à Vet Agro Sup

Mes remerciements vont …

Aux chercheurs qui m'ont encadrée et guidée à travers ce parcours scientifique. Je remercie particulièrement mes encadrants de thèse danois et français, Jakob Sehested, Mogens Vestergaard, Martin Riis Weisbjerg, et Nicolas Friggens. Cette période de thèse a été tellement stimulante, riche et positive !

A mes collègues de l'équipe SysPorc qui m'ont accueillie avec bienveillance et aidée à comprendre ma problématique de recherche sur une nouvelle espèce ainsi que le fonctionnement de l'INRAE. Un merci particulier à Jean-Yves Dourmad, Ludovic Brossard et Florence Garcia-Launay.

Aux techniciens et animaliers qui m'ont accompagnée lors des expérimentations à Foulum au Danemark et à l'INRAE : Torkild Nyholm Jakobsen, Carole Guérin, Ophélie Dhumez, Josselin Delamarre, Yannick Surel et Daniel Boutin. Il n'y aurait pas eu toutes ces données, tous ces résultats et articles sans vous. Merci pour votre motivation et votre bonne humeur.

A ma doctorante actuelle, Maëva Durand, et aux étudiantes encadrées lors de stages et/ou CDD : Hélène Barbu, Laura Derouet, Aline Julienne, Clémence Orsini, Justine Abarnou, Valeriia Khintsytska et Ellynn Nizzi. Vos questionnements, votre intérêt et votre énergie sont porteurs.

A mes ami(e)s, et plus particulièrement Mai Anh Ton Nu et Larissa Zetouni, également chercheuses et docteures en sciences animales au Danemark et aux Pays-Bas respectivement, toujours présentes malgré la distance. A mes ami(e)s de la danse pour ces moments d'évasion partagés.

A mes frères et parents, toujours à mes côtés et intéressés par mes recherches. Un grand merci à ma maman, première (re)lectrice de ce mémoire d'HDR.

Liste des abréviations

AA : acides aminés
AMU : automatic milking unit (système de traite automatique)
AOS : Animal Open Space (Journal)
ASAS-NANP : American Society of Animal Science - Nation Animal Nutrition Program
AU : Aarhus University
BHBA : Bétahydroxybutyrate
CASDAR : Compte d'affection Spécial au Développement Agricole et Rural
CDPQ : Centre de Développement du Porc du Québec
CP : Crude Protein (protéines brutes)
CR : Chargées de Recherches
DAC : Distributeur Automatique de Concentrés
DDGS : Drêches de Distillerie Séchées avec Solubles
EAAP : European Federation for Animal Science
EB : bilan énergétique
ECM : Energy Corrected Milk (rendement de lait corrigé pour l'énergie)
FAN : facteurs anti-nutritionnels
GARUNS : Growth, Ageing, balance of body Reserves, nutrient supply to the Unborn, Newborn and Suckling calf (modèle, vaches laitières)
gDDGS : DDGS à base de céréales autre que le maïs
IC : indice de consommation
IDELE : Institut de l'Elevage
IEPL : Installation Expérimentale de Production Laitière de PEGASE
IFIP : Institut technique de recherche et de développement de la filière porcine
IGF-1 : insulin-like growth factor-1 (facteur de croissance analogue à l'insuline-1)
IRISA : Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires
INRIA : Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique
JRP : Journées de la Recherche Porcine

LS : teneur en lactose dans le sang ou lactosémie
MAT : Matière Azotée Totale
MS : Matière Sèche
NEFA : Non-Esterified Fatty Acid (acides gras non-estérifiés)
OAD : Outil d'Aide à la Décision
PDI : Protéines Digestibles dans l'Intestin
PHASE : Physiologie Animale et Systèmes d'Elevage
PI : Index de déséquilibre Physiologique
PMR : Partially Mixed Ration (ration partielle distribuée à l'auge)
TL : teneur en lactose dans le lait
UBC: University of British Columbia, Canada
UE3P : Unité Expérimentale INRAE de Physiologie et Phénotypage des Porcs
UFL : Unité Fourragère Lait
UMR : Unité Mixte de Recherches
UMR MoSAR : UMR « Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants »
UMR PEGASE : UMR « Physiologie, Environnement, et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Elevage
UMT RIEL : Unité Mixte Technologique « Recherche et Ingénierie en Elevage Laitier »

Table des matières

INTRODUCTION 15

PARTIE 1 – PARCOURS ET AXES DE RECHERCHES 17

1.1. Parcours…... 17
1.1.1. Un parcours international, pluridisciplinaire et multi-espèces 17
1.1.2. Publications et métrique 19

1.2. Science : axes et projets de recherche 20
1.2.1. Eléments de contexte scientifique 20
1.2.2. Questions et axes de recherche 23
1.2.3. Projets de recherches 25

1.3. Collaborations et encadrement 31
1.3.1. Réseau de collaboration et activités collectives 31
1.3.2. Implication dans l'encadrement et l'enseignement 37

PARTIE 2 - SYNTHESE DE MES RECHERCHES……. 39

2.1. Axe 1 - Intégration de la variabilité individuelle dans les modèles nutritionnels…….. 39
2.1.1. Informations initiales collectées lors de synthèses bibliographiques 40
2.1.2. Développement de modèles nutritionnels pour les truies 49
2.1.3. Développement d'un modèle pour les vaches laitières 55
2.1.4. Constitution de bases de données et étude de la variabilité individuelle……. 57

2.2. Axe 2 - Simulations des effets de l'alimentation de précision sur la productivité et les rejets environnementaux 60
2.2.1.Simulations des effets de stratégies d'alimentation pour les truies……. 60
2.2.2. Simulations de scénarios de vie chez les vaches laitières 63

2.3. Axe 3 - L'alimentation sur mesure mise en place expérimentalement 67
2.3.1. Résultats d'expérimentations pour les truies 67
2.3.2. Résultats d'expérimentations pour les vaches laitières.....73

2.4. Axe 4 - Amélioration des modèles nutritionnels et stratégies d'alimentation……. 79

PARTIE 3 – PERSPECTIVES DE RECHERCHES..... 108

3.1. Poursuite des recherches en alimentation sur mesure pour les vaches laitières…. 108

3.2. Poursuite de l'axe 4 : mesures comportementales et métabolites…….. 113
3.2.1. Intégration de mesures comportementales aux modèles..... 113
3.2.2. Evaluer l'intérêt d'intégrer des métabolites dans les modèles ou OAD ……. 119

3.3. Nouvelles stratégies d'alimentation pour la carrière des truies . 121
3.3.1. Projet SOLIFE : alimentation des truies tout au long de leur vie……. 121
3.3.2. Couplage et automatisation des modèles truies gestantes et truies en lactation……. 124
3.3.3. Ressources alternatives pour les truies 125

CONCLUSION 131
REFERENCES..... 135
ANNEXES 144
- ✓ Articles scientifiques 146
- ✓ Chapitre d'ouvrages, rapport diplômants..... 150
- ✓ Communications lors de congrès..... 150
- ✓ Communications orales invitées 154
- ✓ Autres produits ou documents..... 154

RESUME français …….. 156
RESUME anglais ……..…158

Liste des Figures

Figure 1 - Logos des projets WIN Feed (vaches laitières) et SOWELL (truies gestantes) 29
Figure 2 – Liens entre les axes de recherche et les périodes 39
Figure 3 – Principes de l'alimentation de précision ou alimentation sur mesure [20] 42
Figure 4 – Relation entre les variables de production (poids, ingestion, production laitière) pendant la lactation et le bilan énergétique de l'animal (EB) 44
Figure 5 - Schéma fonctionnel des modèles nutritionnels pour les truies [18][16] 50
Figure 6 – Quatre stratégies d'apprentissage définies selon la répartition des données pour la phase d'apprentissage (learning) et la phase de prédiction (Gauthier, 2021) 53
Figure 7 - Clusters établis en fonction des trajectoires d'alimentation des truies en lactation (Gauthier, 2021) 54
Figure 8 - Représentation schématique du modèle de prédiction de l'efficience 56
des vaches laitières au cours de leur vie (Phuong et al., 2015) 56
Figure 9 - Variabilité des besoins en énergie (MJ ME /j, à gauche) et en lysine digestible (g/kg, à droite) entre les truies gestantes de différents rangs de portée [18] 57
Figure 10 - Evolution des besoins estimés en lysine digestible (en g/kg) pendant la gestation pour deux élevages (A, à gauche, et B, à droite) [21] 58
Figure 11 – Production laitière, ingestion de matière sèche, activité physique et état énergétique journaliers moyennés sur toute la lactation pour chaque vache, en fonction de la parité et du poids individuel moyen sur toute la lactation 59
Figure 12 - Estimation de l'influence de stratégies alimentaires (alimentation sur mesure, à droite vs. alimentation conventionnelle, à gauche) sur la proportion de truies recevant un apport de lysine adéquat (blanc), déficitaire (rose et rouge) ou en excès (bleu) pour une ferme donnée (ici données provenant du Canada) tout au long de la gestation [21] 62

Figure 13 - Pourcentage de truies dont les besoins sont couverts pendant la lactation, avec une alimentation conventionnelle (à gauche) vs. une alimentation sur mesure (à droite)[16]..... 63
Figure 14 - Ajustement du modèle GARUNS aux données de lactation prolongée (16 mois) collectées sur des vaches Holstein: production laitière et ingestion (MY et DMI, kg), poids (BW, kg), composants du lait (lactose - MCL, lipides - MCF, protéines – MCP, kg/kg), et la note d'état corporel - BCS) [9]..... 64
Figure 15 - Prédiction du taux de gestation (%), de l'efficience au cours de la vie des vaches et de la production de lait par jour d'alimentation (rendement total du lait/durée de vie, kg/j) de vaches Holstein effectuant des lactations de durées (mois) différentes au cours de leur vie (NN = lactations de 10 mois pour toute la vie, EL-N = première lactation de 16 mois suivie de lactations de 10 mois, N-EL = première lactation de 10 mois suivie de lactations de 16 mois, EL-EL = lactations de 16 mois pour toute la vie) [9] 65
Figure 16 – Photographie des DAC utilisés en truies gestantes à l'UE3P Saint-Gilles pour mélanger les deux aliments (B et H) en proportions fixes (alimentation conventionnelle) ou variables (alimentation sur mesure) 68
Figure 17 - Répartition horaire a) du nombre de visites alimentaires et non-alimentaires au DAC , b) du nombre de visite en fonction de la stratégie alimentaire, de toutes les truies gestantes du projet PréciTruie [26]..... 70
Figure 18 – Schéma des deux stratégies d'alimentation du projet REPROLAC : la stratégie HD-LD enrichie en énergie en début de lactation et la stratégie LD-LD avec un ratio fourrages :concentrés constant et modéré pendant toute la lactation 74
Figure 19 – Courbes lissées des productions laitières (ECM = « energy corrected milk », en kg) des primipares et multipares nourries avec les stratégies LD-LD et HD-LD, a) au début de la lactation de 0 à 42 jours après vêlage (DIM = days in milk) et b) après les changements de ration des vaches HD-LD (DFS = « days from shift », nouvelle échelle de temps à partir du changement de ration) [5]..... 75

Figure 20 – Résumé graphique de la synthèse sur les effets de l'environnement et du comportement animal sur les besoins nutritionnels des truies gestantes : améliorations futures de l'alimentation de précision [22] 81
Figure 21 – Test de stress auditif - Répartition des activités (dort, explore, mange, observe) selon la journée (base ou test) et la période (PM ou Nuit) - EAAP 2021 87
Figure 22 – Test d'enrichissement - Les différents objets (brosse, cordes et sacs) utilisés pour enrichir le milieu des truies gestantes en semaine test 89
Figure 23 – Photo d'une truie prise avec une caméra thermique 91
Figure 24 - Exemple de détection d'une perturbation sur le profil de fréquence d'abreuvement par jour d'une truie, révélatrice d'un stress thermique (PEN = Pénalité de lissage), d'après Nizzi et al. (2022) 93
Figure 25 – Concentrations de glucose, NEFA et BHBA en fonction de la fin de période de mobilisation (WFS = 0) pour les vaches nourries avec la stratégie HD-LD et LD-LD. L'effet de la stratégie alimentaire (« treatment effect ») est indiqué par des barres noires horizontales quand il est significatif ($P < 0.05$) ... 96
Figure 26 – Exemples de sorties graphiques de la méthode de clustering, avec a) LS + la production laitière, et b) le poids + TL + le glucose. Visuellement, l'objectif est d'avoir des groupes distincts, les plus espacés possibles les uns des autres, ici b) est donc meilleur que a). 100
Figure 27 – Résumé graphique de l'article sur les algues comme source protéique pour les vaches laitières [14] 107
Figure 28 – Schéma d'organisation des actions du projet HARPAGON 111
Figure 29 - Représentation schématique du concept d'alimentation sur mesure pour les vaches laitières du projet HARPAGON. 112
Figure 30 – Représentation des différentes actions planifiées pour le projet SOMOVE 116
Figure 31 – Représentation de l'OAD permettant l'estimation et la distribution de la ration optimale journalière et individuelle tout au long de la vie des truies 125

Figure 32 – Schéma bilan de mes travaux de recherches et perspectives 131

Liste des Tableaux

Tableau 1 – Récapitulatif de la dissémination scientifique de mes recherches 20
Tableau 2 – Résumé des projets réalisés par espèce, rôle et collaborations..... 26
Tableau 3 - Récapitulatif de comparaison des résultats de simulations aux résultats expérimentaux chez les truies gestantes: effets d'une alimentation sur mesure comparé à une alimentation conventionnelle..... 70
Tableau 4 – Liste non-exhaustive d'aliments alternatifs comme sources de protéines pour l'alimentation porcine, lieux de productions et caractéristiques..... 127

Liste des Annexes

ANNEXE 1 – CV 144
ANNEXE 2 – Liste des publications..... 146

INTRODUCTION

Le regard que notre société pose sur les animaux a beaucoup évolué au cours des dernières décennies : en 2015, les animaux sont officiellement reconnus par le Code civil comme « des êtres vivants doués de sensibilité » (article 515-14) ; en 2018, un Code de l'animal rassemble toutes les législations qui concernent les animaux de compagnie, d'élevage ou sauvages, une étape vers la reconnaissance de la personnalité juridique des animaux ; en 2021, est promulguée une loi visant à lutter contre la maltraitance animale et conforter le lien entre les animaux et les hommes. Dans ce contexte, les citoyens-consommateurs d'aujourd'hui, de plus en plus attentifs aux conditions de vie des animaux, questionnent souvent, contestent parfois, l'évolution de l'élevage et de ses pratiques. Quels impacts sur le bien-être animal, la santé humaine et l'environnement ? Les consommateurs n'achètent plus le seul produit animal, au meilleur prix, ils achètent un style de vie, des choix de société. Ce qui donne de la valeur au litre de lait, c'est le soin que les éleveurs portent à leurs animaux et à l'environnement. Ces attentes sociétales sont, bien évidemment, une pression supplémentaire pour les éleveurs, mais elles peuvent aussi être l'opportunité de mettre en place un élevage innovant, plus respectueux des différentes formes du vivant, des attentes du consommateur ainsi que du travail des éleveurs. Pour relever ces enjeux scientifiques, techniques et éthiques, qui croisent sciences animales, sciences de l'environnement et de l'alimentation, sciences humaines et sociales, la recherche en sciences animales a toute sa place, dans un partenariat ouvert et dynamique avec les autres chercheurs des disciplines concernées, mais aussi avec les éleveurs.

Les éleveurs doivent faire face à un système de plus en plus compétitif, avec une augmentation des coûts alimentaires et du nombre d'animaux par élevage, qui entraînent des changements

profonds en termes de gestion du temps, de méthodes d'observation et d'alimentation des animaux. Afin de trouver des solutions, ils modernisent leurs élevages : surveillance automatique des animaux, traite via des robots, mise en place d'une alimentation individualisée selon les besoins des animaux grâce à des distributeurs automatiques, autant de dispositifs utiles sur le terrain issus d'outils de recherche en pleine évolution : imagerie, capteurs, modèles nutritionnels…

Mes travaux de recherche portent sur la mise en place de nouvelles stratégies alimentaires pour les vaches laitières et les truies afin de réduire les coûts alimentaires et les rejets environnementaux**,** tout en prenant en compte le bien-être animal. Ce travail intègre les préoccupations sociétales décrites précédemment ainsi que les attentes de l'éleveur. C'est un sujet porteur, international, multi-espèces, toujours en évolution. Au cours des expérimentations que j'ai menées, j'ai suivi une approche éthique et morale, tournée vers le bien-être animal, basée sur les 3R (raffiner, réduire, remplacer). Plus particulièrement, j'ai fait le choix de limiter les actions dites « invasives » sur l'animal à quelques prises de sang. Je tiens à poursuivre dans cette direction et me tourne donc de plus en plus vers l'utilisation de modèles et simulations.

Ce mémoire, dans lequel je développe mes activités de recherches en sciences animales, est structuré en trois parties : la première présente mon parcours et mes axes de recherches, la deuxième résume les résultats les plus marquants de mes différents projets de recherches terminés ou en cours, enfin, la troisième expose mes projets à venir.

PARTIE 1 - PARCOURS ET AXES DE RECHERCHES

1.1. Parcours

1.1.1. Un parcours international, pluridisciplinaire et multi-espèces

Pour comprendre ce qui a motivé mon intérêt pour la recherche et l'ouverture à l'international, il faut revenir sur mes premières mises en situation, en amont de ma thèse. J'ai découvert la recherche en sciences animales lors de deux stages à l'étranger réalisés pendant mon cursus d'ingénieur agronome à Agrocampus Ouest. Lors de mon premier stage à Foulum (Aarhus University, Danemark), j'ai participé à des études sur le comportement et les capacités d'apprentissage des veaux laitiers et des chevaux. Ce stage m'a passionnée par toutes les questions qu'il induisait, les moyens mis en œuvre pour y répondre, et la complexité de la tâche. Sous le co-encadrement bienveillant d'une doctorante, faire une thèse m'est alors apparu comme une opportunité rare, à ne pas manquer. Mon deuxième stage à la ferme expérimentale de UBC Dairy (Agassiz, Canada) a confirmé mon goût et mes aptitudes pour la recherche. Les conditions, beaucoup plus difficiles que lors du premier stage, m'ont poussée à construire mon propre protocole expérimental pour évaluer les aptitudes d'apprentissage des veaux laitiers, à mener cette expérimentation, à analyser les résultats et enfin à écrire mon premier article publié en 2014 dans PlosOne. Ce stage m'a également permis de comprendre que je ne souhaitais pas me focaliser uniquement sur le comportement ou sur une seule espèce mais que je souhaitais développer une vision plus globale des sciences animales. Le comportement ne pouvait être expliqué sans l'étude de la nutrition ou de la physiologie ou de toute autre matière complémentaire. Je devais donc poursuivre mes

recherches avec une ambition pluridisciplaire et multi-espèces pour être satisfaite.

C'est dans cette optique et avec une forte envie de partir à l'étranger qu'à partir de 2013 j'ai effectué mes trois années de thèse au Danemark sur les vaches laitières suivies de quelques mois de postdoc sur plusieurs espèces. Au cours de ma thèse portant sur l'étude de stratégies alimentaires individualisées pour des vaches laitières en lactations longues, j'ai pu me former dans plusieurs disciplines et commencer à construire un réseau scientifique dans un cadre exceptionnellement porteur et bienveillant. Mes compétences scientifiques et rédactionnelles se sont également révélées. Ce premier pas de chercheuse initialement tourné vers l'alimentation, que l'on nommait alors « individualisée », m'a également permis d'entrer dans le monde de la modélisation et d'initier une collaboration avec l'UMR MoSAR qui est toujours active. Ma période postdoctorale fut chargée en projets sur l'alimentation alternative (drêches, algues, glycérol) pour les vaches laitières, l'étude du stress thermique et la mise en place d'abris pour plusieurs espèces (chevaux, moutons, vaches, cochons) ainsi que la recherche d'indicateurs du métabolisme pour les vaches laitières. Ces projets variés m'ont stimulée et m'ont permis d'avoir une vision plus globale des problématiques de l'élevage.

Grâce à ce parcours international, pluridisciplaire et multi-espèces marqué par de nombreuses publications j'ai été recrutée sur concours comme chargée de recherches (**CR**) à l'INRAE Saint-Gilles en 2017 sur la thématique de recherche suivante : « Efficience alimentaire et l'alimentation de précision ». Cette thématique appliquée aux femelles reproductrices (truies et vaches laitières principalement) m'a permis d'exploiter et d'approfondir mes connaissances en vaches laitières et d'en acquérir en élevage porcin. Cette thématique porteuse m'a

également donné l'opportunité de continuer à travailler dans plusieurs domaines de recherches car l'alimentation de précision n'englobe pas seulement la nutrition et l'analyse de données mais également l'utilisation ou la conception de modèles nutritionnels, le développement de nouveaux outils permettant la mise en pratique de nouvelles stratégies d'alimentation, et la prise en compte de plusieurs facteurs d'influence sur les besoins nutritionnels (environnement, comportement individuel…). De nouvelles collaborations se sont rapidement mises en place au sein de mon équipe (équipe SysPorc, « Le Porc dans les Systèmes d'élevage »), de l'unité (équipes Syslait, « Systèmes laitiers », et Alinut, « Alimentation et nutrition »), à l'échelle nationale (IFIP, IDELE) et internationale (CDPQ Canada) ; sans oublier les anciennes collaborations toujours actives (Aarhus University, UMR MoSAR). Ce poste de CR me permet également d'encadrer des étudiants en master mais aussi en doctorat. La transmission de connaissances et l'accompagnement individualisé me motivent et donnent plus de sens à mes recherches. C'est dans cet objectif de poursuivre l'encadrement de thèses que je présente ce mémoire d'HDR.

Pour une vision globale de mon parcours, vous trouverez mon CV en Annexe 1.

1.1.2. Publications et métrique

La liste complète de mes publications est disponible en Annexe 2.

Pour résumer, j'ai écrit 30 articles scientifiques dans 12 revues différentes, dont 4 articles soumis actuellement en cours d'évaluation. Parmi ces 30 articles, j'ai été première auteure de 16 publications, **27 publications sont de rang A** et 23 dans le premier quartile des revues en sciences animales. J'ai également participé à la rédaction d'un chapitre d'ouvrage, et un deuxième

est en cours d'écriture. Lors de séminaires ou conférences, j'ai présenté 29 communications, dont 16 en première auteure, et 17 internationales (Tableau 1). Enfin, j'ai été invitée par deux fois à présenter mes recherches à l'EAAP de Ghent en 2019 (Belgique) et lors de la conférence ADAS-NANP en 2021 (US). Au 1er février 2022, ces publications et communications m'ont permis d'atteindre un h-index de 10 d'après Research Gate (ou h-index de 9 sans auto-citation), avec un nombre de citations de 353.

Tableau 1 – Récapitulatif de la dissémination scientifique de mes recherches

	Auteurs	Information complémentaire
30 articles scientifiques (dont 5 soumis)	1ère auteure : 16 Etudiant 1er auteur sous ma direction: 4	Rang A : 27 Q1 : 23 Q2 : 2
2 chapitres d'ouvrages ou rapports diplômants	1 chapitre d'ouvrage (co-auteure) 1 thèse de doctorat	
29 communications en congrès (poster ou oral)	1ère auteure : 16 Etudiant 1er auteur sous ma direction: 8	12 en congrès nationaux 17 en congrès internationaux
2 communications orales invitées	Congrès internationaux	

1.2. Science : axes et projets de recherche

1.2.1. Eléments de contexte scientifique

En productions animales, l'alimentation est un levier majeur pour améliorer l'efficacité et la rentabilité économique de la production, réduire les rejets vers l'environnement, et garantir la

qualité des produits animaux. La connaissance précise des besoins nutritionnels des animaux permet de minimiser les coûts d'alimentation, en ajustant la quantité et la qualité de la ration.

Actuellement, les vaches laitières en lactation et les truies gestantes sont logées en groupe et nourries sur la base des besoins d'un animal moyen. En conséquence, les animaux peuvent recevoir certains nutriments en excès ou en déficit par rapport à leurs besoins propres. L'objectif de l'alimentation de précision, plus récemment renommée « alimentation sur mesure », est de développer des systèmes qui estiment et délivrent, au bon moment, une ration avec une quantité et une composition adaptées aux besoins de production de chaque animal.

Par exemple, en vaches laitières, Bossen and Weisbjerg (2009) ont montré qu'en augmentant l'énergie de la ration à la fin de la période de mobilisation des réserves, identifiée spécifiquement pour chaque vache, la balance énergétique globale de l'animal s'est améliorée et potentiellement la production laitière. Lorsque j'ai commencé mes recherches, les effets d'une telle stratégie n'avaient pas encore été évalués sur les performances de reproduction, la longévité ou les performances de production au cours de la vie de l'animal. De plus, aucune étude n'avait démontré la faisabilité et le potentiel d'une alimentation ajustée régulièrement (ex. chaque semaine) et pour chaque vache en termes de quantité et de composition.

Des études chez le porc en croissance ont produit des résultats prometteurs pour la production de viande : comparé à une conduite alimentaire en groupe, une alimentation individuelle ajustée chaque jour a permis de réduire l'ingestion de lysine (un acide aminé indispensable) de 26%, les coûts alimentaires d'environ 10%, et les rejets d'azote dans l'environnement de 30% (Andretta et al., 2016). Lorsque j'ai commencé mes recherches

les conséquences d'une alimentation sur mesure chez la truie reproductrice n'étaient pas connues.

L'axe initial de mes recherches était donc de déterminer si la prise en compte des besoins nutritionnels **individuels** et de leurs variations dans le temps (induites par des facteurs internes ou externes) permettait d'améliorer les performances des femelles reproductrices. La réponse à cette question reposait aussi sur notre capacité à déterminer les besoins individuels à partir de paramètres enregistrés sur et autour de l'animal. Le phénotypage à haut débit fournit des informations individuelles en dynamique sur les animaux, mais de nature et de temporalité très hétérogènes, tandis que les innovations en robotique offrent des possibilités de développement d'équipements de distribution "intelligents" pour apporter à chaque animal une ration individualisée. Des modèles adaptés doivent alors être associés à ces technologies pour l'application de l'alimentation sur mesure en temps réel (Dourmad et al., 2015). Le phénotypage à haut débit offre donc la possibilité d'améliorer la capacité de prédiction de ces modèles et de les utiliser pour de nouvelles applications en élevage, en prenant en compte en temps réel l'ensemble des facteurs de variation des besoins. Des verrous spécifiques doivent cependant être levés en combinant la modélisation et l'exploration de données si l'on souhaite une prise de décision éclairée en fonction des informations remontées des capteurs et automates pour un pilotage individuel de l'alimentation.

Au final, il est donc nécessaire de concevoir de nouveaux modèles nutritionnels basés sur des informations collectées à haut débit. Ils devront tenir compte de la variation entre les animaux et dans le temps. Il s'agit de changer de paradigme dans la définition des recommandations nutritionnelles et leur mise-en-œuvre en élevage, en adaptant l'aliment à chaque animal et non à un groupe

d'animaux. L'intérêt pour les éleveurs est manifeste et multiple : meilleurs performances économiques, moindres rejets, détection précoce de troubles de l'alimentation et donc potentiellement d'autres troubles, etc. C'est aussi une réponse à certaines interrogations de la société notamment concernant le bien-être animal.

1.2.2. Questions et axes de recherche

Les questions qui sous-tendent mon activité de recherche sont :

- Comment estimer en temps réel les besoins nutritionnels de chaque femelle reproductrice à partir de l'acquisition automatisée de données de natures diverses ?
- Comment piloter l'alimentation de chaque femelle reproductrice au plus près de ses besoins pour améliorer l'efficience de la production (réduction des coûts et des rejets vers l'environnement) ?

Mes recherches visent à développer de nouveaux concepts dans le domaine de la nutrition des femelles reproductrices, en intégrant des informations multiples obtenues à haut-débit à l'échelle de chaque individu dans des modèles dynamiques d'estimation des besoins.

Pour cela, il faut avant tout être en mesure de caractériser la variabilité individuelle en lien avec les besoins nutritionnels des animaux afin de l'intégrer ensuite aux modèles nutritionnels. Dans un premier temps, il s'agit de simuler et prédire les besoins nutritionnels individuels pendant une phase physiologique précise (i.e., gestation ou lactation). Cette connaissance permet ensuite d'établir des rations individuelles, ajustées en quantité et en qualité (i.e. teneur en acides aminés, ou densité énergétique)

pour optimiser les performances de production et minimiser les rejets. Dans un deuxième temps, l'objectif sera de piloter l'alimentation des animaux de façon individuelle et en dynamique pour une mise en œuvre en situation expérimentale. Dans un troisième temps, de nouveaux paramètres individuels de comportement (i.e. activité physique de l'animal, comportement alimentaire), de santé, métaboliques (i.e. taux de lactose dans le lait et le sang) ou environnementaux (i.e. température et humidité de la salle) devront être mesurés, quantifiés et intégrés dans les modèles nutritionnels afin de gagner en précision pour la prédiction des besoins nutritionnels. Enfin, les ressources alimentaires alternatives méritent une certaine attention comme les drêches de distillerie séchées avec solubles qui sont un aliment pertinent pour les vaches laitières car riches en protéines et en fibres, ou les algues qui constituent également une source de protéine intéressante pour les vaches. Ces aliments alternatifs pour les animaux permettraient de réduire la proportion des aliments directement consommables par l'homme.

Mes recherches privilégient deux espèces : **la truie** et **la vache laitière**. Le défi d'élaboration de modèles et outils pour anticiper et piloter les processus en élevage s'applique à ces deux espèces. Les objectifs sont d'améliorer l'efficience des animaux dans leurs systèmes de productions en proposant de nouvelles stratégies d'élevage plus durables pour un animal multi-performant (efficience, robustesse, bien-être). Certains défis vont varier en fonction des deux espèces, notamment ceux qui concernent l'accès aux données. Pour les vaches laitières, les données de production sont facilement accessibles lors du passage à la traite, la pose de capteurs sur l'animal est simple et de nombreuses options permettent de collecter facilement des données individuelles. Pour les truies, cette collecte de données à l'échelle individuelle est beaucoup plus difficile : la quantité de lait produite devra être estimée et il est très difficile de poser des

capteurs individuels sur l'animal qui cherchera à les détruire. Il faut donc développer de nouveaux automates, proxys et techniques capables d'enregistrer les informations nécessaires au modèle nutritionnel.

Mes recherches gravitent donc autour de 4 axes complémentaires:

Axe 1 – L'intégration de la variabilité individuelle à différentes échelles dans les modèles nutritionnels

Axe 2 – La simulation des effets de l'alimentation de précision sur la productivité et les rejets environnementaux

Axe 3 – L'alimentation sur mesure mise en place expérimentalement

Axe 4 – L'amélioration des modèles nutritionnels et stratégies d'alimentation grâce à de nouvelles mesures individuelles et ressources.

1.2.3. Projets de recherches

Le tableau 2 récapitule les différents projets de recherche auxquels j'ai participé, qui sont terminés ou en cours, ainsi que mon rôle dans chacun et les collaborations développées. Les collaborations établies au cours de ces projets sont détaillées en partie 1.3. et les résultats scientifiques de ces projets dans la partie 2. L'équilibre est globalement atteint entre les deux espèces étudiées et les collaborations nombreuses à différentes échelles (équipe ou unité de recherche, nationale, internationale).

Tableau 2 – Résumé des projets réalisés par espèce, rôle et collaborations

Nom du projet	Années	Catégorie	Rôle	Collaborations
En vaches laitières :				
REPROLAC	2013-2016	Européen	Participante (Doctorante)	AU, INRAE MoSAR
Alternative Feed	2016-2017	National (Dk)	Participante (Post-doctorante)	AU
GplusE	2017	Européen	Participante (Post-doctorante)	Europe
LACTALIM	2020-2022	Européen (Fr, Dk)	Project leader	AU
WIN Feed	2020-2022	National (Fr)	Project leader	INRAE MoSAR
HARPAGON	2020-2023	National (Fr)	Package leader	IDELE
En truies :				
Bien-être & transport	2017	National (Dk)	Participante (Post-doctorante)	AU, Ministère
Feed-a-Gene	2017-2019	Européen	Participante	Europe
PréciTruie	2017-2020	Monde (Fr, Ca)	Project leader	CDPQ - Uni. Laval, IFIP
SOWELL	2020-2023	Monde (Fr, Ca)	Project leader	CDPQ, IFIP, DILEPIX
SOMOVE	2021-2023	National (Fr)	Project leader	IFIP, DILEPIX
SOLIFE	2022-2025	National (Fr)	Project leader	IFIP
WELCOMES	2022-2027	Européen	Participante	Europe

L'objectif du projet européen REPROLAC (2013-2016) était de développer une nouvelle stratégie de production laitière permettant de réduire considérablement la charge environnementale et climatique tout en améliorant la productivité et le bien-être des animaux ainsi que l'économie de l'agriculteur. Ce projet impliquait cinq partenaires (recherche et industrie), dont l'Université d'Aarhus (**AU**, Danemark), ainsi que quelques fermes privées. Ce projet constituait le cœur de ma thèse avec notamment une expérimentation de presque trois ans visant à tester une stratégie alimentaire distribuée à des vaches en lactations longues, l'analyse des données expérimentales, de nombreuses publications et conférences.

Lors de ma période post-doctorale (2016-2017) à AU, j'ai analysé plusieurs données provenant d'expérimentations évaluant l'intérêt d'aliments alternatifs pour les vaches laitières telles les drèches, les algues et la supplémentation en glycérol. Ces analyses ont fait l'objet de trois publications. J'ai également participé à un projet d'étude du stress thermique et du besoin d'abris pour plusieurs espèces ainsi qu'à l'évaluation du stress des truies lors de leur transport à l'abattoir (rapports au ministère danois).

Le projet européen GplusE (Génotype et environnement), impliquait 15 partenaires (recherche et industrie) et s'est concentré sur l'optimisation de l'efficacité de la production, de l'empreinte environnementale, de la santé et du bien-être des vaches laitières grâce à une approche qui a pris en compte les stratégies de sélection et de gestion génomiques. J'ai participé à ce projet dans le cadre de ma période post-doctorale à AU (2016-2017), et me suis concentrée sur l'analyse de données évaluant l'utilisation des métabolites du lait pour prédire quelles vaches étaient susceptibles de développer un problème de santé. Ces résultats ont fait l'objet d'une publication.

En tant que chargée de recherches à l'INRAE (depuis 2017), j'ai développé le projet LACTALIM, financé par l'unité PEGASE. Ce travail s'est effectué en collaboration avec AU. Ce projet avait pour but de déterminer si le lactose dans le sang et le lactose dans le lait pouvaient être des indicateurs pertinents de la persistance de la lactation et s'il y avait un intérêt à intégrer ces indicateurs dans la gestion de la nutrition des vaches laitières. Pour ce projet, j'ai utilisé la base de données de production et métabolites construite lors de ma thèse (projet REPROLAC) et effectué des analyses supplémentaires sur les échantillons sanguins (lactose dans le sang). Ces résultats feront l'objet d'une publication (en cours de rédaction) et de résumés de conférence.

En collaboration avec l'équipe SysLait (INRAE) et l'UMR MoSAR (INRAE, Paris), j'ai monté le projet WIN Feed (2020-2022, en cours) afin de poursuivre mes recherches en alimentation sur mesure pour les vaches laitières. L'objectif de ce projet, financé par le département PHASE (INRAE), est d'évaluer l'intérêt et la faisabilité d'une stratégie d'alimentation individualisée pour les vaches laitières et d'améliorer un modèle de prédiction des performances des vaches laitières intégrant différentes stratégies d'alimentation.

Le projet HARPAGON (2020-2023, en cours) porté par l'Institut de l'Élevage (IDELE) et financé par le Compte d'Affectation Spéciale pour le Développement Agricole et Rural (CASDAR) ambitionne de développer un nouveau système d'alimentation de précision pour les vaches laitières, piloté par l'éleveur. Il permettra d'adapter l'alimentation individuellement pour correspondre à la diversité des profils de vaches en termes de valorisation du concentré. Je suis pilote de l'action 2 (sur 4) de ce projet qui vise à identifier et caractériser l'ensemble des profils de vache en termes de réponses à un challenge sur la quantité de concentré offerte.

Figure 1 - Logos des projets WIN Feed (vaches laitières) et SOWELL (truies gestantes)

J'ai participé au projet européen Feed-a-Gene (2015-2020) qui regroupait 23 partenaires européens et chinois. Ce projet visait à mieux adapter les différents composants des systèmes de production d'élevage monogastrique (porcs, volaille, lapins) afin d'améliorer l'efficacité globale et de réduire l'impact environnemental. Cela impliquait le développement de ressources alimentaires et de technologies alimentaires nouvelles et alternatives, l'identification et la sélection d'animaux robustes mieux adaptés aux conditions fluctuantes, et le développement de techniques d'alimentation permettant d'optimiser le potentiel de l'aliment et de l'animal. Le projet Feed-a-Gene a financé l'achat d'automates d'alimentation pour les truies en gestation et en lactation, désormais installés à la station expérimentale porcine de Saint-Gilles (UE3P). Le projet PréciTruie que j'ai développé en étroite collaboration avec plusieurs membres de l'équipe SysPorc (2017-2020) était fortement lié au projet Feed-a-Gene. Les deux financements acquis provenant du département INRAE PHASE (politique incitative scientifique, années 2017-2018 renouvelé en 2019-2020) ont permis l'achat de capteurs d'activité et le financement d'une expérimentation évaluant l'effet d'une alimentation sur mesure sur les performances, les coûts et les rejets environnementaux. Les objectifs de ce projet étaient de développer, mettre en œuvre et valider un modèle nutritionnel (SOFEE) permettant de prédire les besoins nutritionnels quotidiens et individuels des truies. Ces estimations ont permis d'optimiser les apports d'aliments dans l'optique de réduire les

rejets environnementaux et les coûts alimentaires. Le projet PréciTruie a également permis de développer des collaborations avec le Centre de Développement du Porc du Québec (CDPQ, Canada) et l'Institut technique de Recherche et de Développement de la filière porcine (IFIP, France) afin d'acquérir des données permettant de tester le modèle SOFEE et d'évaluer les potentiels effets de différentes stratégies alimentaires.

Toujours dans le cadre de mon poste de chargée de recherches à l'INRAE et sur la thématique de l'alimentation sur mesure, j'ai monté le projet SOWELL dans le but de mesurer, quantifier et intégrer les comportements individuels (notamment l'activité physique) dans le modèle SOFEE. Ce projet ambitieux intègre également une thèse (2020-2023) que j'encadre. Il est financé par l'INRAE et l'Institut de Convergences en Agriculture Numérique (#DIGITAG) et s'effectue en collaboration avec l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (INRIA) et le CDPQ. Le projet est en cours et porteur. En effet, il a déjà permis d'intégrer plusieurs stagiaires de M1 et M2, d'obtenir un financement de la part de Rennes Métropole pour l'achat de capteurs et d'automates d'abreuvement, et d'obtenir trois bourses pour le séjour de ma doctorante au Canada (CDPQ).

Le projet SOMOVE s'inscrit dans la continuation du projet SOWELL. L'objectif de ce projet est de développer un programme permettant l'analyse automatique des vidéos comportementales de truies gestantes afin d'intégrer l'activité physique dans l'estimation des besoins nutritionnels et également d'évaluer le bien-être animal. Ce travail s'effectue dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise DILEPIX, spécialisée en intelligence artificielle et en vision par ordinateur. Il a été financé en partie par l'INRAE et #DIGITAG pour les travaux préliminaires de 2021 et un dossier a été déposé aux appels

d'offre CASDAR et INNOV' R&D collaborative pour financer les travaux à venir en 2022 et 2023.

Le projet SOLIFE (2021-2026), en collaboration avec l'IFIP, a pour objectif d'étudier des effets à long terme de différentes stratégies d'alimentation sur mesure sur la santé et la productivité des truies. C'est un projet qui permettra d'avoir une vision globale de l'alimentation sur mesure et de ses effets pour les truies, et d'intégrer les connaissances collectées au cours des différents projets (Feed-a-Gene, PréciTruie, SOWELL, SOMOVE). Une thèse, dont le financement est acquis, devrait débuter en septembre 2022 sous mon encadrement.

Le projet européen WELCOMES (WELfare COnnected Monitoring systEms for Sustainable livestock production) déposé fin 2021 a pour buts d'améliorer la capacité à fournir des indicateurs et des outils innovants pour évaluer, surveiller et gérer objectivement le bien-être animal dans les pays européens ; et d'aider différentes parties prenantes, des opérateurs commerciaux aux décideurs politiques, à passer des pratiques actuelles à de meilleures pratiques favorables au bien-être animal. Cela se fera en tenant compte de l'impact environnemental, socio-économique et pratique (travail quotidien), conformément aux résultats attendus décrits dans le sujet et par la création d'une plateforme européenne de données ouvertes sur le bien-être.

1.3. Collaborations et encadrement

1.3.1. Réseau de collaboration et activités collectives

Soucieuse de développer des compétences complémentaires, de m'insérer dans le montage de projets

européens, d'améliorer ma visibilité internationale et d'enrichir mon réseau pour organiser mes recherches, j'ai intégré plusieurs groupes de travail et participé à des séminaires et conférences.

Modélisation. Je participe régulièrement à la journée annuelle du groupe Atmosphase qui réunit les scientifiques engagés dans des projets de modélisation, de la cellule au système d'élevage, au sein du département PHASE. En 2019, au cours d'une de ces journées, j'ai présenté mes travaux de modélisation en truies gestantes : « Modélisation dynamique des besoins des truies en gestation dans l'objectif de développer un outil d'aide à la décision pour l'alimentation de précision ». J'ai également développé une collaboration avec Christine Largouët (INRIA-IRISA) sur le projet SOWELL notamment via la mise en place un co-encadrement de thèse sur ce projet. Depuis 2013, je collabore aussi avec l'UMR MoSAR (Nicolas Friggens, Olivier Martin) sur des modèles et méthodes d'analyses de données en vaches laitières (projets REPROLAC et WIN Feed).

Equipe et Unité de recherche. Mon réseau scientifique s'est également développé au sein de mes équipes et unités de recherches à AU et à l'INRAE. Lors de mes années à AU, j'ai développé des collaborations au sein de mon équipe de nutrition, notamment avec Martin Riis Weisbjerg, Mogens Vestergaard et Jakob Sehested. J'ai aussi travaillé avec d'autres équipes d'AU, comme l'équipe de physiologie (Martin Tang), l'équipe de comportement et bien-être animal (Janne Winter Christensen, Mette Herskin) et l'équipe d'agroécologie (Jesper Lehmann). Au sein de mon équipe actuelle (SysPorc, INRAE), j'ai pu collaborer plus particulièrement avec Jean-Yves Dourmad, spécialiste en nutrition porcine, et Céline Tallet, spécialiste en comportement et bien-être animal. Mon travail sur l'alimentation de précision des

truies gestantes et plus particulièrement le développement du modèle nutritionnel SOFEE a fait l'objet d'un court article « Un nouveau paradigme de modèles nutritionnels pour l'alimentation de précision des truies en gestation et en lactation » présenté comme le fait marquant de l'équipe en 2019. Hors équipe mais toujours dans mon unité de recherches, en 2021 j'ai débuté une collaboration avec Anne Boudon (équipe AliNut, « Alimentation et nutrition ») sur l'analyse de données d'abreuvement en vaches laitières et truies gestantes et la détection de perturbations d'abreuvement comme indicateurs de santé. Nous avons obtenu un financement de l'institut de convergence #DIGITAG pour une stagiaire de Master 2 qui a réalisé son stage de 5 mois sur ce sujet. Ce travail se poursuivra en 2023 à l'occasion d'un autre stage de Master 2 financé par #DIGITAG et également au cours de la thèse SOWELL. Je collabore aussi avec Jocelyne Flament (équipe LACTATION) sur l'analyse de données de lactose dans le lait et le sang de vaches laitières comme indicateurs de persistance (projet LACTALIM) et avec l'équipe SysLait (Nadège Edouard, Rémy Delagarde et Luc Delaby) sur le projet WIN Feed. En novembre 2019, j'ai présenté un poster lors du séminaire Défis PHASE (département scientifique) et j'ai pris part au séminaire de l'unité PEGASE en juin 2019. Je participe à la vie collective de mon unité via le groupe de travail du livret d'accueil des nouveaux arrivants. Enfin, je suis animatrice de l'AXE 1 (sur 4) de l'UMT RIEL 4 (Recherches et Innovations en Elevages Laitiers, 2021-2026). L'UMT RIEL regroupe depuis 2006 les équipes de l'Institut de l'Elevage de l'Ouest de la France, de l'INRAE UMR REGASE et d'Agrocampus Ouest autour de la production laitière bovine. L'axe 1 porte sur l'alimentation comme levier de la multi-performance des systèmes. L'objectif de cette thématique est d'analyser et de proposer des solutions novatrices en termes d'alimentation de tous les animaux du troupeau, et de voir les multiples impacts possibles, sur les animaux et les productions de l'élevage.

Communauté nationale de chercheurs en porcins et bovins. J'ai intégré deux projets portés par l'Institut de l'élevage (IDELE) : le projet #Digitag « serious escape game » (2019-2020) et le projet HARPAGON. Le projet #Digitag avait pour but de développer des escape game virtuels pour enseigner l'élevage sur mesure aux étudiants en dernière année d'école d'ingénieur agronome (coordination : Amélie Fisher, IDELE). J'ai participé à ce projet notamment par l'apport de données provenant de capteurs utilisés en élevage porcin. Je collabore également activement avec des ingénieurs de l'IFIP sur différents projets (PréciTruie, SOMOVE, SOLIFE) et également en partageant des données.

Afin d'élargir mes connaissances sur les différents systèmes d'élevage de porcs, je suis intégrée au consortium ORIGAMI (MP METABIO, Consortium for ORganic pIG fArMIng). ORIGAMI est un réseau interdisciplinaire de partenaires (INRAE, IFIP, ADIV et ITAB). Il repose sur l'hypothèse que l'élevage de porcs, en favorisant l'optimisation des processus et le bouclage des cycles à différents niveaux d'organisation (de l'animal au territoire) peut être un moteur du développement de l'agriculture biologique. ORIGAMI identifiera, à partir de témoignages d'acteurs et d'analyses de projets en cours, les freins et leviers au développement de l'élevage porcin biologique et des questions de recherches prioritaires. J'apporterai au consortium mes connaissances et réflexions en élevage sur mesure, notamment pour définir si une alimentation sur mesure est envisageable en élevage porcin bio.

J'ai participé à plusieurs séminaires et congrès nationaux.

Le workshop INRA-INRIA à Rennes (France) en 2017 m'a permis d'acquérir des connaissances sur les réseaux de capteurs pour l'agronomie, l'acquisition, collecte et analyse de données

pour une agriculture raisonnée ; et d'établir des collaborations avec l'INRIA (projet SOWELL). Dans le cadre de la journée d'information du 16 janvier 2020 de l'UMT DigiPorc autour du thème « Données & Numérique », j'ai présenté mes recherches et outils (distributeur automatique, modèle nutritionnel) sur l'alimentation sur mesure des truies pendant une série de visites à l'UE3P (Saint-Gilles, France). Au SPACE 2018, j'ai présenté mes travaux de recherches et proposé des démonstrations d'outils logiciels en alimentation sur mesure pour les porcs au stand INRAE. Au SPACE 2021, j'étais membre du jury pour les INNOV' SPACE, impliquant la lecture de 16 dossiers scientifiques et leur évaluation. Je participe aussi chaque année aux Journées de la Recherche Porcine (JRP, Paris) avec à chaque fois un ou plusieurs résumés (poster ou présentation).

En ce qui concerne les vaches laitières, j'ai participé en 2014 aux 3R (Rencontres Recherches Ruminants, Paris, France) et à la conférence ESLAV-ECLAM Annual Scientific Meeting on Animal Welfare en 2016 (Lyon, France).

Communauté internationale. Au travers du projet européen Feed-a-Gene (H2020, 2015-2020) décrit ci-dessus, j'ai participé aux réunions du workpackage « Dynamic modelling of gestating sows needs in the aim to develop a decision support tool for feeding precision » à Bologne les 20 et 22 novembre 2018 (présentation du modèle truies gestantes et des premiers résultats de simulations) ; à la réunion annuelle du projet à Budapest du 14 au 16 mai 2019 (présentation des résultats de simulations) ; à la dernière réunion du workpackage à Nouzilly les 21 et 22 novembre 2019 (présentation globale des résultats de simulations et des premiers résultats expérimentaux), et au séminaire final Feed-a-Gene à Rennes les 22 et 23 janvier 2020 pendant lequel j'ai présenté un poster, joué le rôle de conseillère en alimentation sur mesure et de rapporteur lors de débats.

J'ai participé à plusieurs conférences internationales. En 2014, j'ai présenté mes recherches sur la lactation prolongée des vaches laitières à la conférence ISNP-ISRP à Canberra (Australie). Depuis 2014, je participe régulièrement au congrès annuel européen sur les productions animales (EAAP). A l'EAAP 2016 à Belfast en Irlande, l'un de mes posters a obtenu le titre de « ***Best Poster*** » des sessions « Cattle » and « Physiology ». A l'EAAP de 2019 en Belgique, j'ai été ***oratrice invitée*** pour présenter mes recherches sur la variabilité des besoins nutritionnels des truies gestantes (présentation de 30 minutes, session « Sow and gilt nutrition and management ») et également des simulations sur l'alimentation sur mesure autour des minéraux pour les truies gestantes lors d'une présentation plus courte (15 minutes, session « Innovative approaches – ***junior competition*** »). En 2015 j'ai participé à la conférence ADSA à Orlando (Etats-Unis) pour présenter mes travaux de thèse, puis en 2021 j'ai été ***oratrice invitée*** à la conférence ASAS-NANP (Etats-Unis) où j'ai présenté en virtuel (situation covid oblige) un bilan de mes recherches en alimentation sur mesure porcine pendant 40 minutes suivies de 20 minutes d'échanges. Cette dernière conférence m'a donné l'opportunité de développer mon réseau et par la suite d'être invitée à écrire deux articles pour Journal of Animal Science en collaboration avec les autres orateurs invités.

Depuis juin 2020, je suis membre du comité scientifique du journal Animal et en 2021 je suis devenue **éditrice** du nouveau journal Animal Open Space (AOS) qui met en avant le partage public des données.

Dans l'idée de poursuivre le développement de mon réseau, j'ai participé à l'écriture d'un chapitre d'ouvrage intitulé "Smart pig nutrition in the digital era" (ouvrage : Smart Livestock Nutrition) en collaboration avec plusieurs membres de mon unité (Ludovic Brossard, Jean-Yves Dourmad et Jaap van Milgen) et

coordonné par Ilias Kyriazakis (Queen's University Belfast, UK). J'ai également collaboré avec l'Université de Sebelas Maret (Indonésie) en donnant un webinaire d'1h30 (avec questions) sur la thématique « Dairy farming practices to optimize milk production » qui a été suivi par 170 chercheurs et étudiants. J'ai aussi maintenu une collaboration active avec AU en participant au webinaire sur les capteurs en élevage (22 avril 2020), en construisant le projet LACTALIM, et en m'impliquant dans la rédaction d'une synthèse sur la lactation prolongée [17].

1.3.2. Encadrement et l'enseignement

Encadrement. En 2014, en 2ème année de thèse, j'ai encadré une première élève de Master 1 sur la détection des œstrus et leur effet sur la production laitière. De 2017 à 2020, j'ai suivi les travaux de thèse de Raphaël Gauthier sur l'alimentation sur mesure des truies en lactation ce qui a donné lieu à plusieurs publications communes. Sur cette même période, j'ai également encadré une élève de 3ème pendant une semaine en 2018, et deux élèves de Master 1 pendant 3 et 5 mois sur les projets PréciTruie et SOWELL. Depuis le 1er octobre 2020, je co-encadre avec Jean-Yves Dourmad (HDR) et Christine Largouët la thèse associée au projet SOWELL (doctorante : Maëva Durand). En 2021, j'ai encadré 3 étudiantes de Master 2 (stages entre 5 et 6 mois) et une étudiante de Master 1 (stage de 2 mois) sur les projets SOWELL et SOLIFE. Une de ces étudiantes de Master 2 est désormais en CDD de 6 mois à l'INRAE Saint-Gilles et travaille sur plusieurs projets de recherche (SOWELL, SOLIFE et WIN Feed), les deux autres ont débuté en septembre 2021 une thèse l'une à l'INRAE Saint-Gilles et l'autre à l'université de Wageningen (Pays-Bas).

Enseignement. Depuis 2019 je participe au module d'enseignement annuel « Elevage de précision, aujourd'hui et demain : analyses de données de capteurs en élevage / big data (EDP) » porté par Yannick Le Cozler à AgroCampusOuest Rennes. Je suis responsable d'un TD de 2 heures portant sur les « Données issues d'analyseurs de progestérone (Herd Navigator) ». Ponctuellement, j'assure un deuxième TD de 2 heures sur ce module portant sur les « Données issues d'automates (DAC porcs) ». Sur ce module, j'ai aussi participé plusieurs fois à l'encadrement des étudiants lors de la visite de l'installation expérimentale laitière de l'unité PEGASE et au débriefing sur l'ensemble du module via une table ronde de 3 heures.

PARTIE 2 - SYNTHESE DE MES RECHERCHES

Cette partie synthétise mes travaux de recherche achevés ou en cours selon les 4 axes présentés précédemment. Les résultats des différents projets n'apparaîtront donc pas chronologiquement ni entièrement dans chaque axe, mais bien selon chaque thématique (Figure 2).

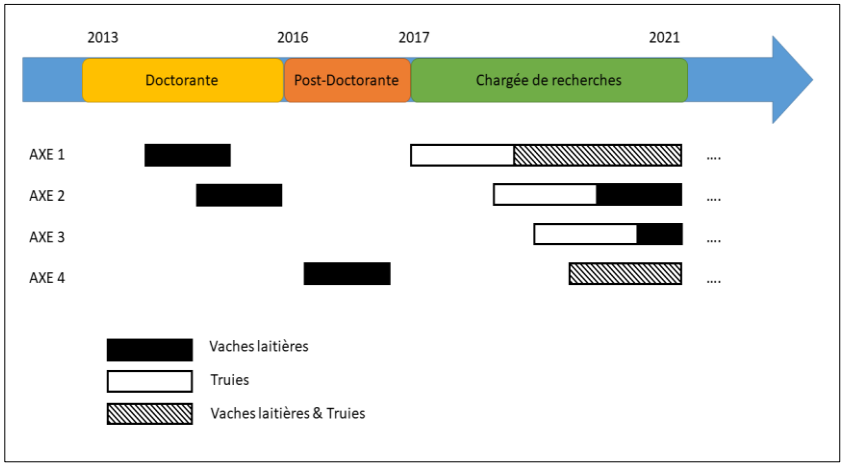

Figure 2 – Liens entre les axes de recherche et les périodes

2.1. Axe 1 - Intégration de la variabilité individuelle dans les modèles nutritionnels

Ce premier axe sert de pilier pour la suite de mes recherches. A travers la rédaction de synthèses bibliographiques, j'ai identifié les principales lacunes de connaissances et les défis à relever en alimentation porcine et bovine. Les modèles nutritionnels à disposition pour les deux espèces ont constitué une base solide afin d'intégrer la variabilité individuelle et au cours temps lors du calcul des besoins nutritionnels.

L'objectif de cet axe est de quantifier la variabilité individuelle des besoins nutritionnels entre individus et au cours du temps, afin d'établir des équations de prédiction des besoins nutritionnels de chaque animal en fonction des données de production collectées et d'intégrer ces informations dans les modèles nutritionnels actuels. Le traitement de données hétérogènes et de temporalités différentes représente un défi pour cet objectif d'intégration dans des modèles de pilotage.

2.1.1. Informations initiales collectées lors de synthèses bibliographiques

La collecte des informations disponibles dans la littérature, forcément disparates, sur l'alimentation sur mesure en élevage porcin et pour les vaches laitières, est nécessaire afin d'identifier les modèles nutritionnels disponibles, leurs avantages, leurs potentielles améliorations et également les nouvelles stratégies alimentaires à mettre en place.

Pour l'élevage porcin, ce travail bibliographique a permis (1) de définir l'efficacité alimentaire et de présenter les facteurs qui l'influencent, ainsi que les défis et les stratégies pour l'améliorer; (2) de définir l'alimentation sur mesure et les sources de variabilité des besoins en nutriments et de montrer la nécessité de nouvelles technologies pour obtenir des données en temps réel et (3) de présenter les modèles et applications actuels d'alimentation sur mesure pour les porcs en engraissement et les truies. Toutes les références aux informations collectées et résumées dans cette partie sont disponibles dans une synthèse publiée dans Animal Feed Science and Technology [20].

Les articles publiés sur le sujet portent majoritairement sur les porcs en croissance, ils sont beaucoup plus rares pour les truies

gestantes et en lactation. Pour les porcs en croissance, l'efficacité alimentaire peut être exprimée comme le ratio de la moyenne journalière de gain de poids sur la moyenne journalière d'ingéré pendant une période donnée. En pratique, l'inverse de ce ratio est généralement utilisé pour les animaux d'élevage et représente l'efficacité de conversion de l'aliment en gain de poids (indice de consommation, **IC**) influencé par plusieurs facteurs (le gaspillage, la digestibilité des aliments, la composition du gain de poids, l'ingestion et l'utilisation des nutriments). Pour les truies en lactation, l'amélioration de l'efficacité alimentaire se traduit par une augmentation du poids de portée lorsque que les truies mangent plus et donc produisent plus de lait. Pour les truies en gestation, l'efficacité alimentaire reste à définir et pourrait être calculée de deux façons : (1) en fonction du poids de la truie et de l'épaisseur de lard à la mise-bas, afin d'évaluer si les objectifs définis à l'insémination sont atteints, ou (2) en fonction du nombre de porcelets vivants à la naissance et éventuellement du poids de portée à la naissance. Dans tous les cas, l'efficacité alimentaire peut être améliorée selon la quantité et qualité d'aliments distribuée, leur forme et densité, ce qui réduit également les rejets environnementaux.

La stratégie d'alimentation majoritaire en élevage porcin repose sur un aliment unique distribué pour chaque période (croissance, gestation et lactation) et constitué selon les besoins d'un individu moyen du groupe. Chaque animal au sein du groupe reçoit donc le même aliment en terme de composition et de quantité quels que soient ses besoins, ce qui entraine une proportion d'animaux sous-alimentés et une autre suralimentée au sein du groupe. L'alimentation sur mesure quant à elle est une stratégie alimentaire fondée sur l'intégration de la variabilité individuelle au sein d'un groupe. Elle utilise des technologies comme des capteurs ou des automates d'alimentation qui permettent de délivrer la bonne quantité d'aliment avec la bonne

composition au bon moment, à l'échelle d'un individu ou d'un groupe (Figure 3).

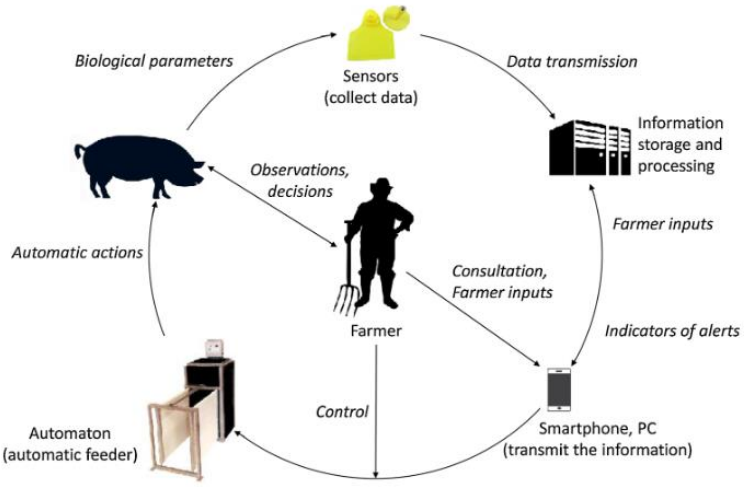

Figure 3 – Principes de l'alimentation de précision ou alimentation sur mesure [20]

Pour pouvoir établir des rations individuelles dans le cadre d'une alimentation sur mesure, il faut dans un premier temps prédire les besoins individuels des animaux. Des modèles prédictifs des besoins nutritionnels et de l'excrétion des nutriments, comme InraPorc®, se sont développés et permettent d'évaluer différentes stratégies alimentaires. Pour les porcs en croissance, l'alimentation sur mesure est un bon compromis pour réduire l'excrétion d'azote en ajustant chaque jour l'apport de nutriments, et notamment d'acides aminés (**AA**), selon les besoins individuels. Cette stratégie pourrait également être appropriée pour les truies mais cela reste à évaluer.

Cette synthèse a mis en lumière un manque de connaissances sur les facteurs de variation des besoins nutritionnels des truies et l'intégration de la variabilité individuelle dans le calcul de leurs besoins nutritionnels. Ce

travail a été en partie effectué chez le porc en croissance. Il est donc nécessaire dans un premier temps d'identifier les facteurs de variation des besoins nutritionnels des truies afin de les intégrer dans les modèles estimant leurs besoins nutritionnels pour améliorer leur précision.

Les vaches laitières ont été sélectionnées au cours des dernières décennies pour augmenter leur production laitière entrainant cependant de nouveaux défis. En effet, la capacité de production laitière des vaches hautement productrice n'est pas pleinement utilisée car la plupart d'entre elles ont encore une production laitière élevée au tarissement (Knight, 2005), qui dépasse souvent 30 kg/j (Madsen et al., 2008). De plus, la capacité de concevoir et l'état de santé des vaches ont diminué avec l'augmentation de la production laitière (Butler, 2000 ; Pryce et al., 2004 ; Gilmore et al., 2011), entraînant des pertes économiques considérables. A ces pertes économiques s'ajoute un coût alimentaire élevé dû à une plus grande consommation d'aliments concentrés pour apporter plus d'énergie à la glande mammaire de la vache hautement productive (Kolver et Muller, 1998 ; García et Fulkerson, 2005). De plus, cette énergie nécessaire à la production laitière ne peut pas provenir entièrement de la prise alimentaire car le pic d'ingestion ne survient qu'après le pic de production laitière (Figure 4). Notamment en début de lactation, cela oblige les vaches à utiliser davantage leurs réserves corporelles et à prolonger la période de bilan énergétique (**EB**) négatif, ce qui entraîne des effets négatifs sur la gestation et la santé (Butler et Smith, 1989 ; Veerkamp et al., 2003 ; Pryce et al., 2004). Cette sélection pour des vaches hautement productrices a donc induit le besoin de modifier la gestion des vaches en termes d'alimentation et de reproduction afin de répondre à ces nouveaux défis. Principalement en début de lactation, la vache a besoin d'être nourrie suffisamment pour répondre au pic de production laitière, et elle nécessite une

attention vétérinaire pour traiter les maladies (mammite, boiterie, dénutrition conduisant à une note d'état corporel faible, Dobson et al., 2007). Ces défis montrent un besoin évident de mieux comprendre les relations entre production, reproduction, bilan énergétique, santé et statut métabolique de la vache laitière, afin de proposer des solutions d'alimentation et de gestion proactives.

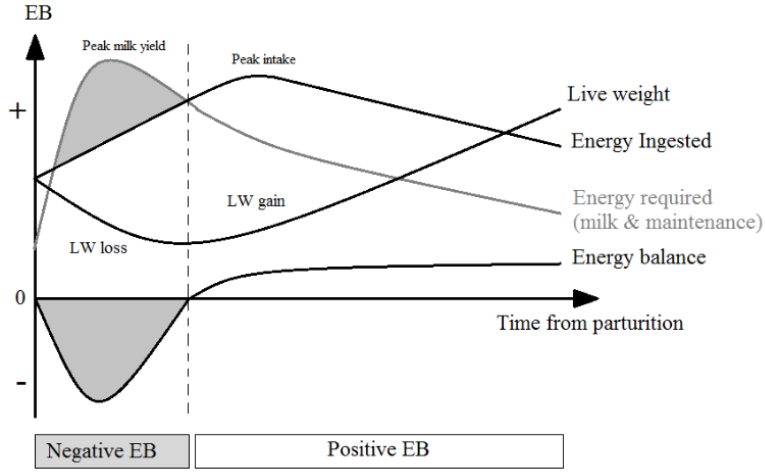

Figure 4 – Relation entre les variables de production (poids, ingestion, production laitière) pendant la lactation et le bilan énergétique de l'animal (EB)

La répartition de l'énergie entre les différentes fonctions de l'animal varie selon l'âge et le stade de lactation. En moyenne, 70% de l'énergie est utilisée pour la production laitière, 20-25% pour l'entretien (i.e. besoins pour se maintenir en vie à un poids constant sans production pour un animal au repos), 5-10% pour l'activité physique et de faibles pourcentages pour la croissance (en premières et deuxièmes lactations seulement) et la conception (<1%, Friggens et al., 2007). L'EB est classiquement défini comme la différence entre l'apport énergétique provenant de l'alimentation et l'énergie nécessaire à l'entretien, à la production et à la gestation (Heuer et al., 2000). Il peut être également estimé à partir de la note d'état corporelle, du gain de poids ou d'une

combinaison de métabolites sanguins. Il constitue un paramètre important pour les vaches laitières. L'EB négatif a des effets négatifs directs possibles telle une diminution de l'ingestion et par conséquent de la production de lait. L'EB négatif augmente les problèmes de reproduction et diminue la fonction immunitaire des cellules ce qui entraîne une augmentation du risque de problèmes de santé (cétose, stéatose hépatique, placenta retenu).

Différentes stratégies peuvent être mises en place pour soutenir la production laitière et les performances de reproduction. Par exemple, augmenter la fréquence de traite de deux à trois fois par jour permet d'augmenter la production laitière tout au long de la lactation d'environ 10 à 20% selon les références (Smith et al., 2002 ; Klei et al., 1997 ; Pearson et al., 1979). Cependant, augmenter la fréquence de traite journalière entraîne plus d'heures de travail pour l'éleveur, sauf si celui-ci est équipé qu'un système de traite automatique (**AMU**). Ces AMU se sont développés à partir de 1992 et depuis le nombre de fermes équipées d'AMU ne cesse d'augmenter. Néanmoins, augmenter la fréquence de traite réduit le temps que les vaches passent couchées ou à s'alimenter, des activités majeures pour garantir une production laitière et la santé de la vache (Gomez and Cook, 2010).

Une autre stratégie étudiée pour soutenir la production laitière et les performances de reproduction pourrait être de retarder l'insémination à une période où l'EB est de nouveau positif alors qu'en situation traditionnelle ce n'est pas le cas. Quelques expérimentations, principalement avec des vaches accédant aux pâturages, montrent qu'avec cette stratégie, induisant des lactations prolongées, la production de lait est augmentée par rapport à une lactation normale de 10 mois. La lactation prolongée semble plus avantageuse, en termes de rendement laitier quotidien et de rentabilité économique, pour les

vaches primipares que multipares (Arbel et al., 2001, Osterman et Bertilsson, 2003). Cela peut être dû au fait que les vaches primipares ont une persistance plus élevée que les vaches multipares et peuvent donc être inséminées plus tard et maintenir une bonne productivité en fin de lactation (Ratnayake et al., 1998). Concernant l'effet de cette insémination tardive sur les taux de gestation, les résultats sont rares et très variables. Bien que les taux de gestation semblent s'améliorer avec une lactation prolongée, dans la plupart des cas, aucune différence significative n'a été trouvée entre les taux de gestation des vaches en lactation prolongée et des vaches en lactation normale de 10 mois (Arbel et al., 2001).

Enfin des stratégies d'alimentation peuvent être envisagées pour soutenir la production laitière. L'ingestion de matière sèche est le premier facteur limitant pour produire du lait. En effet, un rendement laitier élevé dépendra toujours d'une ingestion élevée. Si la vache ne mange pas assez, une diminution du poids et de la production laitière sera observée. L'ingestion est limitée par plusieurs facteurs, le premier étant le volume du réticulo-rumen, qui détermine la consommation physique potentielle de fourrages d'une vache (Forbes, 1995). Le contenu énergétique de l'alimentation est le deuxième facteur le plus influant dans la régulation de la consommation alimentaire (Allen, 2000). Enfin, les facteurs environnementaux (par exemple la température) et les caractéristiques associées à la capacité de l'animal à utiliser l'énergie de l'alimentation, telles que son état de santé, son stade de lactation, sa parité, son état physiologique (gestation), ou son niveau de production, affectent également l'ingestion (Forbes, 1995). Ainsi, plusieurs stratégies alimentaires se sont développées pour améliorer l'EB de la vache et ses performances. Par exemple, l'augmentation de l'apport en concentré ou la réduction des fibres dans la ration augmentent la densité énergétique alimentaire et par conséquent l'apport énergétique et

la production laitière (Machado et al., 2014 ; Jensen et al., 2014). Néanmoins, une proportion trop élevée de concentrés peut conduire à une production laitière réduite car elle peut entraîner une acidose et une digestibilité réduite des fibres (Broderick, 2003) ainsi qu'un coût alimentaire élevé. La production laitière augmente également lorsque l'apport en protéines alimentaires augmente (Butler, 2000). La supplémentation en matières grasses (oléagineux et les huiles de palme) est aussi utilisée pour augmenter la densité énergétique de la ration, et a souvent un effet positif sur la production laitière (Gowda et al., 2013 ; Strusinska et al., 2016). Cependant, un certain niveau de supplémentation en matières grasses ne doit pas être dépassé pour éviter une réduction de l'ingestion en matière sèche.

En élevage, toutes les vaches reçoivent généralement une ration unique pendant leur lactation alors que leur capacité d'ingestion dépend de plusieurs facteurs décrits précédemment. Bien que les vaches puissent réguler leur apport énergétique pour répondre à leurs besoins énergétiques, nourrir toutes les vaches de la même manière pourrait limiter l'expression de leur potentiel laitier (Bossen et Weisbjerg, 2009). L'alimentation des vaches en fonction du stade de lactation ou plus précisément, individuellement, par exemple en fonction de leur EB, devrait potentiellement augmenter la production laitière. Ainsi, plusieurs stratégies d'alimentation individualisées ont récemment été étudiées ou sont en cours d'évaluation.

La stratégie du taux de substitution des concentrés peut être définie comme la réduction de la consommation de matière sèche fourragère lorsque la consommation de matière sèche des concentrés augmente (Rinne et al, 1999 ; Jensen et al., 2016). Maltz et al. (2013) ont travaillé sur une ration hebdomadaire avec un taux de substitution des concentrés ajusté individuellement à l'auge (ration totale mélangée). D'autres expérimentations ont été fondées sur un seul ajustement par vache, à l'auge, pendant toute

la lactation à la fin de la période de mobilisation (Bossen et al., 2009 ; Alstrup et al., 2015). La production laitière augmente généralement sur le court terme et parfois sur toute la lactation (Bossen et al., 2009 ; Maltz et al., 2013).

Les effets de cette stratégie individualisée, basée sur les besoins individuels, dépendent également de la variable utilisée pour l'ajustement. Avec un ajustement basé sur la réponse de la production laitière, cette dernière a augmenté (André et al., 2007, 2010) ou n'a pas été améliorée par rapport à une stratégie alimentaire classique et unique pour le groupe (Little et al., 2016 ; Purcel et al., 2016). Avec un ajustement basé sur l'EB calculé en début de lactation (Maltz et al., 2013), la production de lait et les composants du lait ont augmenté sans modifier la consommation de matière sèche par rapport à une ration unique pendant toute la lactation.

Les modèles de prédiction peuvent être utiles pour prévoir les conséquences des différentes stratégies de gestion en termes de production et de reproduction. La simulation de la répartition des nutriments à travers les fonctions physiologiques et selon les génotypes a fait l'objet de plusieurs modèles (Dumas et al., 2008 ; Friggens et al., 2013) dans le but de prédire les performances d'un animal et d'aider les éleveurs à prendre les meilleures décisions de gestion. C'est le cas du modèle GARUNS, développé par Martin et Sauvant (2010), qui prend en compte les priorités changeantes d'un animal au cours de sa vie, et à travers des cycles de reproduction répétés. Il a été testé et validé sur des vaches de différentes races et parités (Phuong et al., 2015).

Les challenges concernant la gestion alimentaire et reproductive des vaches laitières sont donc nombreux. Des stratégies d'insémination et d'alimentation se développent pour y répondre ainsi que des modèles afin de prédire les effets de ces stratégies à long terme. Décaler l'insémination sur une période

avec un EB positif semble être bénéfique en termes de production et reproduction. Les vaches hautes productrices semblent capables de maintenir des lactations longues avec une production acceptable sur les dernières semaines. Une stratégie d'alimentation individualisée fondée sur un ajustement régulier du ratio fourrages : concentrés semble également être prometteuse. Ces deux stratégies nécessitent plus d'expérimentations.

2.1.2. Développement de modèles nutritionnels pour les truies

Il est nécessaire de développer et d'améliorer les modèles nutritionnels disponibles pour les truies. Ces modèles, un pour la gestation et l'autre pour la lactation, calculent les besoins nutritionnels journaliers pour chaque truie et chaque jour et peuvent être incorporés dans des équipements d'alimentation sur mesure pour les truies. J'ai participé à leur construction sur la base du modèle InraPorc® en 2017-2018, notamment sur la possibilité d'intégrer des données à l'échelle individuelle et sur la conversion du modèle de gestation d'Excel à Python. J'ai co-encadré le travail effectué sur le modèle des truies en lactation par Raphaël Gauthier lors de son doctorat (2017-2020).

Informations générales sur les deux modèles nutritionnels des truies. Les besoins nutritionnels des truies sont modélisés par une approche factorielle qui permet d'évaluer les besoins des animaux en fonction de l'utilisation des nutriments par les différents compartiments corporels (Figure 5). Cette approche consiste à déterminer pour chaque nutriment (énergie, AA, minéraux) les dépenses liées à l'entretien et à la production. Les dépenses d'entretien résultent de fonctions physiologiques qui permettent à l'animal de rester en vie sans avoir à puiser dans ses réserves. Elles couvrent le métabolisme basal, l'activité physique

modérée et la thermorégulation dans la zone de confort thermique. Les besoins de production sont spécifiques à chaque étape physiologique. Pendant la lactation, les dépenses sont dues à la synthèse et la sécrétion du lait alors que pendant la gestation elles sont causées par le développement de l'utérus et de la mamelle. L'utilisation des nutriments entre les différents compartiments corporels change donc au cours du cycle de reproduction. De plus, les réserves corporelles de la truie jouent un rôle tampon. L'énergie et l'excès de nutriments dans les aliments aident à constituer les réserves corporelles de la truie ; et en cas de déficit, ces réserves sont mobilisées.

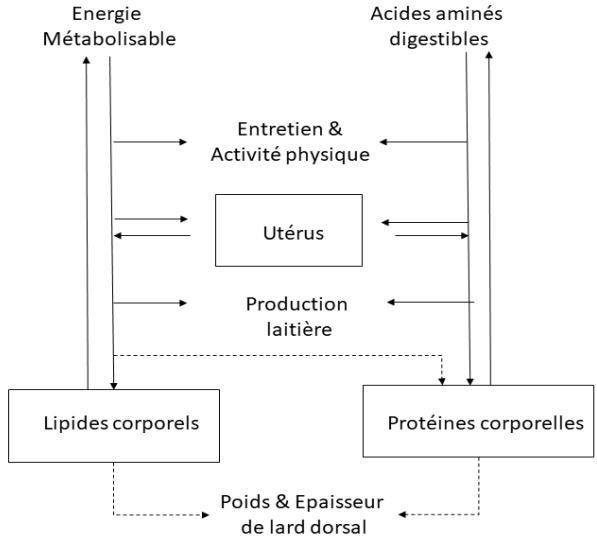

Figure 5 - Schéma fonctionnel des modèles nutritionnels pour les truies [18][16]

Ces modèles prennent en compte les informations disponibles ou estimées pour chaque truie : génotype, rang de portée, prolificité (nombre de porcelets et poids de portée), l'état corporel de la truie (poids et épaisseur de lard dorsal) à différents moments (insémination, mise-bas), l'activité physique

(moyennée et fixe) et le type de logement (individuel ou par groupe). Ces modèles nutritionnels pour les truies en gestation et en lactation sont décrits dans deux publications ([18] et [16] respectivement).

Estimations de paramètres et algorithmes. Certaines informations nécessaires au fonctionnement des modèles ne sont pas disponibles et doivent être estimées. C'est le cas notamment de certains paramètres utilisés dans le modèle truie gestante : l'objectif de poids à atteindre en fin gestation, la taille et le poids de portée sont estimés à partir des données historiques de l'élevage et de certaines caractéristiques individuelles (rang de portée, poids et épaisseur de lard dorsal à l'insémination) [18]. En effet, pendant la gestation, des réserves corporelles suffisantes doivent être établies pour compenser le déficit nutritionnel éventuel qui pourrait survenir pendant la lactation à venir. Toutefois, ces réserves ne doivent pas être excessives afin d'éviter l'apparition de problèmes de mise-bas typiques des truies grasses, ou d'altérer l'ingestion après la mise-bas. Par conséquent, les apports nutritionnels aux truies doivent être adaptés et individualisés en fonction de leur objectif de poids en fin de gestation afin de maintenir des réserves corporelles dans des conditions optimales tout au long de leur vie et d'optimiser leurs performances de reproduction.

Pour les truies en lactation, le modèle nécessite deux informations journalières difficilement mesurables : la production laitière et l'ingestion. En effet, il n'existe pas de système automatique pour mesurer la production laitière d'une truie. En recherche, les porcelets peuvent être pesés avant et après la tétée afin d'estimer la production de lait. En élevage, cette méthode n'est pas applicable car elle est coûteuse, nécessite de la main d'œuvre, du temps, sans forcément être très précise tout en impactant la relation entre la truie et les porcelets au cours de la

mesure et potentiellement la production laitière. Pour l'ingestion, elle varie au cours du temps et entre les truies, alimentées ad libitum. Il est donc indispensable de la prédire afin d'établir la bonne composition de la ration à distribuer le jour suivant. Par conséquent, deux algorithmes ont été développés afin d'estimer le poids de la portée au sevrage, proxy de la production laitière, et l'ingestion journalière de la truie. Ces algorithmes sont présentés dans la thèse de Raphaël Gauthier (2021) et je les ai également présentés à la conférence ASAS-NANP 2021 en tant qu'oratrice invitée (40 minutes de présentation, 20 minutes de questions).

Méthode de prédiction automatique du poids de portée au sevrage, proxy de la production laitière. Pour résumer, les principaux objectifs étaient (1) d'identifier la meilleure stratégie d'apprentissage parmi 4 stratégies définies selon la répartition des données pour la phase d'apprentissage et la phase de prédiction (Figure 6), et (2) d'identifier l'algorithme d'apprentissage supervisé le mieux adapté aux données parmi les 8 algorithmes testés. La base de données utilisée intégrait 23 259 observations provenant de 6 élevages expérimentaux au cours des 20 dernières années. Les 8 algorithmes ont été entraînés à prédire le poids de la portée au sevrage à partir d'un ensemble de 4 attributs numériques (durée de la lactation, taille et poids de portée à la naissance, taille de portée au sevrage) et de 3 attributs catégoriques (identification de la ferme, rang de portée de la truie, mois de naissance). Les meilleures performances pour la prédiction du poids de portée au sevrage ont été obtenues avec un algorithme ensembliste et un apprentissage avec les seules données de l'élevage concerné. Les performances obtenues avec un algorithme de régression linéaire étaient également bonnes.

Cette étude montre donc que les données propres à chaque élevage sont nécessaires pour entraîner avec précision les

algorithmes et faire des prédictions de bonne qualité. Ces prédictions pourraient être utilisées par des systèmes d'aide à la décision afin de développer des approches d'alimentation sur mesure chez les truies en lactation.

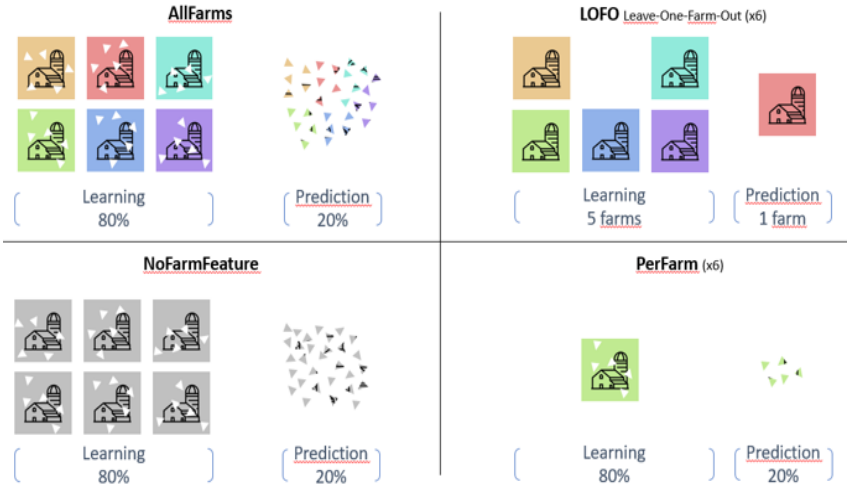

Figure 6 – Quatre stratégies d'apprentissage définies selon la répartition des données pour la phase d'apprentissage (learning) et la phase de prédiction (Gauthier, 2021)

Méthode de prédiction de la consommation alimentaire de la truie en lactation. Cette méthode repose sur des données acquises en temps réel avec un apprentissage « hors ligne » des comportements alimentaires des truies. Une base de données de 39 090 lactations, provenant de 6 exploitations et contenant les consommations des 20 jours suivant la mise-bas, a été utilisée pour (1) identifier par clustering des groupes de truies présentant une trajectoire d'alimentation similaire (partie « hors-ligne ») et (2) tester trois fonctions de prédiction de la consommation quotidienne du jour à venir en fonction : de la consommation du jour précédent seulement (fonction 1), de la consommation du jour précédent et du comportement alimentaire attribué par les clusters (fonction 2), ou de la consommation des deux jours

précédents et du comportement alimentaire attribué par les clusters (fonction 3). L'algorithme de clustering a permis d'identifier deux groupes de truies dont la courbe d'ingestion au cours de la lactation avait une trajectoire similaire (Figure 7). La trajectoire du premier groupe est caractérisée par une augmentation continue de la consommation au cours de la lactation, et la seconde, par un plateau atteint à partir du dixième jour. Les meilleures fonctions de prédiction sont celles qui intègrent les trajectoires d'alimentation (Fonctions 2 et 3).

Bien que la variabilité individuelle soit élevée, les résultats indiquent qu'il n'y a pas beaucoup de comportements alimentaires concernant les truies en lactation (seulement 2 clusters). L'utilisation des trajectoires améliore cependant la prédiction de la consommation. En pratique, l'apprentissage des trajectoires peut être renouvelé régulièrement, et la procédure de prédiction, peu gourmande en puissance de calcul, peut être intégrée dans un système d'alimentation sur mesure.

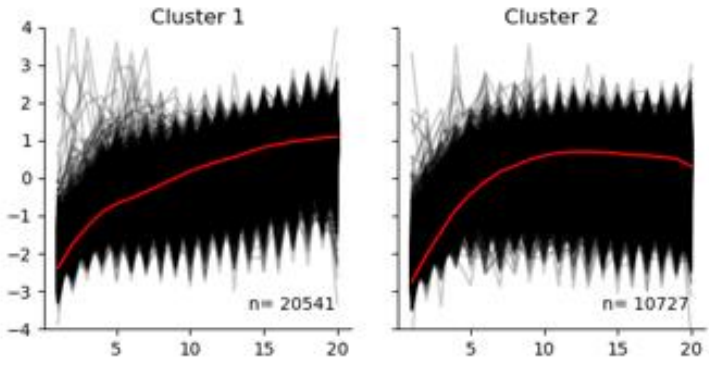

Figure 7 - Clusters établis en fonction des trajectoires d'alimentation des truies en lactation (Gauthier, 2021)

2.1.3. Développement d'un modèle pour les vaches laitières

La prédiction du partage des nutriments, notamment énergétiques, est un enjeu majeur dans la modélisation des performances des vaches laitières. Les proportions d'énergie canalisées vers les fonctions physiologiques (croissance, entretien, gestation et lactation) évoluent au fur et à mesure que l'animal vieillit et se reproduit, et selon son génotype et son environnement nutritionnel.

Description du modèle. Le modèle GARUNS (Martin and Sauvant, 2010) est un modèle dynamique et stochastique qui prend en compte les priorités changeantes d'un animal à mesure qu'il vieillit, à travers des cycles de reproduction consécutifs. Il est composé d'un sous-modèle de régulation et d'un sous-modèle d'exploitation. Le sous-modèle de régulation décrit la répartition des nutriments en fonction des priorités de vie (**G**rowth, **A**geing, balance of body **R**eserves, nutrient supply to the **U**nborn, **N**ewborn and **S**uckling calf - GARUNS) tandis que le sous-modèle d'exploitation décrit, par exemple, les changements de poids vif et la production laitière. Un sous-modèle de reproduction a été ajouté par Phuong et al. (2015) en utilisant la prédiction de la production laitière, l'état corporel et la balance énergétique comme entrées pour simuler les réponses reproductives en termes de taux de gestation et de durée de vie productive (Figure 8). Plus récemment, un module « plan d'alimentation » prenant en compte la composition de la ration distribuée à la vache au cours de sa vie a été ajouté.

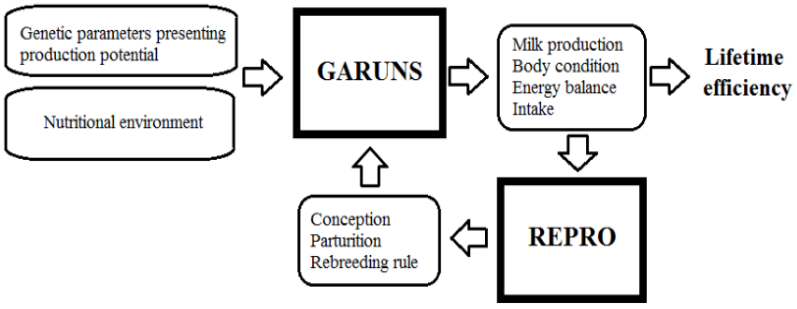

Figure 8 - Représentation schématique du modèle de prédiction de l'efficience des vaches laitières au cours de leur vie (Phuong et al., 2015)

Evaluation du nouveau modèle. Le nouveau modèle, avec le module « plan d'alimentation », a été évalué via une procédure d'ajustement manuelle étape par étape sur des données de lactation de 16 vaches Holstein. Ces données ont été recueillies lors de l'essai expérimental REPROLAC, mené lors de ma thèse au Danish Cattle Center (AU, Danemark). Le jeu de données contient des données de production (ingestion, production laitière, poids, note d'état corporel, composants du lait) et de reproduction (dates d'insémination et de mise-bas) ainsi que la composition des rations. Les résultats préliminaires, présentés à l'EAAP 2021, ont montré que l'ajustement avec le nouveau modèle était plus précis pour les trois variables de production étudiées (ingestion, production laitière, poids) au cours de la première lactation que celui avec le modèle sans module d'alimentation.

Cette première approche souligne la pertinence du module d'alimentation pour améliorer l'ajustement du modèle. Ce modèle doit désormais être testé pour savoir s'il peut servir d'outil de gestion des vaches laitières (reproduction, choix de l'alimentation) et aider à prédire la productivité individuelle de la prochaine lactation.

2.1.4. Constitution de bases de données et étude de la variabilité individuelle

Une fois ces modèles nutritionnels mis en place, la variabilité individuelle des besoins nutritionnels a été évaluée sur différents jeux de données afin d'identifier les facteurs de variation principaux.

Truies en gestation et en lactation. Les deux modèles élaborés pour les truies ont été testés sur deux bases de données canadiennes regroupant 2511 gestations sur 540 truies pour l'une, et 1450 lactations sur 633 truies pour l'autre. Les effets de la semaine de gestation ou de lactation, du rang de portée et de l'élevage sont significatifs sur les besoins journaliers en nutriments des truies et leurs performances (Figure 9, Figure 10). Trois publications synthétisent ces résultats [16] [18] [21]. Ces facteurs (temps, rang de portée et élevage) sont pris en compte dans les modèles de prédiction des besoins nutritionnels.

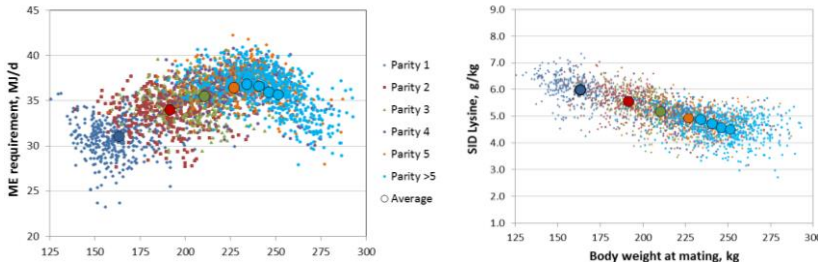

Figure 9 - Variabilité des besoins en énergie (MJ ME /j, à gauche) et en lysine digestible (g/kg, à droite) entre les truies gestantes de différents rangs de portée [18]

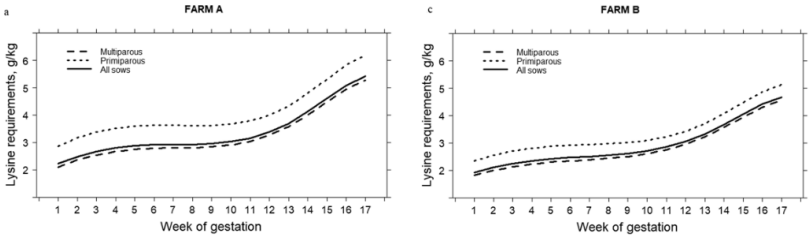

Figure 10 - Evolution des besoins estimés en lysine digestible (en g/kg) pendant la gestation pour deux élevages (A, à gauche, et B, à droite) [21]

Vaches laitières. Des données, acquises pendant la lactation chez la vache laitière (projet REPROLAC, 62 vaches), permettent une analyse de la variabilité individuelle des besoins nutritionnels à travers notamment la production laitière, le poids, la quantité d'aliments ingérée, l'activité physique et l'état énergétique. Les résultats montrent une grande variabilité au cours de la lactation et entre les vaches, même au sein d'une même parité, concernant les variables étudiées et moyennées sur toute la lactation (Figure 11). Ainsi, aux variations journalières des besoins des vaches laitières notamment pour l'entretien et la production laitière, s'ajoutent des variations interindividuelles qu'il faut prendre en compte dans le planning des rations. Les prochaines étapes seront donc de comprendre comment intégrer cette variabilité dans le calcul des rations et quelles seront les réponses des vaches face aux rations proposées. En effet elles n'auront surement pas toutes la même réponse, par exemple, certaines pourront mobiliser plus de réserves que d'autres avec une même ration.

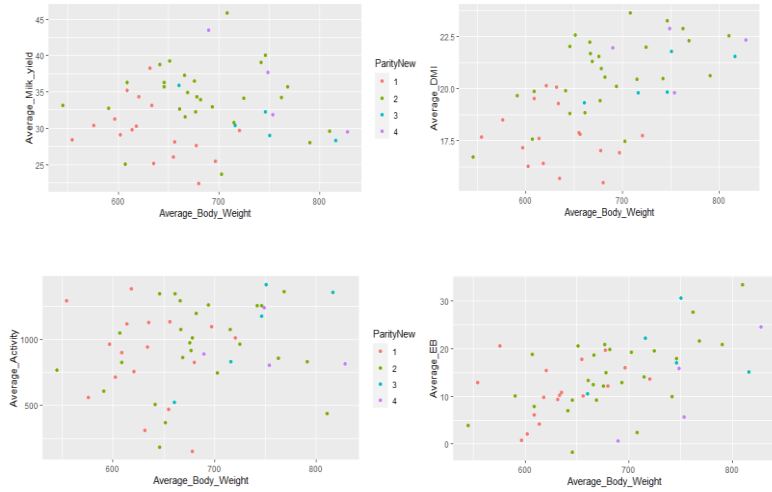

Figure 11 – Production laitière, ingestion de matière sèche, activité physique et état énergétique journaliers moyennés sur toute la lactation pour chaque vache, en fonction de la parité et du poids individuel moyen sur toute la lactation

2.2. Axe 2 - Simulations des effets de l'alimentation de précision sur la productivité et les rejets environnementaux

La variabilité des besoins nutritionnels au cours du temps et entre les animaux pousse à chercher de nouvelles stratégies d'alimentation pour éviter de distribuer une alimentation unique basée sur un animal moyen du groupe. Les modèles mis en place permettent d'évaluer, via des simulations, plusieurs stratégies alimentaires. Cela permettra de sélectionner la meilleure stratégie alimentaire à évaluer expérimentalement.

L'objectif de cet axe est de déterminer le potentiel d'une alimentation sur mesure et ses effets sur les performances de production et éventuellement de reproduction, en utilisant des simulations.

2.2.1. Simulations des effets de stratégies d'alimentation pour les truies

Truies gestantes. Pour réaliser cet objectif, j'ai développé le projet PréciTruie sur le « Développement et évaluation d'outils d'aide à la décision (**OAD**) pour l'alimentation sur mesure de la truie en gestation ou en lactation ».

Dans cette étude, dans un premier temps, nous avons comparé, par simulation, une alimentation sur mesure à une alimentation conventionnelle (teneur fixe en lysine digestible) pour les truies en gestation en s'appuyant sur les bases de données canadiennes du CDPQ (élevage A) décrites précédemment ainsi qu'avec une base de données de l'IFIP (élevage B, en collaboration avec Nathalie Quiniou, ingénieur dans cet institut

technique). L'alimentation sur mesure est simulée en mélangeant, chaque jour et pour chaque truie, deux aliments qui diffèrent par leurs teneurs en nutriments (un aliment riche en lysine et un aliment pauvre en lysine, la lysine étant un acide aminé limitant les performances).

Les résultats publiés dans Journal of Animal Science [21] montrent que pour les truies en gestation, l'alimentation sur mesure permettrait de réduire d'environ 25% l'apport en protéines, de 17% l'excrétion d'azote, de 15% l'excrétion de phosphore et de 5% le coût alimentaire comparativement à l'alimentation conventionnelle. De plus, une proportion plus élevée des truies aurait ainsi ses besoins couverts en fin de gestation, notamment les plus jeunes, alors qu'une proportion plus faible serait suralimentée en début de gestation, notamment parmi les plus âgées (Figure 12).

Un effet de l'élevage a également été observé. En effet, la stratégie d'alimentation sur mesure semble plus efficace pour réduire l'excrétion d'azote et de phosphore dans l'élevage B que dans l'élevage A. Cela est en partie dû au fait que les truies de l'élevage B ont en moyenne des besoins en nutriments inférieurs par kilogramme d'aliment d'où une fréquence plus élevée d'animaux suralimentés dans l'élevage B. Cela souligne l'importance d'ajuster la teneur en nutriments de l'aliment pauvre en lysine en fonction de l'élevage.

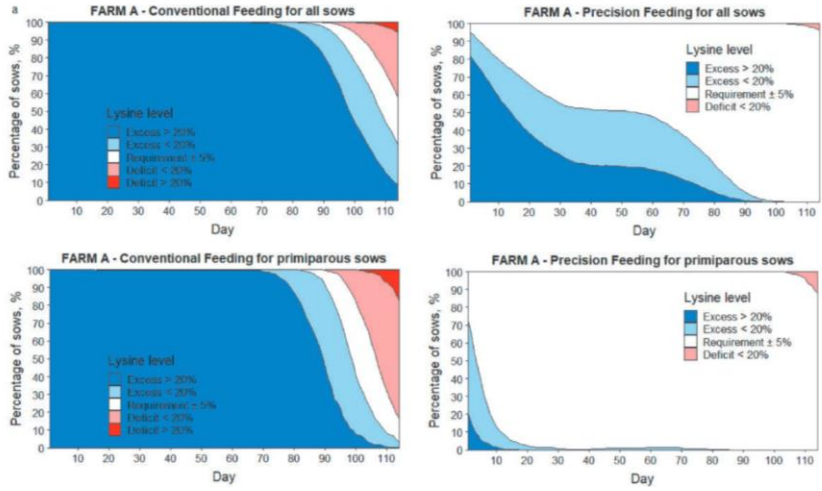

Figure 12 - Estimation de l'influence de stratégies alimentaires (alimentation sur mesure, à droite vs. alimentation conventionnelle, à gauche) sur la proportion de truies recevant un apport de lysine adéquat (blanc), déficitaire (rose et rouge) ou en excès (bleu) pour une ferme donnée (ici données provenant du Canada) tout au long de la gestation [21]

Truies en lactation. Un travail similaire a été réalisé pour les truies en lactation [16]. Une base de données intégrant les informations de deux élevages (617 lactations pour l'un et 833 lactations pour l'autre) a été utilisée pour évaluer l'effet d'une stratégie d'alimentation sur mesure pour des truies en lactation. Les résultats sont similaires à ceux simulés en gestation : les besoins en lysine digestible sont couverts pour une plus grande proportion de truies en alimentation sur mesure comparativement à une alimentation conventionnelle (Figure 13).

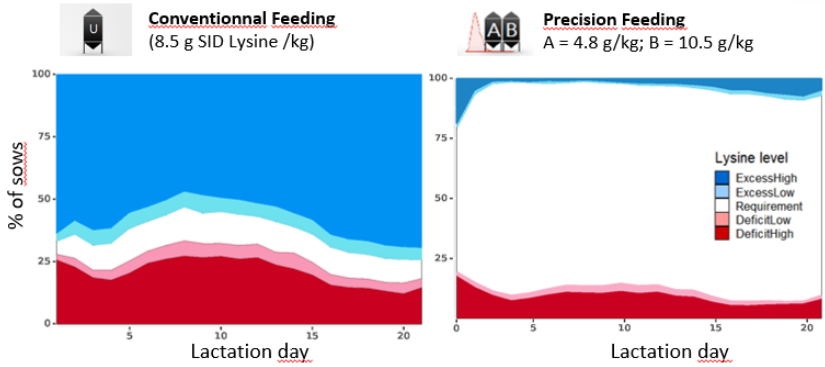

Figure 13 - Pourcentage de truies dont les besoins sont couverts pendant la lactation, avec une alimentation conventionnelle (à gauche) vs. une alimentation sur mesure (à droite)[16]

Ces résultats de simulations sur des truies gestantes et en lactation nous ont encouragé à évaluer en ferme expérimentale les effets d'une stratégie d'alimentation sur mesure. Dans l'axe 3, les résultats de simulations seront comparés aux résultats expérimentaux.

2.2.2. Simulations de scénarios de vie chez les vaches laitières

Pour les vaches laitières, en collaboration avec Olivier Martin (UMR MoSAR), le modèle GARUNS décrit précédemment a dans un premier temps été utilisé et amélioré afin de prédire les performances de production et reproduction de vaches laitières selon la durée des lactations imposée par la date d'insémination. Dans ces scénarios, la durée des lactations imposée tout au long de la vie des vaches pouvait varier entre la première lactation et les suivantes dans le but de déterminer le scénario optimisant les performances.

Dans un premier temps, le modèle a été ajusté aux données de lactations longues de 16 mois de 62 vaches Holstein (projet

REPROLAC). Le modèle réussissait systématiquement à s'ajuster sur les données de poids, la production laitière et les composants du lait de ces vaches (Figure 14), alors que les performances de reproduction étaient surestimées [9].

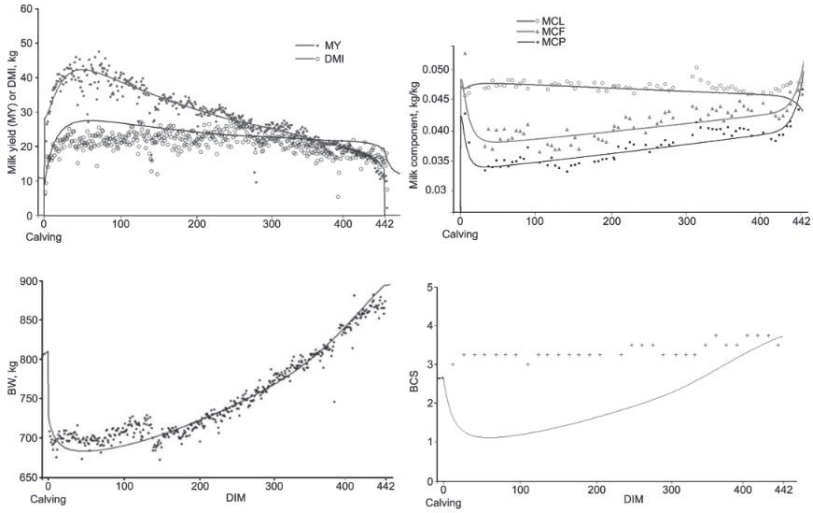

Figure 14 - Ajustement du modèle GARUNS aux données de lactation prolongée (16 mois) collectées sur des vaches Holstein: production laitière et ingestion (MY et DMI, kg), poids (BW, kg), composants du lait (lactose - MCL, lipides - MCF, protéines – MCP, kg/kg), et la note d'état corporel - BCS) [9]

Dans un second temps, différents scénarios de vie pendant lesquels la durée de lactation variait ont été simulés : des lactations consécutives de 10 mois (scénario N-N), des lactations consécutives de 16 mois (scénario EL-EL), une première lactation de 16 mois suivie de lactations de 10 mois (scénario EL-N) ou inversement (scénario N-EL). Egalement des scénarios où les vaches effectuaient des lactations consécutives de 12, 14, 18, 20 ou 22 mois ont été simulés. Les vaches EL-N avaient une efficience au cours de leur vie similaire à celle des vaches EL-EL. Les vaches N-EL avaient quant à elles une efficience au cours de leur vie similaire à celle des vaches N-

N (Figure 15). Les taux de gestation de ces 4 scénarios (N-N, EL-EL, N-EL et EL-N) étaient similaires les uns aux autres.

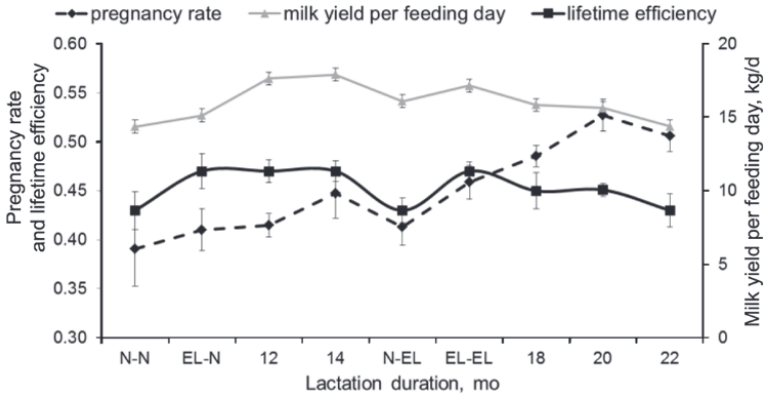

Figure 15 - Prédiction du taux de gestation (%), de l'efficience au cours de la vie des vaches et de la production de lait par jour d'alimentation (rendement total du lait/durée de vie, kg/j) de vaches Holstein effectuant des lactations de durées (mois) différentes au cours de leur vie (NN = lactations de 10 mois pour toute la vie, EL-N = première lactation de 16 mois suivie de lactations de 10 mois, N-EL = première lactation de 10 mois suivie de lactations de 16 mois, EL-EL = lactations de 16 mois pour toute la vie) [9]

Les résultats simulés indiquent que la gestion des vaches primipares avec une lactation prolongée de 16 mois, suivie de lactations de 10 mois, augmente leur efficience au cours de leur vie qui devient similaire aux vaches gérées pour une lactation de 16 mois pendant toute leur vie [9]. Ces résultats démontrent l'utilité d'un tel modèle pour prendre des décisions concernant la gestion du troupeau (par exemple, savoir quand inséminer pour obtenir une lactation plus ou moins longue) afin d'améliorer la production et la durabilité d'un troupeau. Cependant il reste des étapes de validation du modèle à effectuer pour qu'il devienne un vrai outil d'aide à la décision et ainsi être utilisé pour optimiser

les apports nutritionnels pour chaque vache (objectifs des projets WIN Feed, présenté dans l'axe 3 de la partie 2, et HARPAGON, décrit dans la Partie 3). Cette étape permettra d'attribuer à chaque vache une ration ajustée en quantité et/ou composition en fonction de ses caractéristiques (âge, activité) et/ou des prédictions de production faites avec ce modèle. Les simulations futures permettront de tester les effets d'une alimentation sur mesure sur les performances des vaches.

Les simulations permettent de tester les concepts nutritionnels développés et d'évaluer in silico les conséquences sur différentes dimensions de la production. Cependant même si ces simulations permettent de considérer simultanément un grand nombre d'animaux, elles ne permettent pas de rendre compte des variations de l'environnement ni d'observer une gamme étendue de réponses ou d'explorer les déterminants de la variabilité. Des expérimentations sont donc nécessaires afin de valider les résultats de simulations.

2.3. Axe 3 - L'alimentation sur mesure mise en place expérimentalement

Pour les truies, les résultats de simulations comparant différentes stratégies d'alimentation préconisent d'aller vers une alimentation sur mesure, c'est-à-dire individuelle et ajustée chaque jour, afin de réduire les coûts alimentaires, et les rejets environnementaux. Cette stratégie doit désormais être validée expérimentalement. Pour les vaches laitières, le développement du modèle GARUNS, afin qu'il soit utilisé comme outil d'aide à la décision, nécessite l'acquisition de nouvelles données et de connaissances pour comprendre comment une vache réagit à un changement d'alimentation. Ainsi différentes stratégies d'alimentation plus ou moins individualisées se sont mises en place expérimentalement.

L'objectif de cet axe est de développer des outils et de proposer des challenges expérimentaux permettant de confronter expérimentalement les résultats des simulations comparant l'alimentation sur mesure à l'alimentation conventionnelle, et d'élargir la gamme des réponses observées concernant, notamment, le comportement alimentaire.

2.3.1. Résultats d'expérimentations pour les truies

Truies gestantes. Dans le cadre du projet PréciTruie, une expérimentation en truies gestantes a eu lieu à l'élevage expérimental de l'INRAE Saint-Gilles (UE3P, Unité Expérimentale de Physiologie et Phénotypage des Porcs) en 2019-2020. L'objectif était d'évaluer l'impact d'une stratégie d'alimentation sur mesure comparée à une alimentation conventionnelle sur le coût alimentaire et les performances des

truies. Cette expérimentation a nécessité l'acquisition de nouveaux équipements d'alimentation (distributeurs automatiques de concentrés - **DAC**, Figure 16) permettant le pilotage de l'alimentation ainsi que le suivi du comportement alimentaire au cours de la gestation et de la lactation. Ces DAC sont disponibles à l'UE3P depuis février 2019.

Figure 16 – Photographie des DAC utilisés en truies gestantes à l'UE3P Saint-Gilles pour mélanger les deux aliments (B et H) en proportions fixes (alimentation conventionnelle) ou variables (alimentation sur mesure)

Un total de 170 truies gestantes, soit 8 bandes, ont été inclues dans l'expérimentation. Chaque bande était logée dans une salle en sol béton d'environ 8 x 8 m, équipée de deux DAC, et deux abreuvoirs. La moitié des truies gestantes de chaque bande a reçu une alimentation conventionnelle c'est-à-dire un mélange aux proportions fixes : 27% de l'aliment « bas » en lysine (aliment B, 3.3 g lysine digestible /kg) et 73% de l'aliment « haut » en lysine (aliment H, 8.5 g lysine digestible /kg) afin de reconstituer un aliment classique de gestation (4.7 g lysine digestible /kg). L'autre moitié des truies de chaque bande a reçu une alimentation sur mesure c'est à dire un mélange en proportions variables des aliments B et H par truie et par jour. Les truies d'une même bande ont été affectées aux deux stratégies alimentaires selon leur rang de portée (1, 2, 3+), leur poids, et leur épaisseur de lard dorsal. Le poids et l'épaisseur de lard dorsal des truies ont été mesurés à l'entrée en salle de gestation (i.e. 5-6 jours après l'insémination), en milieu de gestation (à environ 9 semaines de gestation), en fin de gestation (à l'entrée en salle de mise-bas), et après la mise-bas. On notera une perte de données (pesées et épaisseurs de lard en milieu de gestation et après mise-bas) sur les deux dernières bandes due à l'arrêt des mesures expérimentales pendant la période covid-19.

Les résultats indiquent que l'alimentation sur mesure permet des réductions d'environ 25% des quantités de lysine ingérées sans diminuer la quantité d'aliment distribuée, d'environ 4% du coût alimentaire par gestation (soit 3.4 € par gestation ou 8 € par tonne d'aliment) et 18.5% et 9% des rejets respectifs en azote et phosphore. Ces chiffres sont en accord avec nos résultats de simulations (Tableau 3).

Tableau 3 - Récapitulatif de comparaison des résultats de simulations aux résultats expérimentaux chez les truies gestantes: effets d'une alimentation sur mesure comparé à une alimentation conventionnelle

	Simulations	Expérimentations
Apport protéique	↘25%	↘25%
Excrétion d'azote	↘17%	↘18%
Excrétion de phosphore	↘15%	↘9%
Coût alimentaire	↘5%	↘4%

Le poids, l'épaisseur de lard dorsal et les performances reproductives ne sont pas affectés par la stratégie alimentaire. Le poids de portée à la naissance est d'environ 23.1 ± 0.84 kg, le nombre total de porcelets de 16.3 ± 0.52, le nombre de porcelets nés vivants de 15.1 ± 0.66 et de porcelets sevrés de 11.1 ± 0.48.

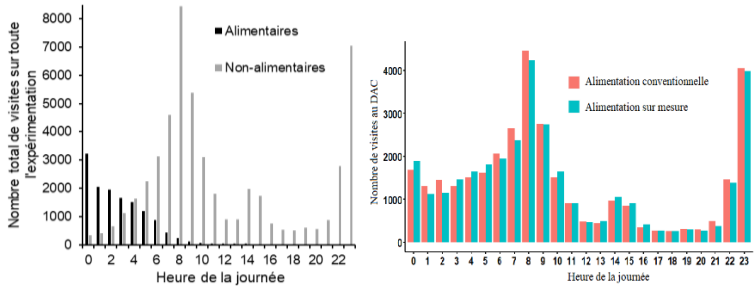

Figure 17 - Répartition horaire a) du nombre de visites alimentaires et non-alimentaires au DAC , b) du nombre de visite en fonction de la stratégie alimentaire, de toutes les truies gestantes du projet PréciTruie [26]

L'alimentation sur mesure n'a pas d'effet sur la fréquence des visites alimentaires, le temps journalier passé au DAC, l'ordre d'accès au DAC ou la préférence potentielle pour un DAC. En revanche, les truies en alimentation sur mesure effectuent plus de

visites non-alimentaires au DAC que les truies en alimentation conventionnelle (Figure 17).

Ce dernier point nécessite plus d'investigations comportementales via des vidéos ou autres capteurs pour en comprendre la cause. En effet, les comportements alimentaires pourraient être liés au niveau d'activité des truies, et donc à leurs besoins énergétiques. Ils pourraient également servir d'indicateurs permettant de détecter des problèmes de santé, comme dans l'étude de Weary et al. (2009) où une réduction des visites non-alimentaires permettait d'identifier des veaux malades. L'utilisation de ces données devra être étudiée pour les truies gestantes, par exemple pour évaluer leur capacité à détecter des blessures aux pattes mais aussi des réponses à différents stress comme le stress thermique. En effet, l'étude de Anderson et al. (2020) a montré que le stress thermique, même de faible intensité, modifiait la durée et la fréquence de l'alimentation. Le lien doit également être exploré entre le comportement alimentaire et l'activité physique car il semble logique que ces deux variables soient positivement corrélées.

Le poids des truies a augmenté pendant la gestation et a atteint 280 kg en moyenne avant la mise-bas, ce qui ne différait pas du poids cible à ce stade ($P = 0,82$). Notre équation de prédiction est donc validée. En revanche, le poids après la mise-bas était plus élevé que celui estimé (260 contre 250 kg respectivement, $P = 0,01$). L'épaisseur de lard dorsal a augmentée au cours de la gestation et a atteint en moyenne 20,1 mm à la mise-bas, ce qui est supérieur à l'objectif de 19 mm retenu pour la détermination des besoins alimentaires ($P < 0,01$).

Il n'y avait pas de différence significative entre les poids de portée estimés et les poids mesurés (22,8 vs 23,1 kg, respectivement, $P = 0,41$), ni entre le nombre estimé et mesuré de

porcelets vivants (15,0 vs 15,1 porcelets vivants par portée, respectivement, P = 0,78). Nos équations de prédiction sont donc validées.

Les premiers résultats sur les différences de comportement alimentaire entre les truies en alimentation sur mesure et celles en alimentation conventionnelle ont été communiqués à l'EAAP 2020 et aux JRP 2021. Un article contenant l'ensemble des résultats de cette expérimentation a été soumis à Animal Feed Science and Technology (Corrections mineures à ce jour) [26].

Truies en lactation. Pour les truies en lactation, deux essais similaires ont été conduits dans le cadre de la thèse de Raphaël Gauthier. Le premier en élevage commercial, en collaboration avec le groupe Cérès Inc. (Québec, Canada) et le second en élevage expérimental, à l'UE3P.

Les résultats du premier essai indiquent que l'alimentation sur mesure a permis une réduction de l'ingestion de lysine de 23%, du coût alimentaire de 10% par lactation, de l'ingestion et excrétion d'azote de 20 et 28% respectivement, et de l'ingestion et excrétion de phosphore de 19 et 42% respectivement.

Il n'y avait pas de différences d'épaisseur de lard dorsal entre les truies des différentes stratégies, par contre les truies en alimentation sur mesure ont perdu légèrement plus de poids que les truies en alimentation conventionnelle, même si cette perte reste faible (respectivement -7.7 vs. -2.1 kg au cours de la lactation).

Les performances de reproduction après sevrage n'ont pas été affectées par la stratégie alimentaire. En moyenne la croissance de la portée était élevée (environ 3 kg/j) mais un peu plus faible d'environ 3% pour les truies en alimentation sur

mesure. Cela est en partie dû à une sous-estimation de la croissance de portée entraînant un apport d'acides aminés insuffisant.

2.3.2. Résultats d'expérimentations pour les vaches laitières

Pour la partie expérimentale chez les vaches laitières, trois projets permettent d'évaluer l'intérêt d'une alimentation sur mesure. Les projets REPROLAC et Win Feed, respectivement terminé et en cours, sont présentés dans cet axe. Le projet HARPAGON qui débutera en 2022 sera présenté comme perspective de travail dans la partie 3. Ces projets visent également à évaluer et faire évoluer le modèle GARUNS afin qu'il devienne un outil d'aide à la décision permettant de guider l'éleveur dans ses choix de gestion du troupeau (date d'insémination, choix de la stratégie alimentaire).

Ajustement de la ration pendant la période de mobilisation. Un des objectifs du projet REPROLAC était de déterminer si une stratégie d'alimentation sur mesure améliorait les performances de production et reproduction des vaches laitières. Un total de 62 vaches Holstein a été intégré à l'expérimentation à partir du vêlage et jusqu'à la fin de leur lactation. La moitié de ces vaches a reçu une alimentation avec un niveau énergétique standard (ratio de fourrages :concentrés de 60 :40, ration LD) pendant toute la lactation (groupe LD-LD). L'autre moitié des vaches (groupe HD-LD) a reçu une alimentation enrichie en énergie (ratio 50 :50, ration HD) en début de lactation, jusqu'à la fin de la période de mobilisation déterminée individuellement lorsque le gain de poids était positif ou nul pendant 5 jours (et une fois les 42 premiers jours de

lactation passés). Une fois cette période de mobilisation terminée, les vaches HD-LD ont reçu la ration standard LD (Figure 18).

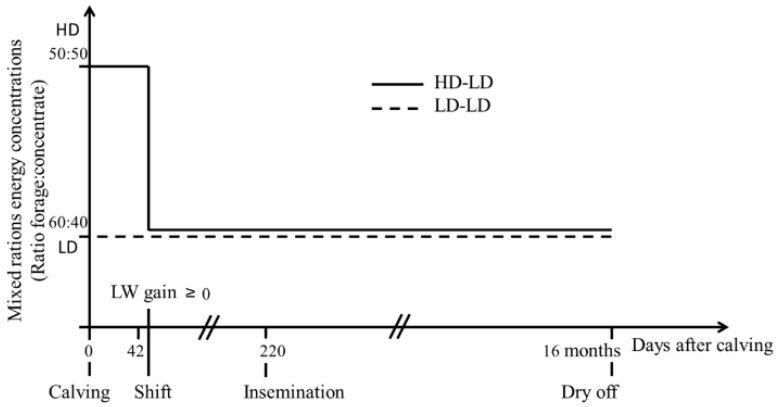

Figure 18 – Schéma des deux stratégies d'alimentation du projet REPROLAC : la stratégie HD-LD enrichie en énergie en début de lactation et la stratégie LD-LD avec un ratio fourrages :concentrés constant et modéré pendant toute la lactation

Cette distribution d'une ration enrichie en énergie en début de lactation (stratégie HD-LD) devait permettre de combler une partie du déficit énergétique observé en début de lactation et ainsi favoriser la productivité et les performances de reproduction des vaches. Toutes les vaches ont été inséminées autour de 220 jours dans l'objectif d'obtenir des lactations longues de 16 mois. Les données de production (ingestion, poids, production laitière, composition du lait) ont été lissées en utilisant la même méthode pour toutes les variables (package fda sur R) afin de calculer facilement et en tous points les dérivées des courbes (pentes des courbes). La dérivée de la courbe de lait représente la persistance de la lactation, une information intéressante qui permettrait de classer les animaux selon leurs potentiels et éventuellement de les gérer différemment (date de vêlage, alimentation).

En général, la stratégie alimentaire n'a eu que peu ou pas d'effet sur les variables de production : seules les vaches multipares HD-LD ont produit légèrement plus de lait en début de lactation (entre 0-42 jours) que les vaches LD-LD. Cependant, à partir de 300 jours de lactation, l'apport d'énergie supplémentaire en début de lactation a impacté négativement la persistance de la lactation c'est-à-dire que les vaches HD-LD ont produit moins de lait que les vaches LD-LD en fin de lactation (Figure 19). Tous les résultats de production sont publiés dans un article [5].

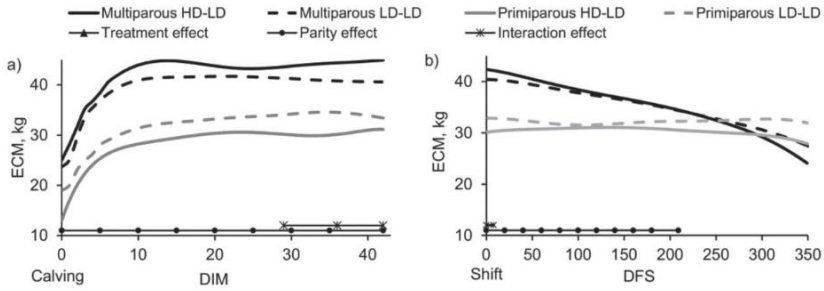

Figure 19 – Courbes lissées des productions laitières (ECM = « energy corrected milk », en kg) des primipares et multipares nourries avec les stratégies LD-LD et HD-LD, a) au début de la lactation de 0 à 42 jours après vêlage (DIM = days in milk) et b) après les changements de ration des vaches HD-LD (DFS = « days from shift », nouvelle échelle de temps à partir du changement de ration) [5]

D'un point de vue reproductif, la stratégie alimentaire ou simplement le niveau de perte de poids en début de lactation n'ont pas eu d'effet sur les succès à l'insémination, l'expression du comportement de monte, ou les intervalles entre œstrus [6]. Par contre, en retardant l'insémination pour obtenir des lactations longues de 16 mois, plus de vaches ont exprimé un comportement de monte à l'œstrus 8 (œstrus d'insémination pour une lactation

de 16 mois) comparé à l'œstrus 2 (œstrus d'insémination pour une lactation de 10 mois), ce qui facilite la détection du moment d'insémination et pourrait améliorer les performances de reproduction si cette gestion était utilisée sur un plus grand troupeau.

Cette stratégie alimentaire n'est donc pas concluante pour des vaches gérées en lactations longues car leur persistance après 300 jours sera diminuée. Néanmoins, pour des vaches gérées en lactations habituelles de 10 mois et notamment les multipares cette stratégie peut être bénéfique car en début de lactation elle améliore la production laitière et l'état énergétique des vaches, sans impacter les performances reproductives. Elle peut également être améliorée notamment car nos régimes alimentaires HD et LD n'étaient finalement pas si différents en terme de densité énergétique (10% de différence prévue, mais au final seulement 4% de différence). Avec un panel de rations aux teneurs énergétiques différentes, cet ajustement énergétique pourrait également être effectué plusieurs fois tout au long de la lactation, selon des caractéristiques individuelles à définir. C'est l'idée du projet présenté ci-après.

Ajustement hebdomadaire et individuel de la ration. Ces dernières années, plusieurs stratégies alimentaires ont été évaluées afin de réduire la balance énergétique des vaches laitières en début de lactation et de permettre à la vache d'exprimer son potentiel laitier. L'ajustement du ratio fourrages:concentrés à l'auge, souvent sous la forme d'une ration enrichie en énergie (plus de concentrés) en début de lactation suivie d'une ration moins riche en énergie une fois la période de mobilisation terminée, semble être une stratégie prometteuse pour augmenter la production laitière des multipares. Cependant certaines études ont rapporté que les effets d'une telle stratégie dépendent également de la variable utilisée pour l'ajustement du

ratio. Avec un ajustement fondé sur la réponse de la production laitière, celle-ci est souvent équivalente ou seulement un peu plus élevée comparé à la production laitière de vaches nourries avec une ration unique. Avec un ajustement fondé sur le bilan énergétique calculé en début de lactation, la production de lait et les composants du lait augmentent sans modifier l'apport en matière sèche par rapport à une ration unique pendant la lactation. Cette deuxième approche semble donc plus prometteuse, et le poids peut représenter un bon indicateur de la balance énergétique, facilement mesurable. De plus, l'individualisation de cette stratégie à l'échelle de la semaine permettrait de gagner en précision et d'apporter à chaque vache la bonne proportion de concentrés dont elle a besoin.

L'objectif du projet WIN Feed qui a débuté en septembre 2021 à l'Installation Expérimentale de Production Laitière (IEPL, Le Rheu) est donc de démontrer la faisabilité et l'intérêt d'une alimentation sur mesure, ajustée individuellement et chaque semaine, pour des vaches laitières. L'étude permettra d'obtenir des références sur l'impact d'une alimentation sur mesure sur les performances des vaches laitières en comparaison à une alimentation unique pendant toute la lactation. Ces données serviront de plus à alimenter et améliorer le modèle GARUNS.

Au total, 40 vaches laitières multipares, en 2ème ou 3ème lactation, sont intégrées à l'expérimentation dès le vêlage et jusqu'à la fin de leur 4ème mois de lactation. La moitié des vaches reçoit une ration de base (75% d'ensilage de maïs, 5.5% de luzerne déshydratée, 18% de tourteau de soja, et 1.5% de compléments minéraux et vitamines) à volonté ainsi que 3 kg d'un concentré dit d'ajustement (groupe contrôle). L'autre moitié des vaches reçoit une alimentation sur mesure avec la ration de base à volonté ainsi qu'une quantité de concentré d'ajustement entre 0 kg et 6 kg par jour selon le gain ou la perte de poids

hebdomadaire de chaque animal. Ce concentré contient des teneurs en unités fourragères lait (**UFL**), matières azotées (**MAT**) et protéines digestibles dans l'intestin (**PDI**) similaires à la ration de base et est constitué de 20% de blé, 10% de maïs, 36% d'orge, 2% de mélasse de canne, 18% de luzerne déshydratée, et 14% de tourteau de colza.

Le poids et la production laitière sont automatiquement enregistrés pour chaque vache lors de ses deux passages journaliers en salle de traite. Une notation manuelle de la note d'état corporel est réalisée une fois par mois par 2 notateurs. Les distributions et les refus d'aliments journaliers et individuels sont enregistrés afin de calculer la quantité ingérée. Des prélèvements de sang sont réalisés le mardi matin juste avant la distribution de la ration pour les 40 vaches. Lors de la première semaine post vêlage, 3 prises de sang sont réalisées aux jours J+1, J+3 et J+5 après vêlage. Une fois l'expérimentation terminée, des analyses sur les plasmas seront réalisées pour mesurer les métabolites sanguins en lien avec le métabolisme énergétique (acides gras non estérifiés - **NEFA**, glucose, urée, betahydroxybutyrate - **BHBA**). L'expérimentation a nécessité l'acquisition de capteurs d'activité (colliers DELAVAL) pour mesurer l'activité physique en continu de chaque vache, une variable qui peut influencer les besoins en énergie des vaches. La collecte et l'analyse de ces données nous permettront d'intégrer cette variable au modèle GARUNS. Une fois l'expérimentation terminée, l'ensemble des résultats sera publié dans une revue internationale et présenté à l'EAAP.

2.4. Axe 4 - Amélioration des modèles nutritionnels et stratégies d'alimentation

La prise en compte de la variabilité individuelle lors de l'alimentation d'un groupe de truies permet de réduire les coûts d'alimentation et d'améliorer l'efficience des animaux. L'évaluation de cette stratégie d'alimentation chez les vaches laitières est en cours. Dans les deux cas, cette stratégie d'alimentation sur mesure est basée sur 1) des modèles nutritionnels, capables de prédire les besoins nutritionnels individuels quotidiens ; 2) des automates, capables de livrer des rations individuelles et 3) des nouvelles technologies telles que les capteurs qui fournissent des informations en temps réel sur la performance animale et les conditions de vie qui devraient être intégrées dans l'estimation des besoins. Jusqu'à présent, seules les données de production (poids corporel, épaisseur de lard dorsal) ont été intégrées dans le calcul des besoins individuels en nutriments.

L'objectif de cet axe est d'améliorer la précision des modèles d'alimentation sur mesure actuels en intégrant notamment les effets de variables descriptives de l'environnement, du comportement et de la santé des animaux ; et également d'améliorer les stratégies d'alimentation en prenant en compte de nouvelles ressources alternatives.

2.4.1. Intégrer des mesures environnementales et comportementales dans les modèles

Synthèses bibliographiques complémentaires. Les connaissances actuelles sur l'effet de l'environnement et du comportement sur les besoins nutritionnels et les quantités ingérées des truies gestantes sont résumées dans une synthèse

bibliographique publiée en 2021 dans Animal Feed Science and Technology [22].

En effet, l'état de santé, l'activité physique, le comportement social et l'emplacement dans la salle de gestation, peuvent influencer les besoins en nutriments. Un changement dans le comportement d'alimentation ou de boisson peut également indiquer un problème de santé ou de bien-être. Des capteurs, des automates et des caméras disposés dans les élevages sont désormais capables de détecter certaines maladies ou blessures, et d'enregistrer de nombreux comportements. Par conséquent, les besoins en nutriments peuvent et doivent être ajustés en fonction de ces paramètres de santé et de comportement.

Des facteurs environnementaux tels que les conditions thermiques, le type de logement et le niveau de bruit ont également été signalés comme affectant les besoins en nutriments. Des capteurs peuvent être facilement installés à la ferme pour enregistrer ces paramètres à intégrer également dans le modèle nutritionnel afin d'en améliorer sa précision. De plus, grâce à la mise en place d'un système d'aide à la décision permettant l'ajustement des rations en fonction notamment de ces paramètres comportementaux et environnementaux, des alertes et des actions correctives (ventilation, livraison de paille, ajustement de la ration) pourraient être déclenchées automatiquement afin de résoudre des changements de comportement ou des problèmes de santé détectés.

Le challenge est donc double. Dans un premier temps il s'agira de collecter assez de données pour évaluer précisément les impacts de ces nouveaux indicateurs sur les besoins nutritionnels et de comprendre la variabilité individuelle de ces réponses. Dans un deuxième temps ces informations devront être intégrées dans les modèles nutritionnels (Figure 20).

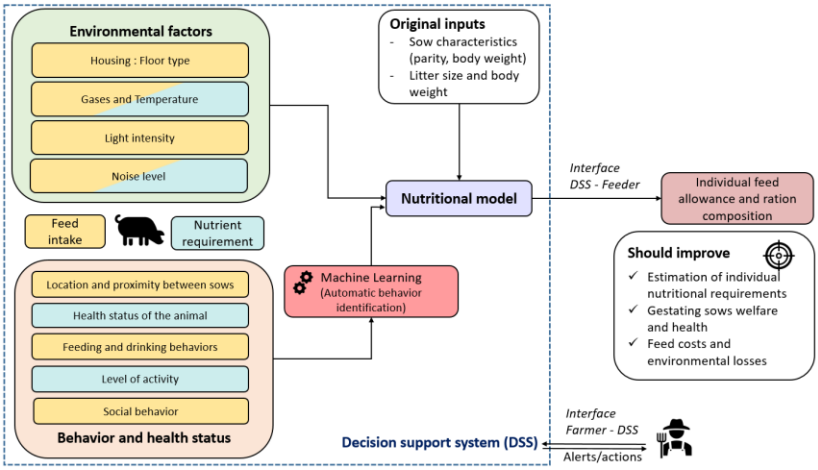

Figure 20 – Résumé graphique de la synthèse sur les effets de l'environnement et du comportement animal sur les besoins nutritionnels des truies gestantes : améliorations futures de l'alimentation de précision [22]

Une synthèse similaire rapportant les effets de l'effet de l'environnement et du comportement sur les besoins nutritionnels et les quantités ingérées des vaches laitières est en cours de rédaction.

Développement du projet SOWELL en truies gestantes. Comme identifié dans la synthèse bibliographique décrite précédemment [22], les modèles nutritionnels développés et utilisés pour l'alimentation sur mesure incluent des données de production mais doivent désormais intégrer des mesures comportementales, comme l'activité journalière des truies, et environnementales. Mais pour l'instant, concernant ces nouvelles variables il y a peu de données individuelles disponibles pour quantifier l'effet de ces variables sur les besoins nutritionnels et développer des équations à intégrer aux modèles. Ainsi, en étroite collaboration avec Jean-Yves Dourmad (INRAE, SYSPORC) et Christine Largouët (IRISA Rennes) j'ai développé le projet

SOWELL (2020-2023). Les objectifs de ce projet sont (1) d'améliorer le modèle nutritionnel en truies gestantes en collectant à haut débit des données de comportement (notamment l'activité physique) et de production sur des groupes de truies gestantes ; et (2) de développer un dispositif d'élevage innovant mettant en place en temps réel des alertes et actions correctrices, comme l'adaptation du milieu d'élevage ou de l'alimentation, pour éviter l'apparition de dérives néfastes au bien-être et à la santé des truies.

Afin de collecter des données, 5 expérimentations sur 4 bandes de truies (environ 20 truies par bande) ont eu lieu selon un protocole expérimental visant à définir la situation basale (sans facteur stressant ou maladie) de bien-être et de santé de chaque truie, et à caractériser des situations de stress. Pour chaque bande, la mise en groupe en début de gestation constitue un premier évènement stressant pendant lequel se met en place la hiérarchie. Ensuite, pour 2 bandes, un test de compétition alimentaire a été réalisé en début et en milieu de gestation en bloquant l'accès à un des deux DAC de chaque salle pendant 5 jours. Chaque semaine de test était précédée d'une semaine dite « basale » c'est-à-dire sans élément perturbateur inhabituel. Ces mêmes bandes de truies ont également été suivies lors d'un stress auditif consistant en l'émission aléatoires de bruits variés, courts, inférieurs à 85 dB, toutes les 10 minutes pendant 4 heures consécutives deux fois par jour (une fois l'après-midi considéré comme la période de repos et une fois la nuit, qui correspond à la période d'alimentation) pendant 3 jours consécutifs. Ce test a été répété deux fois, en début et en milieu de gestation et chaque session de test était précédée d'une semaine basale. Les deux autres bandes de truies ont été soumises à deux autres tests, un test de modification du milieu et un test de stress thermique. Le test de modification du milieu consistait en une semaine d'enrichissement du milieu via l'apport de cordes, de sacs, et d'une brosse dans la salle ; et une

semaine d'appauvrissement du milieu (pas de jouets ni de paille). Le test de stress thermique consistait en une semaine de stress chaud (activation de chauffages disposés dans la salle afin de faire monter la température) et une semaine de stress froid (ventilation et fenêtres ouvertes pendant une période hivernale). Dans les deux cas, chaque semaine de test était précédée d'une semaine basale.

Pendant ces tests, toutes les truies ont reçu une alimentation sur mesure comme celle décrite dans le projet PréciTruie. Les truies étaient équipées d'accéléromètres (boucles fixées aux oreilles) qui permettent de mesurer l'activité de chaque animal et son comportement (debout, couché, assis, en déplacement). Le suivi par vidéo, associé à l'intelligence artificielle, permettra de renseigner ces mêmes informations sur l'activité physique dans la perspective de mesurer automatiquement les interactions sociales et l'occupation de l'espace (travail en cours). L'acquisition de données sur la température et l'humidité de la salle s'effectuait simplement grâce à des capteurs disposés à différents endroits dans les salles de gestation. Les consommations individuelles d'aliments et d'eau ainsi que les comportements associés à ces consommations (nombre de visites au DAC ou à l'abreuvoir, temps passé à boire ou manger) ont été enregistrés automatiquement grâce aux DAC et aux abreuvoirs connectés. Ainsi, au cours de la journée, ces capteurs et automates ont fourni une multitude de données. Les poids, épaisseurs de lard, problèmes de santé et états corporels (griffures, lésions, propretés, boiteries) ont été enregistrés manuellement chaque semaine. La mobilisation de ces différentes données devrait permettre, à l'aide de méthodes de fouille de données et d'apprentissage, d'identifier les principaux indicateurs du bien-être et de la santé des truies élevées en groupe, et de mettre en évidence leurs effets sur les besoins nutritionnels. Ces nouveaux indicateurs pourront ensuite être intégrés dans les modèles nutritionnels et ainsi améliorer la

précision de l'alimentation de chaque animal pour chaque situation.

Pour compléter l'achat de matériel (caméras thermiques, capteurs de qualité d'air…) et financer les frais expérimentaux, le projet a obtenu une Aide à l'Installation Scientifique (AIS) de Rennes Métropole en plus de frais de fonctionnement de la part de #DIGITAG. En parallèle, un co-financement de thèse #DIGITAG-INRAE PHASE, m'a permis de recruter une doctorante en suivant le protocole de l'école doctorale EGAAL. Cette thèse que j'encadre a débuté au 1er octobre 2020 et s'effectue en étroite collaboration avec la société DILEPIX (35) pour le développement d'un logiciel d'analyse automatique de vidéos, de l'IRISA (Christine Largouët) en ce qui concerne la fouille de données et l'intégration des données de comportement au modèle nutritionnel et du CDPQ (Canada, Laetitia Cloutier) pour la collecte de données et le partage de connaissances.

Premières avancées du projet SOWELL. Les premiers résultats expérimentaux du projet SOWELL ont été présentés à l'EAAP 2021 (3 présentations orales) et font l'objet de 5 résumés pour les JRP 2022 (4 posters et articles de deux pages, et 1 présentation orale avec un article de 6 pages) présentés par plusieurs stagiaires de Master 1 et 2 sous ma direction (financées par #DIGITAG ou INRAE), deux doctorantes et moi-même. De nombreuses heures de vidéos ont été analysées manuellement en attendant le développement (en cours) d'un outil d'analyse vidéo automatique.

Un premier travail a été effectué afin de caractériser la hiérarchie au sein des groupes de truies gestantes et de la relier aux données de comportement alimentaire (enregistrées par les DAC), et aux indicateurs zootechniques (poids, parité). Les résultats montrent que la hiérarchie est stable au sein d'une bande

sur une gestation, et quasiment linéaire et transitive c'est-à-dire que si un individu A domine un individu B et que B domine C, alors A domine C. La hiérarchie est fortement corrélée à l'ordre de passage au DAC (R^2 = 0.68, P < 0.01) anti-corrélée au poids en sortie de gestation (R^2 = -0.66, P < 0.01) et à la parité (R^2 = -0.75, P < 0.01). En revanche, la hiérarchie n'impacte pas le temps passé ou le nombre de visites au DAC. Ces résultats montrent que l'on peut finalement utiliser l'ordre au DAC comme indicateur hiérarchique, et non plus analyser des comportements individuels via des vidéos afin de déterminer la hiérarchie. Connaître l'ordre hiérarchique et le suivre est intéressant car il pourrait représenter un indicateur de santé (potentielle modification de l'ordre si un animal est malade).

L'impact de la compétition alimentaire (fermeture d'un DAC) sur l'activité et le comportement social des truies gestantes a été évalué sur une répétition du test en début de gestation. Le comportement des truies a été impacté par la compétition alimentaire. Au cours des 36 premières heures de la semaine de test (fermeture du DAC pendant 5 jours), le nombre de visites non-alimentaires au DAC a diminué par rapport à la semaine précédente dite « basale », avec les deux DAC ouverts (2,3 vs. 4,7 visites par jour, P < 0,01). Le nombre de visites alimentaires (en moyenne 1,1 visite par jour) n'a pas été affecté par le nombre de DAC disponibles, ce qui est surtout lié au fait que les truies sont rationnées et restreintes. Pendant la semaine de test, les truies attendaient plus longtemps devant le DAC que pendant la semaine basale (98,5 vs 40,1 minutes respectivement, P < 0,01). Malgré le nombre accru d'interactions sociales négatives (coups de tête, morsures, P < 0,01) au cours de la semaine de test, le nombre de lésions cutanées n'était pas différent de celui de la semaine basale. Ces résultats montrent que les truies étaient plus actives et exprimaient plus d'interactions sociales négatives lors du test de compétition alimentaire, entraînant une augmentation

d'environ 5 % de leurs besoins énergétiques. Le nombre de truies par DAC est donc un paramètre important à considérer pour améliorer le bien-être des truies gestantes et calculer leurs besoins énergétiques. Pour cette expérimentation, il reste à analyser les vidéos de la deuxième répétition (milieu de gestation) et à poursuivre les analyses de la première répétition (3.5 jours restants) pour voir s'il y a une évolution des variables étudiées au cours du temps. Analyser une deuxième semaine basale sera également un bon indicateur de stabilité des comportements individuels. L'ensemble des résultats seront présentés dans un article.

Concernant le test de stress auditif, le but de cette étude était de déterminer si des bruits soudains inférieurs à 85 dB affectaient le comportement des truies gestantes, sachant que la législation reconnaît l'impact de bruits supérieurs à 85 dB et recommande donc de les éviter. Les résultats préliminaires incluent des données de 11 truies gestantes observées l'après-midi de 13h00 à 18h00 (période de repos) et la nuit de 23h00 à 04h00 (période d'alimentation), au cours d'une journée avec (journée test) ou sans bruits diffusés (journée basale). Le comportement individuel a été analysé manuellement via un enregistrement vidéo pour identifier en continu la localisation de la truie dans la pièce (5 zones), sa posture (assise, couchée, debout, en marche) et son occupation (dormir, explorer, manger, observer). Le temps passé dans les différentes zones et le nombre de changements de zones n'a pas été affecté par les bruits diffusés, seulement par la période. Les truies ont passé plus de temps assises et moins de temps debout pendant la journée test par rapport à la journée basale ($P = 0,04$). Pendant la période de repos, le nombre de changements de posture a augmenté pendant la journée test par rapport à la journée basale (26 vs. 15 changements, $P = 0,02$). Le temps passé à explorer a diminué pendant la journée test par rapport à la journée basale (-20 min), tandis que le temps d'observation a augmenté

(+16 min, Figure 21). Le nombre de changements d'occupation n'a pas été affecté par les bruits mais était plus élevé pendant la période d'alimentation par rapport à la période de repos. Ces émissions de bruits brefs et soudains inférieurs à 85 dB peuvent donc affecter la posture et l'occupation des truies gestantes, ce qui pourrait avoir un impact supplémentaire sur leurs besoins en nutriments. Une enquête plus approfondie devrait être menée pour quantifier cet effet potentiel. Au printemps 2022, deux étudiantes en master éthologie, Université de Rennes 1, poursuivront l'analyse des vidéos sur plus de truies et de jours d'observation. L'ensemble des résultats seront présentés dans un article.

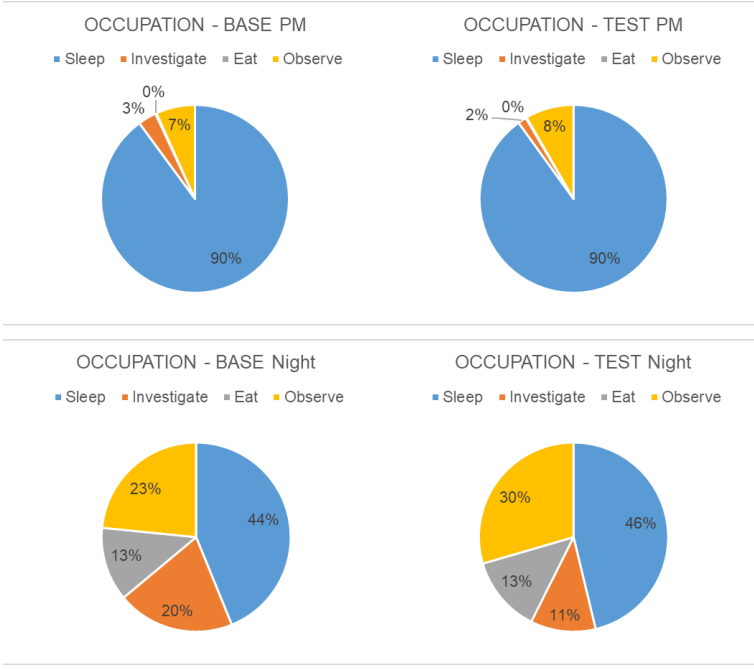

Figure 21 – Test de stress auditif - Répartition des activités (dort, explore, mange, observe) selon la journée (base ou test) et la période (PM ou Nuit) - EAAP 2021

L'objectif de l'expérimentation sur la modification du milieu était de quantifier les effets d'un milieu enrichi en objets (Figure 22) et d'un milieu appauvri (sans objet, sans paille) sur les différents comportements des truies gestantes (activité physique, exploration, interactions sociales) pour éventuellement mieux ajuster la quantité d'aliment distribuée quotidiennement et individuellement. Le comportement de 28 truies gestantes multipares a été suivi par analyse vidéo manuelle pendant une semaine basale (sans objet mais avec la paille habituelle) puis pendant une semaine test (paille habituelle et présence d'une brosse, de cordes et de sacs en toile de jute) sur deux périodes de 5 h (PM : de 13h30 à 18h30 ; Nuit : 23h00 à 04h00) les lundis et mercredis. Les truies ont passé 1,0 % (PM) et 2,1 % (nuit) de leur temps à explorer les objets, avec une grande variabilité entre les individus (minimum à 0 minute et maximum à 15,2 minutes). La présence d'enrichissement n'a pas influencé l'activité physique et n'a donc pas eu d'impact sur les besoins énergétiques. Toutefois, les truies ont effectué moins de visites non-alimentaires au DAC pendant la semaine test que pendant la semaine basale (4,6 ± 2,8 vs 5,3 ± 3,4, respectivement ; $P < 0,01$) et ont eu moins d'interactions sociales négatives (4,6 ± 5,9 vs 6,5 ± 6,0, respectivement). L'enrichissement avec des objets a donc amélioré le bien-être des truies mais a eu peu d'influence sur leur activité physique et leurs besoins énergétiques. Ce dernier résultat est probablement dû en partie à cause de la présence de paille pendant les deux semaines étudiées, ce qui a pu satisfaire l'expression des besoins exploratoires et favoriser l'activité de la truie même en semaine basale. L'étude de la semaine d'appauvrissement (sans paille) est en cours d'analyse et apportera des réponses à notre hypothèse sur l'effet de la présence de la paille. L'ensemble des résultats seront présentés dans un article.

Figure 22 – Test d'enrichissement - Les différents objets (brosse, cordes et sacs) utilisés pour enrichir le milieu des truies gestantes en semaine test

Un des objectifs de l'expérimentation de stress thermique était de quantifier les effets de contraintes thermiques induites sur le comportement et les besoins énergétiques des truies gestantes. Pendant 4 semaines consécutives et 3 jours par semaine, la température de la salle de gestation a été maintenue à différentes températures : une semaine de référence à 18,7°C (pas de stress), une semaine à 15,3°C (stress froid), encore une semaine de référence (non analysée pour le moment) et enfin une semaine à 31,5°C (stress chaud). Les comportements (interactions sociales, exploration) et l'activité physique (truie couchée, assise, debout, piétine, marche) de 15 truies multipares ont été enregistrés à partir de vidéos sur des périodes de 5 h la nuit (23h00-4h00, période d'alimentation) et l'après-midi (13h00 -16h30, période de repos). Les deux stress thermiques n'ont pas influencé le temps passé par activité ($P = 0,78$) ou les comportements alimentaires ($P = 0,19$). Par contre le nombre de truies blotties ensemble et les comportements agressifs ont augmenté pendant le stress froid, tandis que le stress chaud favorisait l'isolement. Ces changements de comportement des truies pourraient aider à détecter l'inconfort thermique et ajuster la température de la salle et/ou les besoins nutritionnels des truies en conséquence. L'analyse du comportement des primipares ainsi que d'une autre bande de

truies est en cours. L'ensemble des résultats seront présentés dans un article en cours de rédaction.

Toujours dans le cadre de l'expérimentation sur le stress thermique et dans une optique de recherche d'innovation, des mesures de températures via une caméra thermique ont également été prises (Figure 23) sur les deux bandes de truies concernées (40 truies dont 8 primipares). La température centrale du corps est généralement utilisée comme indicateur pour détecter des problèmes de santé ou de thermorégulation. En été, les truies peuvent faire face à un stress thermique, avec des impacts négatifs sur leur bien-être et leurs performances. En pratique, la température du corps est évaluée à l'aide d'un thermomètre rectal, mais cette méthode peut être stressante pour l'animal, avec des effets ultérieurs possibles sur la qualité de la mesure. La caméra thermique représente une alternative non invasive pour mesurer la température des animaux. Le but de cette étude était de comparer les températures corporelles des truies gestantes mesurées avec un thermomètre rectal et avec une caméra thermique dans différentes situations ambiantes (14°C à 32°C). Avec une caméra thermique (modèle FLIR, E60 ; logiciel d'extraction FLIRTOOL) les températures ont été prises sur une coupe dorsale cutanée rasée (superficie d'environ 2 × 12 cm). Les truies primipares avaient une température rectale plus élevée que les truies multipares (38,3 vs 37,9 ± 0,61°C, $P = 0,007$). La température rectale était corrélée positivement avec la température ambiante (coefficient de corrélation $R^2 = 0,34$, $P < 0,001$) et négativement avec le poids corporel de la truie ($R^2 = 0,38$, $P < 0,001$). Les truies couchées avaient une température infrarouge plus élevée que les truies debout (35,3 vs 31,8 ± 3,19°C, $P < 0,001$). La température infrarouge était positivement corrélée avec la température ambiante ($R^2 = 0,77$, $P < 0,001$) et les températures rectales ($R^2 = 0,48$, $P < 0,001$). Ces résultats préliminaires montrent qu'il existe une relation à explorer entre

les températures corporelles rectales et infrarouges de la truie. Peu de facteurs semblent influencer ces températures et par conséquent, ils devraient être pris en compte dans la prochaine étape de ce travail visant à développer un modèle de prédiction de la température rectale à partir de la température infrarouge et d'autres mesures non invasives. Des températures rectales et infrarouges prises à différents moments de la gestation sur une bande de 130 truies au CDPQ viendront compléter cette étude.

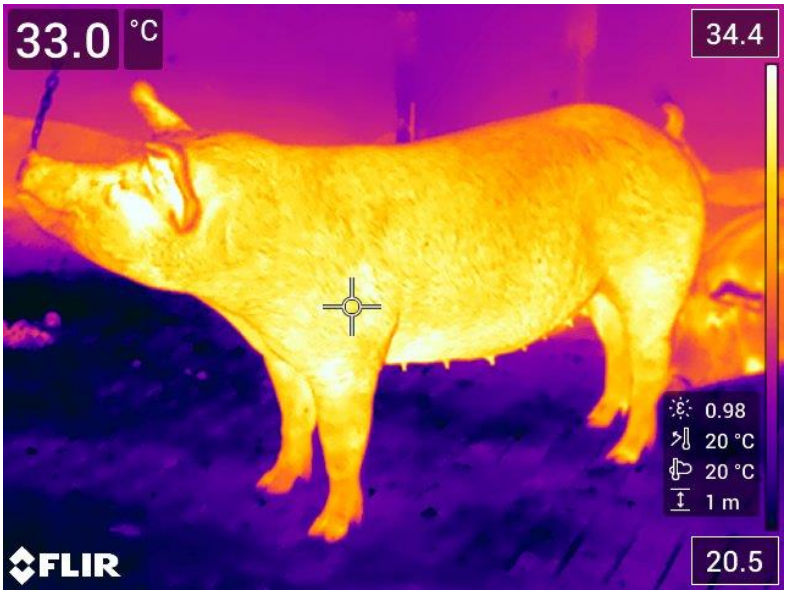

Figure 23 – Photo d'une truie prise avec une caméra thermique

Enfin, un travail sur les données collectées lors du projet SOWELL avait pour but de déterminer si un dysfonctionnement technique dans la salle de gestation pouvait être détecté à partir des données individuelles d'abreuvement. La base de données analysées intègre 52 truies gestantes soumises aux tests de stress thermique et de compétition alimentaire. Les variables étudiées sont le volume d'eau bue (L/j/truie), la fréquence d'abreuvement (nombre de visites/j) et la durée d'abreuvement (min/j). Ces

données ont été lissées en utilisant le package « fda » sur le logiciel R qui utilise des fonctions de base B-Spline. Cette méthode ne nécessite pas d'hypothèses sur la forme de la courbe et le degré de lissage peut être ajusté en appliquant des pénalités sur la ou les dérivées des fonctions. Une pénalité forte égale à 100 a été appliquée à la courbe lissée dite « théorique » (sans perturbations) et une pénalité faible de 10 à la courbe « perturbée » se rapprochant des variations d'abreuvement. La détection des perturbations potentielles au cours du temps (différence entre les deux courbes lissées, exemple de la Figure 24) a été automatisée puis ces perturbations potentielles ont été mises en relation avec les évènements de stress induits. Les premiers résultats ont montré que les truies gestantes buvaient en moyenne 8,8 L d'eau/jour, à une fréquence de 14,5 visites/jour et pour une durée globale de 9,5 minutes/jour. La fréquence d'abreuvement est la variable qui a été retenue du fait de la visualisation d'une tendance nette d'évolution au cours du temps comparativement aux deux autres variables, ce qui facilitera la détection des perturbations. Une à quatre perturbations par gestation ont été détectées par les méthodes de lissage. Les analyses de spécificité ont mis en évidence que la méthode de détection d'événements était spécifique à plus de 95 % et donc capable de détecter presque tous les vrais individus négatifs. Cependant la sensibilité était très faible (9,4%). En conclusion, à ce stade, bien que peu de dysfonctionnements techniques ont pu être détectés à partir des seuls enregistrements d'abreuvement, la méthode retient notre intérêt. Elle doit cependant être plus précise et pourrait pour cela être appliquée simultanément à plusieurs variables, par exemple aux données d'abreuvement couplées aux données d'activité physique. Le recoupement potentiel des perturbations détectées sur les deux variables permettrait de gagner en précision. Cela fera l'objet d'un stage de Master 2 en 2023 financé par #DIGITAG.

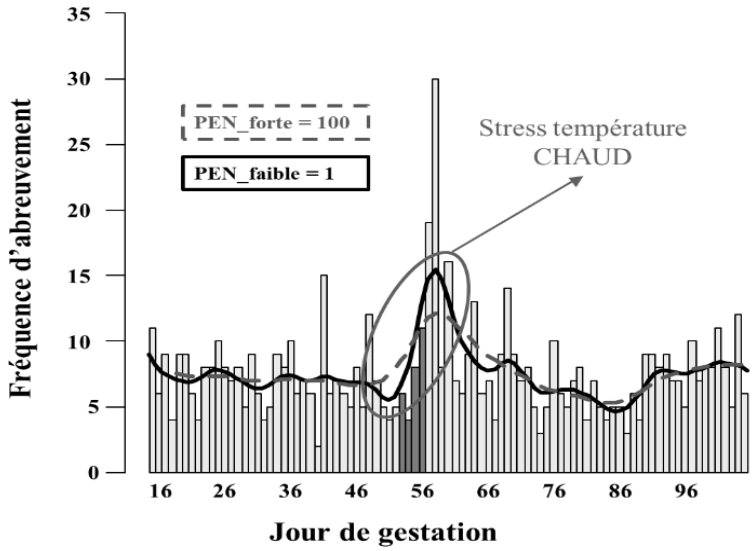

Figure 24 - Exemple de détection d'une perturbation sur le profil de fréquence d'abreuvement par jour d'une truie, révélatrice d'un stress thermique (PEN = Pénalité de lissage), d'après Nizzi et al. (2022)

Pour les truies, les premiers résultats du projet SOWELL sont encourageants et poussent à poursuivre cette quête de nouvelles variables ou d'indicateurs à intégrer aux modèles nutritionnels afin de préciser leurs estimations. Ils permettront également de mettre en place un système de suivi automatisé du bien-être individuel intégrant des alertes pour les éleveurs. Cela devrait permettre une amélioration du bien-être et de la santé des truies en réduisant notamment l'utilisation d'antibiotiques et les frais vétérinaires si ces alertes permettent de détecter précocement certains problèmes de santé. Pour les vaches laitières, les indicateurs comportementaux peuvent également servir d'indicateurs de bien-être, mais souvent, ce sont les biomarqueurs du lait ou du sang qui permettront une évaluation plus fine et plus précoce de l'état de santé de l'animal.

2.4.2. Intégrer des biomarqueurs dans le pilotage de l'alimentation de précision

Ainsi, toujours afin d'améliorer la précision des modèles nutritionnels et le bien-être animal, certains métabolites ou plus généralement certains biomarqueurs souvent mesurés ou facilement mesurables chez les vaches laitières pourraient être intéressants à prendre en compte. Par exemple, certains métabolites sanguins peuvent donner des informations sur l'état énergétique de l'animal et être complémentaires des pesées et notes d'état corporel, ou d'autres pourraient être des indicateurs de l'état de santé de la mamelle et permettre par exemple de caractériser la persistance de la lactation. Ces nouvelles informations seules ou couplées à d'autres données permettraient de catégoriser les animaux afin de les mieux les gérer que ce soit en termes d'alimentation ou de date d'insémination par exemple.

Métabolites indicateurs du métabolisme énergétique. Au cours du projet REPROLAC, j'ai fait des prises de sang hebdomadaires puis toutes les deux semaines à partir de la 12ème semaine de lactation jusqu'à la 36ème semaine sur chacune des 62 vaches laitières en lactation. L'objectif était d'examiner comment une stratégie d'alimentation individualisée fondée sur le gain de poids (voir description précédente de la stratégie HD-LD) affectait les indicateurs plasmatiques du statut énergétique. L'hypothèse était qu'un régime enrichi en énergie pendant la période de mobilisation (définie par une perte de poids) permettrait de réduire l'intensité du bilan énergétique négatif.

En effet, la littérature rapporte que la composition de l'aliment affecte la quantité, l'absorption et l'allocation des nutriments à la glande mammaire tandis que l'activité métabolique régule la synthèse du lait. Les modifications de la production laitière, de l'ingestion et de l'EB se sont avérées être

associées à des modifications caractéristiques des concentrations plasmatiques de métabolites. Ces changements dans les concentrations plasmatiques de métabolites fournissent des informations sur l'état métabolique de la vache et peuvent être utilisés pour déterminer la quantité de nutriments extraite par la glande mammaire au cours de la lactation. Lors de l'augmentation de l'énergie dans la ration, par exemple en remplaçant le fourrage par du concentré, plus de propionate est produit, conduisant à un pH plus bas du rumen. Lorsque des régimes riches en énergie sont donnés en début de lactation, la glycémie augmente tandis que les concentrations en BHBA et NEFA diminuent.

Les résultats expérimentaux de REPROLAC vont dans ce sens. Pendant la période de mobilisation, les vaches HD-LD avaient des concentrations de glucose plus élevées et des concentrations de BHBA et NEFA plus faibles que les vaches LD-LD. La semaine suivant la fin de la période de mobilisation et donc le changement de régime alimentaire pour les vaches HD-LD, ces dernières ont eu besoin d'un temps d'adaptation au nouveau régime alimentaire. En effet, pour compenser la baisse d'énergie apportée par la ration, les vaches HD-LD ont relancé leur mobilisation indiqué par l'augmentation des concentrations plasmatiques de BHBA et NEFA, et la diminution de celle du glucose, atteignant des concentrations similaires aux vaches LD-LD (Figure 25). Les résultats sont disponibles dans une publication dans le journal Animal [3].

Quelques semaines après la période de mobilisation et jusqu'à 36 semaines après le vêlage, la concentration en NEFA était plus élevée chez les vaches HD-LD que chez les vaches LD-LD. L'insuline et le facteur de croissance analogue à l'insuline (**IGF-1**) n'ont pas été affectés par la stratégie d'alimentation. En conclusion, en début de lactation, l'alimentation enrichie en énergie a réduit le bilan énergétique négatif. L'étude de la

concentration plasmatique en NEFA après la période de mobilisation indique un effet à long terme du régime HD distribué en début de lactation sur le métabolisme de fin de lactation. De plus les résultats confirment que le gain de poids est fortement lié au bilan énergétique en début de lactation et en milieu de lactation. Néanmoins, le gain de poids n'a pas permis de détecter de petits changements d'énergie induits par les régimes alimentaires. Dans ce cas, les métabolites tels que le BHBA et le NEFA sont de meilleurs indicateurs du bilan énergétique. Ces deux métabolites pourraient donc être intéressants à considérer et à mesurer ponctuellement afin de mieux connaitre le statut énergétique des vaches et ainsi d'adapter leurs rations.

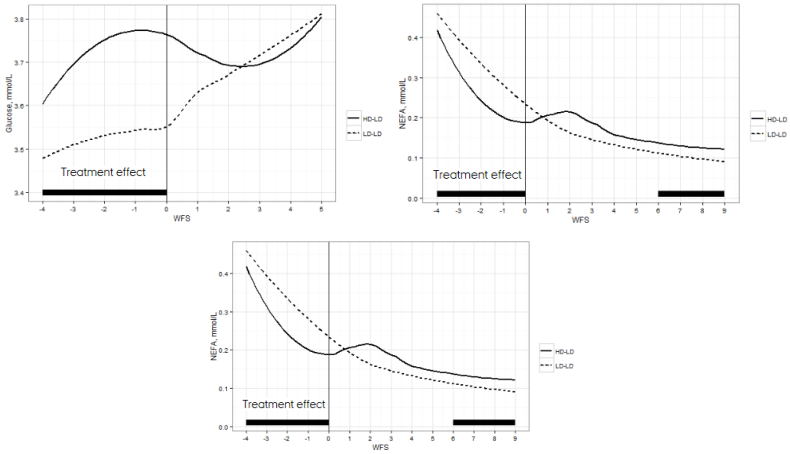

Figure 25 – Concentrations de glucose, NEFA et BHBA en fonction de la fin de période de mobilisation (WFS = 0) pour les vaches nourries avec la stratégie HD-LD et LD-LD. L'effet de la stratégie alimentaire (« treatment effect ») est indiqué par des barres noires horizontales quand il est significatif (P < 0.05)

Toujours en quête de biomarqueurs permettant de caractériser rapidement et à moindre coût l'état énergétique de l'animal, au cours de mon postdoc à AU, j'ai participé au projet européen GplusE. J'ai notamment travaillé sur un jeu de données

de 234 vaches laitières provenant de 6 troupeaux de différents pays et contenant des variables de production, des métabolites sanguins (NEFA, BHBA, glucose, IGF-1), et de nombreux métabolites et enzymes du lait [19]. L'objectif général était de d'évaluer l'utilisation de trois jeux de données de biomarqueurs du lait, facilement mesurables comparés aux métabolites sanguins, pour l'identification des vaches en déséquilibre physiologique et donc à risque de développer des maladies métaboliques ou infectieuses. L'EB de chaque vache a été calculé : c'est la différence quotidienne entre l'entrée et la sortie d'énergie, donc ce calcul a nécessité des données d'ingestion, de poids, de production laitière et de composition du lait. Un index de déséquilibre physiologique (**PI**) a été calculé à partir des données de NEFA, BHBA et glucose plasmatiques. Trois groupes différenciant le statut métabolique des vaches ont été créés sur la base des concentrations de glucose, BHBA, NEFA et IGF-1 en appliquant une méthode de clustering. Ces trois groupes métaboliques ont été interprétés comme des vaches en équilibre physiologique, en déséquilibre physiologique ou avec un état physiologique intermédiaire. Les forêts aléatoires ont été utilisées pour prédire l'EB, le PI et les 3 groupes métaboliques identifiés via la méthode de clustering à partir de données de biomarqueurs du lait. Les résultats ont montré que ni EB ni PI n'ont été suffisamment bien prédits pour être utilisés comme outils de gestion pour l'identification des vaches à risque. Par contre deux jeux de données de biomarqueurs du lait (l'un contenant 8 métabolites et 2 enzymes, et l'autre des spectres de transformation de Fourier du lait mid-IR) ont prédit l'état physiologique des vaches avec une précision jugée acceptable (de 0.51 (0.37−0.65) à 0.68 (0.53−0.81)). Néanmoins, ce niveau de précision doit être amélioré et les algorithmes de prédiction doivent être validés sur un ensemble de données extérieures.

Ces deux études montrent l'intérêt et le potentiel des biomarqueurs, du lait et du sang, comme indicateurs de l'état énergétique de la vache laitière. Dans les deux cas, les méthodes d'analyse de ces données et le choix des biomarqueurs à utiliser seuls ou à plusieurs restent à préciser ainsi que la fréquence des prélèvements pour un objectif pratique à faible coût.

Indicateurs de la santé de la mamelle et de la persistance de la lactation. Parmi les possibles indicateurs précoces du statut physiologique et/ou sanitaire et/ou nutritionnel des animaux, la teneur en lactose dans le lait (**TL**) mobilise aujourd'hui l'attention des organismes de conseil en élevages laitiers. Facile à analyser (lait échantillonné durant la traite, dosage rapide et peu coûteux), il pourrait être un indicateur de l'état de santé de la mamelle et de la persistance de la lactation. Intégrer le taux de lactose du lait dans les outils de pilotage de l'alimentation nécessite une bonne compréhension de ses variations physiologiques ou induites par les conditions d'élevage. La quantité et la variabilité du TL résultent d'un ensemble de plusieurs processus dont l'intégrité de l'épithélium mammaire. L'épithélium mammaire n'est pas totalement imperméable avec la présence systématique de lactose dans le sang mesurée sous forme de lactosémie (**LS**) qui semble également être influencée par plusieurs facteurs. Il a été démontré que les stratégies d'alimentation influencent la persistance de la lactation mais, à ce jour, la variabilité interindividuelle de la persistance de la lactation n'a jamais été caractérisée par la LS ou le TL.

Par conséquent, les objectifs de ce projet étaient (1) de décrire l'évolution de LS et TL dans le temps, les facteurs affectant ces variables et leurs liens avec d'autres variables de production, et (2) de déterminer si LS et TL peuvent servir d'indicateurs de la santé de la mamelle et de persistance de la lactation. Ce projet a été financé par l'INRAE (Appel à

investissements et projets sur fonds budgétaires communs 2020), et mené en collaboration avec Jocelyne Flament et Marion Boutinaud (équipe Lactation, PEGASE), et l'université d'Aarhus (Danemark). Les 1615 échantillons sanguins de ma thèse (projet REPROLAC) ont été rapatriés du Danemark afin d'analyser la LS. Les données de production (ingestion, poids, production laitière et composition du lait dont le TL) ainsi que les concentrations plasmatiques des métabolites précédemment analysés ont constitué notre base de données. La persistance de la lactation a été calculée pour chaque vache de plusieurs façons : soit la pente de la courbe de production laitière, soit en fonction de sa production laitière en début et sur une période donnée de la lactation (milieu ou fin de lactation). Les vaches ont ensuite été catégorisées selon leur persistance (faible, modérée, élevée).

Les résultats préliminaires indiquent que la semaine de lactation et la stratégie alimentaire ont un effet sur TL et LS. Globalement TL augmente au début de la lactation, puis se stabilise après la semaine 3 pour finalement décroître légèrement en fin de lactation. Pour LS c'est l'inverse, elle décroît fortement en début de lactation (3-4 premières semaines) pour finalement se stabiliser à de faibles valeurs avant l'insémination vers 240 jours. En moyenne, le TL et la LS sont généralement plus élevés pour les vaches HD-LD que les vaches LD-LD. La parité n'a d'effet que sur le TL des primipares ayant des valeurs plus élevées que les multipares. Pour ces deux indicateurs, la variabilité entre les individus est élevée. Concernant l'utilisation de ces indicateurs pour estimer la santé de la mamelle (définie ici par le taux de cellules dans le lait), les corrélations entre le TL ou la LS et le taux de cellules dans le lait sont significatives en semaine 3 (semaine d'intérêt pour prendre des décisions) mais faibles (R^2 autour de 0.35). Concernant l'utilisation de ces indicateurs pour estimer la persistance de la lactation, en semaine 3 de lactation, la corrélation entre le TL et la persistance est significative mais

faible (R^2 autour de 0.45) et entre la LS et la persistance elle est non significative et faible (R^2 proche de 0). Le TL ou la LS seuls ne représentent donc pas de bons indicateurs de santé de la mamelle ou de persistance de la lactation.

Cependant, pour aller plus loin dans la réflexion, un corrélogramme réalisé à la semaine 3 de lactation a mis en évidence des corrélations intéressantes entre les persistances et certaines variables de production (production laitière, poids) ou métabolites (glucose, BHBA). Une ou plusieurs de ces variables pourrai(en)t ainsi être couplé(es) afin de gagner en précision dans la prédiction de la persistance. Une méthode de clustering similaire à celle du projet GplusE a donc été appliquée sur des duos ou des trinômes de variables afin d'obtenir 3 clusters. Ces clusters ont ensuite été comparés (calculs de la spécificité, sensibilité et précision) avec les groupes de persistance établis précédemment. Lorsque deux variables sont inclues pour faire les clusters, la précision moyenne de prédiction du groupe de persistance pour chaque vache est de 48,2% (min 42,3%, max 55,8%), la spécificité de 48,8% (min 37,2%, max 51,9%) et la sensibilité de 51,3% (min 40,2%, max 63,6%).

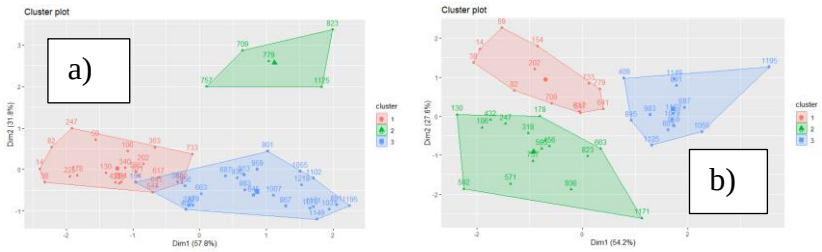

Figure 26 – Exemples de sorties graphiques de la méthode de clustering, avec a) LS + la production laitière, et b) le poids + TL + le glucose. Visuellement, l'objectif est d'avoir des groupes distincts, les plus espacés possibles les uns des autres, ici b) est donc meilleur que a).

La combinaison d'indicateurs avec la plus grande précision est le LS combiné à la production laitière (Figure 24), et le poids combiné la production laitière, tous deux ayant également la spécificité la plus élevée (51,9%) et une sensibilité de 51,5 et 53,8% respectivement. Lorsque 3 variables sont inclues pour exécuter le clustering, il n'y a aucune différence concernant la spécificité ou la sensibilité entre les 3 clusters. En moyenne, la précision du clustering est de 51,6% (min 27,5%, max 62,5%), avec une spécificité de 50,5% (min 42,5%, max 54,2%) et une sensibilité de 53,8% (min 20,4%, max 68,6%). Les trinômes avec les précisions et spécificités les plus élevés sont le poids combiné au TL et glucose (Figure 26), et le poids combiné au TL et production laitière, avec des sensibilités de 62,5% et 59,4% respectivement. Dans l'ensemble cette méthode a du potentiel mais sa précision est encore trop faible. En tous cas, la LS ne semble pas apporter beaucoup d'informations. Une publication regroupant ces résultats sera bientôt soumise à Journal of Dairy Science [30].

Suivant les résultats de cette section, certains biomarqueurs tels le glucose, NEFA, BHBA, apportent des informations complémentaires aux mesures de routine (poids, ingestion, production laitière) sur l'état énergétique de l'animal qui peuvent être intéressantes pour améliorer la gestion de l'animal (alimentation, reproduction). Par contre, prédire la persistance reste encore difficile, il faudrait peut-être travailler à l'échelle de la vie de l'animal et explorer la variabilité de la persistance entre les lactations. Ainsi, il serait peut-être plus évident de prédire la persistance des troisièmes lactations (et suivantes) en se basant sur les données des premières ou deuxièmes lactations.

Intégrer des biomarqueurs sanguins dans les modèles d'alimentation pose également le problème de la récurrence des prélèvements. Les prises de sang nécessitent de la main d'œuvre

et prennent du temps également pour l'analyse en laboratoire et ne sont donc envisageables que ponctuellement. Ainsi, il reste à définir le « meilleur » moment pour les faire, en fonction des objectifs de l'élevage.

En élevage porcin, l'étude des biomarqueurs laitiers ou sanguins ne semble pas appropriée car il n'y a pas de traite comme pour les vaches (c'est-à-dire pas d'échantillons de lait), et les prises de sang sont beaucoup plus difficiles à prendre, avec une contention de l'animal plus poussée que pour les vaches ce qui entraine un stress et peut donc facilement biaiser les résultats.

2.4.3. Utilisation de ressources alternatives

Au cours de mon postdoc à AU, j'ai travaillé sur 3 projets portant sur la recherche d'aliments alternatifs pour les vaches laitières : le glycérol comme substitut de l'orge, les drèches de distilleries séchées avec solubles comme substitut du soja et les algues comme source protéique. Dans un premier temps, les effets de ces aliments alternatifs sur la production, et les quantités optimales à intégrer aux rations ont été évalués. Dans un second temps, l'objectif sera de poursuivre ces analyses et de pouvoir intégrer ces aliments dans les élevages commerciaux, et dans nos modèles d'alimentation.

Le glycérol est un sous-produit de la production de biodiesel. Environ 0,92 kg de glycérol brut est produit pour 10 L de biodiesel. L'utilisation du glycérol dans l'alimentation du bétail, en particulier des ruminants, n'est pas nouvelle, car le glycérol peut être converti en glucose par le foie et les reins et fournit de l'énergie pour le métabolisme cellulaire. L'intérêt pour le glycérol en tant qu'aliment pour le bétail a été renouvelé en raison de sa disponibilité accrue et de son prix réduit, ce qui le rend approprié comme source d'alimentation animale. Cependant, au moment de

mon postdoctorat, la plupart des autres études se focalisaient sur le remplacement du maïs par le glycérol, alors qu'une seule étude rapportait des résultats expérimentaux avec le glycérol remplaçant l'orge (céréale typique dans l'alimentation des vaches du nord de l'UE). Mais cette étude ne précise pas la quantité optimale à substituer ainsi que ses effets sur la composition ou la qualité sensorielle du lait. Cela est important car des études antérieures ont trouvé des saveurs désagréables dans le lait lors de l'ajout de sous-produits dans la ration des vaches. Par conséquent, l'objectif de cette étude était de déterminer jusqu'à quelle proportion le glycérol peut remplacer l'orge, comme source d'énergie alimentaire, dans l'alimentation des vaches laitières en milieu ou en fin de lactation dans un système avec un robot de traite automatique, sans affecter la production de lait, la composition et qualité sensorielle du lait. Quarante vaches Holstein ont été utilisées dans un carré latin de 4 × 4. Le glycérol a substitué l'orge de 0% (Gly0), 6% (Gly6), 12% (Gly12) et 18% (Gly18) de la matière sèche (**MS**) de la ration partielle distribuée à l'auge (**PMR**). L'ingestion de PMR a augmenté de près de 1 kg de Gly0 à Gly12, et a diminué d'environ 1 kg de Gly12 à Gly18. La consommation de concentré au robot de traite avait tendance à diminuer d'un demi-kg de Gly0 à Gly6. La production laitière diminuait alors que la teneur en matières grasses et en protéines du lait augmentait avec l'augmentation de la proportion de glycérol dans l'alimentation. Par conséquent, le rendement du lait corrigé pour l'énergie (**ECM**) n'a pas été affecté par le glycérol intégré dans la ration jusqu'à 12%, mais a chuté lorsque le glycérol a atteint 18% de la ration. Globalement, le glycérol, en tant qu'aliment énergétique, peut remplacer l'orge jusqu'à 18% de MS de la ration pour les vaches laitières en milieu ou en fin de lactation sans affecter la qualité du lait. Cependant, inclure plus de 12% de glycérol alimentaire pourrait diminuer la production de lait. Les résultats sont disponibles dans une publication dans Livestock Science [13].

En plus d’une certaine pression liée à une compétition alimentaire entre l’homme et l’animal (concernant, par exemple, l’utilisation des céréales), il existe des préoccupations sociétales et une réglementation stricte concernant l'excrétion d'azote par les vaches laitières. L'industrie laitière s'est donc concentrée sur la réduction du niveau de protéines alimentaires et de l'excrétion d'azote. La croissance de l'industrie du bioéthanol mène à une augmentation de la production de coproduits tels les drêches de distillerie séchées avec solubles (**DDGS**). Les DDGS à base de maïs ou d’autres céréales (**gDDGS** - orge, blé, triticale ou un mélange, à l'exclusion du maïs) semblent être des aliments pertinents pour les vaches laitières car riches en protéines. Quelques études antérieures ont montré que les DDGS peuvent remplacer le tourteau de soja et le tourteau de colza comme sources de protéines alimentaires sans réduire la production ou la qualité du lait. Cependant au moment de mon postdoc, la plupart des études portaient sur des DDGS à base de maïs et ne précisent donc pas la quantité optimale de gDDGS à intégrer à la ration des vaches.

Par conséquent, dans une première étude, l’objectif était de déterminer les effets de la proportion de gDDGS dans l'alimentation sur l’ingestion, la production de lait et la qualité du lait. Un total de 48 vaches Holstein a été impliqué dans un carré latin 3 × 3 répliqué avec 3 traitements alimentaires. Ces traitements à base d'herbe contenaient 4, 13,5 et 23% de gDDGS sur une base de MS en remplacement d'un mélange de concentrés (traitements L, M et H, respectivement). Le mélange de concentrés était composé de tourteau de soja, de tourteau de colza et de pulpe de betterave. L’ingestion de MS et la production laitière n'ont pas été affectées par la proportion de gDDGS dans la ration. Les résultats montrent que les gDDGS peuvent remplacer le tourteau de soja et le tourteau de colza comme sources de protéine dans l'alimentation des vaches laitières. La

ration peut être constitué de gDDGS jusqu'à 13,5% sans affecter négativement la production laitière, la qualité du lait ou le goût du lait. Lorsque les gDDGS représentent 23 % de la MS de la ration, la production de lait est réduite de 1,6 kg/j. Les résultats sont disponibles dans une publication dans Journal of Dairy Science [11].

Dans une seconde étude sur les DDGS, nous avons étudié l'utilisation de DDGS comme sources de protéines, à des niveaux de protéines brutes (**CP**) alimentaires marginalement faibles, dans une ration à base de trèfle et d'ensilage de maïs. L'expérimentation a impliqué 24 vaches Holstein et deux sources de protéines (DDGS ou mélange soja-colza). Les vaches étaient nourries selon deux niveaux de CP (14 ou 16%) dans un carré latin 4 × 4. L'objectif était d'évaluer l'effet de la source de protéines et du niveau de protéines sur l'ingestion, la production laitière et la qualité du lait. Les résultats ont indiqué que l'ingestion, la production de lait et les protéines dans le lait augmentaient lorsque le niveau de protéines dans la ration était de 16% contre 14% quelle que soit la source protéique. L'odeur et le goût du lait n'ont pas été affectés par les DDGS, même si les teneurs de certains acides gras dans le lait variaient. Pour conclure, les DDGS peuvent remplacer un mélange soja-colza sans affecter la production laitière et la qualité du lait. Les résultats sont disponibles dans une publication dans Journal of Dairy Science [12].

Toujours en quête de sources alternatives de protéines, j'ai travaillé sur les algues. Des études antérieures ont montré que les algues pourraient fournir de l'énergie, des minéraux et des protéines aux rations animales et constituer une source alternative de protéines pour les ruminants. Équilibrer les rations individuelles en AA permettrait d'améliorer les concentrations des composants du lait, la production laitière, l'utilisation des

protéines et de réduire l'impact environnemental de l'élevage laitier, les coûts d'alimentation et le gaspillage de nutriments. Cependant, on sait peu de choses sur la dégradabilité des AA entre les espèces d'algues et les saisons. Par conséquent, l'objectif de cette étude était d'évaluer la digestibilité ruminale et totale des AA de différentes algues récoltées à différentes saisons afin de déterminer si toutes les espèces d'algues peuvent être utilisées comme aliment alternatif en tant que source de protéines pour la ration des vaches laitières. Trois algues rouges (Mastocarpus stellatus, Palmaria palmata et Porphyra sp.), quatre brunes (Alaria esculenta, Laminaria digitata, Pelvetia canaliculata et Saccharina latissima) et deux vertes (Cladophora rupestris et Ulva sp.) ont été utilisées dans cette étude. Toutes les algues ont été collectées à Bodø, dans le nord de la Norvège, au printemps et/ou à l'automne en 2014 et 2015. La composition en AA des algues variait selon les espèces et la saison de récolte. La proportion d'azote des acides aminés dans l'azote total était comparable à celle des fourrages terrestres. Seule l'espèce a affecté les valeurs de dégradabilité de l'AA dans le rumen, l'intestin grêle et le tractus total. Pour certaines espèces d'algues comme Laminaria et Mastocarpus, certains AA étaient protégés contre la dégradation du rumen, faisant de ces algues des sources intéressantes pour l'approvisionnement en protéines non dégradées dans le rumen (ou digestibles dans l'intestin grêle). En conclusion, Porphyra présentait la plus grande quantité d'AA et les valeurs de dégradabilité les plus élevées dans le rumen et l'intestin grêle, ce qui fait de cette algue un aliment pertinent en tant que source de protéines. Palmaria occupe la deuxième place du classement avec une teneur élevée en AA, même si un tiers inférieure à celle de Porphyra, et des valeurs élevées de dégradabilité des AA dans le rumen et l'intestin grêle. Enfin, les algues vertes sont également pertinentes comme aliments protéinés, avec une grande quantité d'AA pour Cladophora et une haute dégradabilité intestinale des AA pour Ulva (Figure 27). L'ensemble des résultats est

disponible dans une publication dans Animal Feed Science and Technology [14].

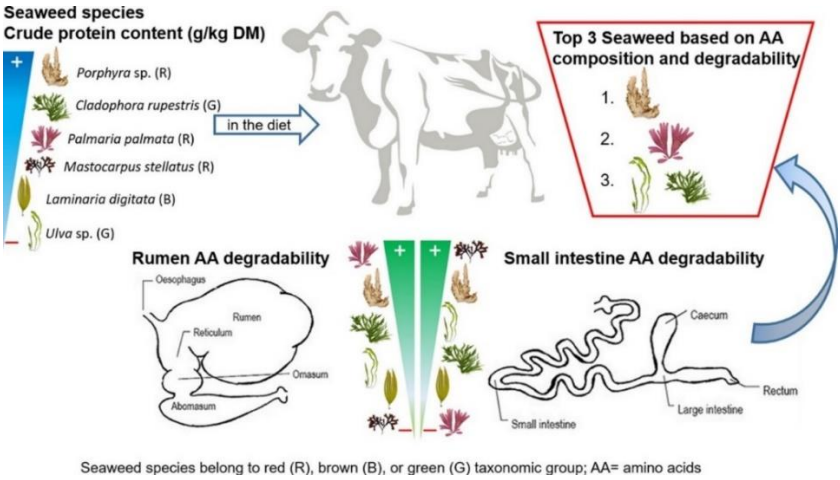

Figure 27 – Résumé graphique de l'article sur les algues comme source protéique pour les vaches laitières [14]

Après plus d'investigation, notamment sur les coûts et disponibilité de ces ressources alternatives, elles pourraient être intégrées plus fréquemment aux rations utilisées en alimentation de précision pour les vaches laitières. Une étude similaire est envisagée sur les ressources alternatives utilisables par les truies (Partie 3).

PARTIE 3 - PERSPECTIVES DE RECHERCHES

Dans cette troisième partie de mon mémoire, j'ai développé plusieurs perspectives de recherche. Les objectifs sont de poursuivre mes recherches en alimentation sur mesure et celles sur l'intégration de mesures comportementales et de métabolites dans les OAD. Egalement, l'étude des ressources alternatives aux sources de protéines pour les truies me semble être une thématique d'actualité à aborder. Les projets en cours détaillés dans la partie 2 ne sont pas repris dans cette partie 3 mais seront bien évidemment à terminer.

3.1. Poursuite des recherches en alimentation sur mesure pour les vaches laitières

Amélioration et utilisation du modèle GARUNS. Les résultats des simulations précédentes ont montré que le nouveau modèle GARUNS, intégrant le module d'alimentation, s'ajustait avec une bonne précision aux données de production des vaches laitières gérées pour des lactations de durées différentes. Plusieurs projets sont envisagés afin de faire évoluer ce modèle et son utilisation.

La prise en compte des perturbations visibles (par exemple une chute de lait ou de poids), détectées dans un premier temps manuellement, permettrait d'améliorer la précision des ajustements. Ce premier travail très chronophage vient de débuter, toujours sur les données de REPROLAC (62 vaches laitières), afin de comparer la qualité des ajustements avec ou sans la prise en compte de ces perturbations. Si la prise en compte de ces perturbations améliore effectivement la précision du modèle, il faudra chercher à automatiser leur détection.

En parallèle, l'objectif est désormais de faire évoluer ce modèle afin qu'il puisse prédire les prochaines courbes de production de chaque vache laitière ayant déjà effectué au moins une lactation, ainsi que les effets de différentes rations sur ces courbes. Ce travail devrait s'effectuer en collaboration avec AU afin de récupérer et travailler sur les données de la lactation suivant celle étudiée dans le projet REPROLAC. D'autres données, provenant du projet WIN Feed, seront également utilisées afin de mieux comprendre l'effet des différentes rations distribuées sur les courbes de production. Les résultats de ces analyses seront valorisés en conférence et dans une publication scientifique à visée internationale. Une synthèse sur l'effet les différentes stratégies alimentaires évaluées pour répondre aux besoins des vaches laitières sera également soumise dans une revue internationale courant 2022.

L'objectif à plus long terme est d'utiliser ce nouvel outil de prédiction mais cette fois-ci en « temps réel », probablement dans un premier temps à l'échelle de la semaine, afin de prendre en compte les facteurs environnementaux lors du choix des rations hebdomadaires. En effet, ces facteurs ne sont pour l'instant pas intégrés au modèle.

Réponse des vaches laitières lors de challenges de concentrés. En parallèle au projet WIN Feed, une autre approche s'est développée pour aller plus loin dans l'étude de la variabilité individuelle des vaches laitières afin de faire la preuve du concept de l'alimentation sur mesure. Le projet HARPAGON dirigé par l'IDELE a obtenu un financement CASDAR. Il a démarré fin 2021 et se terminera début 2025. Les partenaires associés à ce projet sont l'INRAE (UMR PEGASE; UMR MoSAR), SAS Ferme expérimentale laitière des Trinottières, et plusieurs organisations professionnelles agricoles (FCEL, Chambre

d'agriculture des Pays de la Loire). Je suis en charge de l'action 2 de ce projet, décrite ci-après.

Ce projet repose sur le fait que les concentrés, souvent distribués à hauteur de 22% dans la ration annuelle des vaches laitières françaises (Gautier and Le Doaré, 2019), sont coûteux, souvent produits hors de l'élevage (seuls 26% le sont), et en compétition avec l'alimentation humaine. En effet, 55 à 95% des protéines de la majorité des concentrés, tels que les tourteaux et graines, pourraient être directement consommées par les humains (Laisse et al., 2018). Depuis les années 1990, de nombreux travaux ont permis de mettre en évidence l'intérêt de moduler les apports en concentrés pour optimiser l'utilisation des ressources, réduire le coût alimentaire ainsi que les rejets dans l'environnement (Vérité and Delaby, 1998; Portier et al., 2003; Cutullic et al., 2013; Brocard et al., 2020; Foray et al., 2020). De nombreuses études montrent qu'il existe de la diversité derrière l'animal moyen souvent considéré pour planifier les rations (Tempelman et al., 2015; Hardie et al., 2017; Fischer et al., 2018). Par exemple, à même consommation alimentaire et mêmes besoins « moyens », il existe des différences interindividuelles de productions, c'est-à-dire des différence d'efficience alimentaire (Fischer et al., 2018). Une simulation rapide basée sur les modèles des systèmes d'alimentation des ruminants (INRA, 2018) estime qu'une réduction de 1 kg de concentrés/j/vache permettrait à terme d'économiser de l'ordre de 15 % des concentrés utilisés dans les élevages chaque année.

Ce projet propose de faire la preuve du concept d'un nouveau pilotage des concentrés distribués en complément des fourrages chez la vache laitière dans le but d'améliorer les performances techniques, économiques et environnementales des élevages. Il ambitionne de développer un concept d'alimentation sur mesure s'appuyant sur des technologies disponibles en élevage. L'essor

des technologies de monitorage des productions (compteurs à lait, stalle de pesée, imagerie 3D) et de pilotage individualisé de l'alimentation (DAC) offre l'opportunité de mettre en œuvre ce type de concept. La finalité de ce projet est de coupler les informations provenant de ces équipements pour optimiser l'alimentation de chaque vache. Il sera ainsi possible de tirer un avantage de la diversité d'efficience et de robustesse des individus, et d'optimiser l'offre alimentaire à l'individu plutôt qu'à un individu « moyen » comme c'est le cas actuellement.

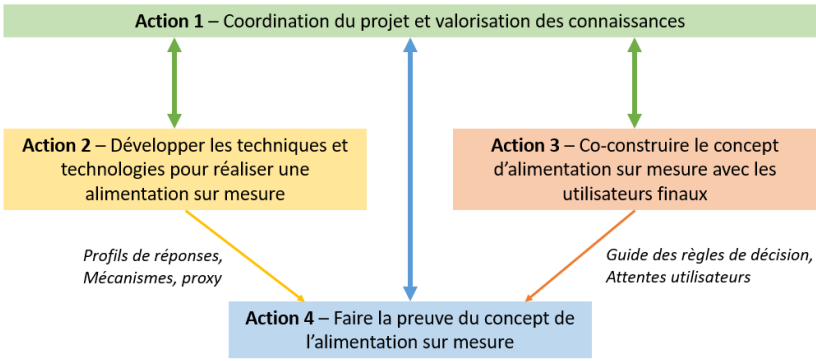

Figure 28 – Schéma d'organisation des actions du projet HARPAGON

Le projet est articulé en quatre actions (Figure 28). La première action regroupe la coordination du projet et la valorisation des connaissances et expériences acquises. L'action 2 consistera à suivre la variabilité des réponses individuelles induite par des challenges en concentrés (expérimentation aux Trinottières, Figure 29), pour ensuite pouvoir caractériser des profils de vaches et développer des proxy (méthodes indirectes) pour caractériser les profils de réponses des vaches laitières en valorisant des technologies déjà existantes dans les élevages. En parallèle, l'action 3 se focalisera sur la co-construction du concept d'alimentation sur mesure, incluant à la fois les utilisateurs finaux et les « développeurs » du concept. Les règles de décision de

distribution de concentrés en fonction du profil de réponses de chaque vache seront définies dans une démarche de construction participative. La dernière action (action 4) se basera sur les résultats des actions 2 et 3 pour faire la preuve de concept de l'alimentation sur mesure en la testant en ferme expérimentale et en la comparant sur les plans économique, technique et environnemental à une alimentation plus classique en ration complète.

La quantité de ration consommée par chaque vache n'étant pas estimable avec précision au pâturage, l'ensemble des essais et des résultats ne pourra se faire dans un premier temps qu'avec des fourrages conservés et distribués en auges individuelles. Cependant les résultats issus de ce projet pourront être évalués ultérieurement sur des régimes à base d'herbe pâturée.

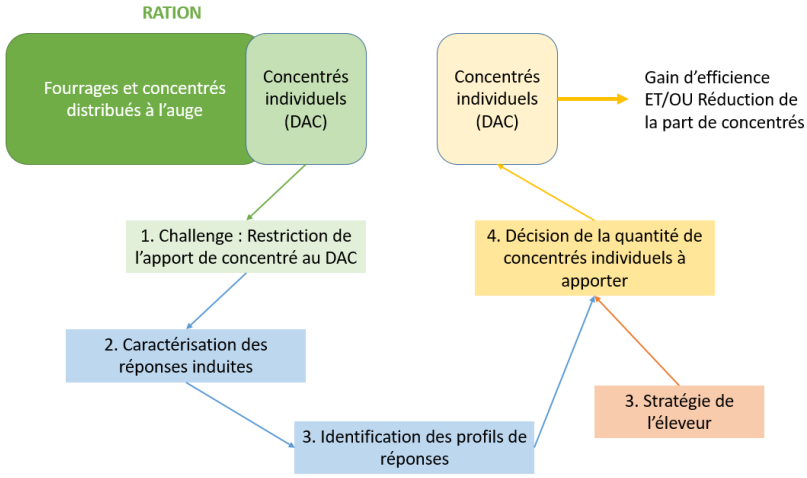

Figure 29 - Représentation schématique du concept d'alimentation sur mesure pour les vaches laitières du projet HARPAGON.

Les résultats attendus de ce projet sont :

- une description des profils adaptatifs des vaches laitières à une modulation des apports de concentrés,

- un guide contenant les clés de décision permettant à l'éleveur de définir la quantité de concentrés individualisés à distribuer à chaque vache,
- une notice décrivant les procédures d'une alimentation sur mesure des vaches laitières,
- un état des lieux de l'intérêt des acteurs et du niveau d'équipements sur le terrain pour la mise en œuvre d'une alimentation sur mesure,
- une preuve de concept de la mesure de la substitution entre ration de base et concentrés à partir de données disponibles en élevage, et
- une preuve de concept et évaluation du bénéfice d'une alimentation sur mesure en vaches laitières.

3.2. Poursuite de l'axe 4 : mesures comportementales et métabolites

Dans les années à venir je souhaite poursuivre mes recherches décrites dans l'axe 4 de la partie 2, concernant l'amélioration des modèles nutritionnels et la mise au point d'OAD pour l'alimentation et le bien-être animal. Je me focaliserai particulièrement sur l'intégration de mesures comportementales aux modèles nutritionnels et OAD (notamment l'activité physique et la recherche de nouveaux indicateurs du bien-être animal) et l'intérêt d'intégrer des données métaboliques dans ces modèles et OAD.

3.2.1. Intégration de mesures comportementales aux modèles

Activité physique et bien-être des truies. Le projet SOMOVE (projet complémentaire à SOWELL) vise à mettre au point d'un système d'analyse vidéo automatique permettant de mesurer en continu l'activité physique de chaque truie gestante du groupe.

En effet, l'activité physique des truies gestantes varie fortement d'un individu à l'autre et d'un jour à l'autre, induisant une dépense énergétique spécifique qui réduit d'autant la quantité d'énergie disponible pour la reconstitution des réserves ou le développement fœtal. Cependant, l'activité n'est pour l'instant pas intégrée à l'échelle individuelle dans la modélisation des besoins car elle est difficilement mesurable à cette échelle. Alors que les capteurs contenant un accéléromètre sont coûteux, invasifs et fragiles, le suivi vidéo nécessite actuellement une analyse manuelle des images très chronophage. L'automatisation du traitement des images, de façon individuelle et continue, est une solution novatrice pour gagner du temps. L'évaluation de l'activité en temps réel permettrait alors d'ajuster la ration (ou la quantité d'énergie) distribuée chaque jour à chaque truie de façon plus précise, répondant ainsi à plusieurs enjeux : une meilleure efficience (gestion des réserves corporelles), productivité (meilleure survie des porcelets) et longévité de l'animal avec probablement un ajustement individuel des apports pouvant réduire des coûts alimentaires et les rejets environnementaux. Ces résultats d'activité couplés à la localisation des truies dans la salle permettront également d'établir des indicateurs de bien-être et éventuellement de détecter précocement certaines maladies comme les boiteries. Cela devrait permettre de répondre aux attentes sociétales concernant le bien-être animal, ainsi qu'une meilleure détection des problèmes sanitaires et donc potentiellement la réduction de l'utilisation des antibiotiques. Enfin, un système d'aide à la décision sera construit qui intègrera la remontée des données massives issues de capteurs (images, séries temporelles) et leur traitement automatique, développé en intégrant des approches d'intelligence artificielle (**IA**) innovantes telles que la fouille de données et l'apprentissage automatique.

Ce projet offre également des perspectives de partenariats avec plusieurs entreprises privées telles que DILEPIX, une start-up experte en IA et en vision par ordinateur, qui propose déjà des solutions de suivi vidéo des animaux d'élevage notamment en élevage porcin. De futures collaborations pourront ensuite être initiées, notamment avec les fournisseurs des automates d'alimentation et d'abreuvement, afin de compléter les fonctionnalités de ces équipements par un couplage avec la mesure de l'activité en routine dans les élevages.

Ce projet, dont je suis la coordinatrice, vient d'être déposé à l'appel à projet CASDAR (janvier 2022). Il a été construit en collaboration avec l'IFIP et l'entreprise DILEPIX. Le projet SOMOVE se présente sous la forme de 4 actions (Figure 30). Une première action correspond au développement des briques du logiciel permettant l'analyse des activités et l'identification de la localisation d'un animal dans la salle. Une deuxième action est centrée sur l'intégration de l'activité physique mesurée dans l'action 1, dans le modèle nutritionnel et l'ajustement des rations en conséquences. L'action 3 explore les mesures d'activité physique et de localisation (en lien avec les interactions sociales) de l'action 1 afin de définir des indicateurs de bien-être et de santé. Enfin l'action 4 permet d'évaluer l'outil mis au point et de diffuser les connaissances acquises lors de ce projet (Figure 30).

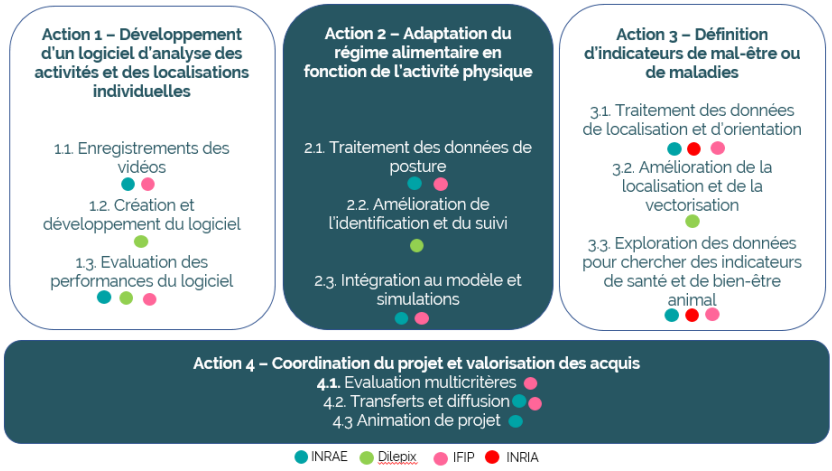

Figure 30 – Représentation des différentes actions planifiées pour le projet SOMOVE

Indicateurs du bien-être animal. Dans l'objectif de développer de nouveaux indicateurs du bien-être animal, j'ai participé à la construction du projet européen WELCOMES, porté par Céline Tallet (SYSPORC, INRAE) et déposé fin 2021 à l'appel HORIZON-CL6-2021-FARM2FORK-0. Ce projet multi-espèces a pour objectif global de fournir des indicateurs, des outils et des modèles de stratégie d'entreprise innovants pour évaluer, surveiller et gérer de manière objective le bien-être animal dans les pays européens. Cela devrait permettre de promouvoir de nouvelles pratiques d'élevage mettant en valeur le bien-être animal et de prendre en compte l'impact environnemental, socio-économique et pratique de ces nouvelles pratiques d'élevage. Pour atteindre cet objectif global, 11 sous-objectifs ont été définis et répartis en 7 workpackages qui ne seront pas décrits dans ce mémoire (confidentialité du projet). Pour rendre le projet réaliste, des questions de bien-être d'actualité ont été sélectionnées: morsure de queue chez les porcs, picage de plumes en poules pondeuses, problèmes de santé et mortalité (ovins, veaux de boucherie et porcelets) et manque de

confort chez les bovins laitiers. WELCOMES devra fournir des moyens efficaces pour réduire ces problèmes, en co-construisant des outils opérationnels scientifiquement validés.

Dans ce projet, je souhaite m'intéresser tout particulièrement à l'étude du lien entre le bien-être de la truie et le taux de mortalité des porcelets. La mortalité pré-sevrage est une préoccupation majeure en termes de coût économique et de bien-être dans la production porcine commerciale. Divers articles de synthèse ont montré que la mortalité pré-sevrage dans les troupeaux porcins commerciaux varie entre 10 et 20 % et que la majorité de ces décès survient dans les 72 heures suivant la naissance. La plupart des facteurs de mortalité pré-sevrage rapportés après la mise-bas sont l'écrasement des porcelets par la mère et le manque de comportement maternel (position favorable de la truie à l'allaitement : immobile vs. très active voir sauvage). Des enclos spécifiques ont été développés pour les truies en lactation pour tenter de résoudre le problème d'écrasement et la sélection génétique des truies tente de sélectionner des truies « maternelles ». Cependant, la littérature concernant les impacts des caractéristiques ou des comportements des truies pendant la gestation sur le taux de mortalité des porcelets est rare et incomplète. Pour résumer ces résultats, l'âge à la première insémination et la parité semblent influencer la taille de la portée (Leman, 1992). Une gestation prolongée améliorerait probablement la survie des porcelets après la naissance et la croissance des porcelets mais pourrait entraîner davantage de mort-nés (Rydhme, 2008). Il a été rapporté que l'exposition des truies à un environnement stressant pendant la gestation a des effets négatifs légers sur la maturité des porcelets à la naissance (Quesnel et al. 2018). De plus, les systèmes de logement et de gestion des truies gestantes peuvent être préjudiciables au bien-être et à la santé des truies, ce qui pourrait à son tour nuire à la santé et à la survie des porcelets (Merlot et al., 2013). Ainsi, au-

delà de la sélection génétique, il semble important d'étudier plus précisément le bien-être des truies, via des enregistrements de leur comportement. Par exemple, les comportements d'alimentation et d'abreuvement (enregistrés par les automates) ainsi que l'activité physique (enregistrée par des capteurs ou par des analyses vidéos) pourraient être utilisés pour détecter des stress potentiels et proposer des solutions pour les résoudre et ainsi diminuer le taux de mortalité des porcelets. Dans des articles récents, certaines méthodologies pour identifier la variation dans les ensembles de données à haute fréquence ont été développées. Ces variations peuvent être liées à un défi environnemental ou à une perturbation animale. Certains chercheurs ont ainsi utilisé des méthodes de lissage pour détecter les écarts de production (Codrea et al., 2011), ou des coefficients d'autocorrélation pour quantifier la réponse de la prise alimentaire à une perturbation (Nguyen-bah et al., 2020), ou encore un coefficient de variation pour estimer la probabilité qu'un défi environnemental se produise (Garcia Baccino et al., 2021).

L’objectif est donc de déterminer les facteurs liés à la truie gestante qui influencent la mortalité des porcelets et comment les gérer pour réduire le taux de mortalité des porcelets. La première hypothèse est qu’il existe un lien entre les caractéristiques des truies gestantes (parité, poids, épaisseur de lard dorsal), les comportements (comportement alimentaire et comportement d'abreuvement, c'est-à-dire les apports, le nombre de visites, la durée des visites et la vitesse d'ingestion) et l'activité physique sur le taux de mortalité des porcelets. La deuxième hypothèse est que les perturbations de ces mesures pendant la gestation affecteront encore plus la mortalité des porcelets et devraient être détectées dans le but de proposer des solutions pour les réduire.

D’un point de vue statistique, ce projet soulève plusieurs challenges. Il faudra identifier les facteurs d'influence sur le taux

de mortalité des porcelets et donc utiliser des méthodes de clustering, des modèles linéaires ou des modèles mixtes si l'effet génétique est intégré. Une méthodologie devra être développée pour détecter les perturbations dans le temps parmi les facteurs identifiés en utilisant l'ensemble des phénotypes (multivariés) à haut débit (comportements alimentaires, comportements d'abreuvement, activité des truies). Les effets causaux et leurs perturbations sur la mortalité des porcelets devront être qualifiés en utilisant par exemple un modèle de Poisson linéaire généralisé avec pour variable explicative une mesure de la réponse à la perturbation. À terme, un algorithme d'apprentissage automatique devra être développé pour détecter rapidement ces perturbations et prendre des décisions rapides et automatiques pour réduire la mortalité des porcelets. Ce travail statistique sera effectué en collaboration avec Tom Rohmer (GENPHYSE, INRAE) en nous appuyant principalement sur des bases de données de truies gestantes de l'UE3P Saint-Gilles et le site du Magneraud (INRAE, Poitou-Charentes).

3.2.2. Evaluer l'intérêt d'intégrer des métabolites dans les modèles ou OAD

Les projets de recherche que j'ai précédemment effectués sur l'analyse des métabolites du lait ou du sang ont montré des résultats plutôt discordants. L'utilisation des métabolites comme indicateurs du métabolisme énergétique (projets REPROLAC, GplusE), de la santé ou de la persistance (projet LACTALIM) des vaches laitières n'est pas évidente et nécessite plus d'investigation notamment sur des jeux de données différents et plus conséquents. Des études complémentaires permettront d'évaluer l'intérêt d'intégrer des métabolites du sang ou du lait dans les modèles nutritionnels ou les OAD pour la gestation des vaches laitières.

Des prises de sang effectuées à différents moments de la lactation des vaches intégrées au projet WIN Feed (3 prises de sang réalisées aux jours J+1, J+3 et J+5 après vêlage, puis une prise de sang par semaine pendant 4 mois) seront analysées afin de mesurer les acides gras non estérifiés, le glucose, l'urée, et le BHBA sur les plasmas. Ces indicateurs du métabolisme énergétique permettront d'évaluer les réponses physiologiques des vaches aux différentes rations distribuées ainsi qu'à la semaine de lactation. Ces résultats seront mis en relation avec d'autres mesures de l'état énergétique de chaque animal via le gain de poids, la note d'état corporelle et l'ingestion (mesures classiques de l'EB). Cette base de données pourra également être combinée à celle du projet REPROLAC afin d'apporter plus de variabilité individuelle et d'individus à cette étude.

Dans la continuité du projet LACTALIM, l'intérêt pour les composants du lait et plus particulièrement du TL sera étudié plus précisément via le projet LactoPil. J'ai participé à la construction de ce projet qui vise à co-construire avec les acteurs du conseil en élevage des modèles prédictifs imputables dans un OAD permettant de valoriser le TL, mesuré en routine à grande échelle mais peu valorisé. La littérature a montré le potentiel du TL en tant que proxy de phénomènes tels que le déficit énergétique, les mammites voire la persistance de la lactation. Ce projet porté par l'Institut de l'Elevage (Marine Gelé) s'est construit en partenariat avec l'INRAE, des organismes professionnels agricoles (CEL 25-90, EILYPS) et prestataires (Actalia Cecalait, Agrocampus Ouest, LILANO, AU), les Unités Mixtes Technologiques « Recherche et Ingénierie en Elevage Laitier 3.0 » (UMT RIEL 3.0) et « Génomique Bovine » (UMT eBIS), le Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière (CNIEL), France Conseil Elevage (FCEL), France Génétique Elevage (FGE), et la Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche (DGER). Ce projet est pour l'instant en quête de financements.

Une demande pour un financement de thèse sur ce projet a également été déposée fin 2021 à l'INRAE PHASE.

3.3. Nouvelles stratégies d'alimentation pour la carrière des truies

Jusqu'à aujourd'hui, la stratégie d'alimentation sur mesure fondée sur un ajustement en lysine et également en énergie (quantité d'aliments) a donné de très bons résultats d'un point de vue économique et environnemental sans impacter la productivité ou le bien-être des truies. Cependant, l'ajustement minéral a besoin d'être précisé afin d'éventuellement réduire encore plus les rejets environnementaux. De plus, les études précédentes ont été menées à court terme en séparant la période de gestation de la période de lactation (deux modèles distincts). L'effet d'une alimentation sur mesure à long terme mérite donc une attention particulière. Enfin, afin de répondre aux contraintes actuelles concernant le coût et la compétition alimentaire de certaines matières premières entre les hommes et animaux ainsi que les impacts environnementaux de l'élevage, l'inclusion de ressources alimentaires alternatives et locales dans les rations des truies doit être considérée.

3.3.1. Projet SOLIFE : alimentation des truies tout au long de leur vie

L'élevage sur mesure semble être une voie prometteuse pour répondre aux enjeux actuels (maitrise des coûts alimentaires, amélioration de l'efficacité alimentaire, impacts environnementaux, bien-être animal). En effet, une alimentation sur mesure, ajustée sur les besoins individuels en lysine chaque jour pour chaque truie, permet de réduire les rejets dans l'environnement et le coût alimentaire sans réduire les

performances de production et de reproduction des truies pendant la gestation [21] ou la lactation (Gauthier, 2021).

Les expérimentations ou simulations réalisées jusqu'à présent ont consisté à ajuster la qualité de l'aliment apporté en s'appuyant seulement sur les besoins en AA (lysine). De ce fait, une stratégie d'alimentation sur mesure fondée sur l'ajustement des apports en lysine permet une réduction limitée des excès de phosphore comparée à ceux en azote. En effet, les besoins en minéraux (phosphore) sont tout aussi variables entre truies et au cours du temps que ceux en lysine, mais avec une dynamique temporelle un peu différente. Environ 60 à 80 % du phosphore est stocké dans les os et les 20 % restants sont présents dans les cellules et les tissus de l'organisme (Favus et al., 2006). L'apport insuffisant de phosphore se produit principalement en fin de gestation et en lactation période pendant laquelle le métabolisme est intensifié (NRC, 2012). Cela peut entraîner une diminution de l'efficacité de l'assimilation des protéines alimentaires et des problèmes de santé tels qu'un retard de croissance chez les jeunes porcs ou une faible minéralisation entraînant une faiblesse des pattes pour les porcs en croissance et une paralysie postérieure pour les truies (Van Riet, 2013).

Jusqu'à maintenant, les effets d'une alimentation sur mesure n'ont été évalués que sur une gestation ou une lactation. Les conséquences d'une stratégie d'alimentation sur mesure sur la longévité des truies ne sont pas connues. Cependant, certaines études ont montré que le fait de ne pas répondre aux besoins nutritionnels individuels au cours d'un cycle de gestation pourrait affecter non seulement les cycles de reproduction suivants, mais aussi les performances à plus long terme (Dourmad et al., 1994 ; Trottier et al., 2015) ou le bien-être animal (Quiniou, 2016). De plus, certaines études récentes indiquent que la nutrition de la truie pendant la gestation peut également affecter la capacité

digestive, la robustesse du système immunitaire de la progéniture (Chen et al., 2017) et la survie des porcelets à la naissance.

C'est dans ce contexte et dans la continuité de mes projets de recherches en alimentation porcine que j'ai monté le projet SOLIFE (en recherche de financements sur la partie expérimentale) en collaboration avec l'IFIP, qui se présente sous la forme d'une thèse au financement acquis (50% UMT DIGIPORC, 50% INRAE PHASE) dont le démarrage est prévu à partir de septembre 2022. Compte tenu de la durée d'une thèse (3 ans) et de la quantité de travail que représente ce projet (prise en main et modification des modèles nutritionnels, expérimentations, analyse des résultats et rédaction), la thèse se focalisera sur les périodes de gestation qui représente 85% d'un cycle reproductif. La thèse poursuit un double objectif :

- Poursuivre le développement de notre modèle nutritionnel en gestation en déterminant l'intérêt d'une alimentation sur mesure fondée sur un ajustement simultané en lysine et en phosphore. Les équations pour déterminer les besoins en phosphore sont déjà disponibles.

- Quantifier les effets de deux stratégies d'alimentation sur mesure (ajustement fondé sur la lysine seule ou conjointement au phosphore) sur les performances des truies en gestation, sur plusieurs cycles reproductifs, en comparaison à une alimentation standard.

La thèse contribuera à l'évolution du modèle nutritionnel « truie gestante » et à la prise en compte de critères de coûts, santé et rejets environnementaux dans le choix de la stratégie alimentaire à mettre en œuvre sur une durée plus ou moins longue.

3.3.2. Couplage et automatisation des modèles truies gestantes et truies en lactation

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, les effets d'une alimentation sur mesure ne sont pas connus à long terme car ils n'ont été étudiés qu'au cours d'une lactation ou d'une gestation. Les deux modèles nutritionnels pour les truies, l'un en gestation et l'autre lactation, devront donc être couplés afin de faciliter leur usage et l'ajustement des rations tout au long de la vie d'une truie. Ce couplage pourra se faire sous un format Python, format actuel de chaque modèle. Dans un premier temps, l'éleveur ou le chercheur qui utilisera ce modèle devra enregistrer des données d'entrée au modèle définissant chaque animal à chaque début de période (gestation, lactation), à savoir : le numéro d'identification de l'animal, le rang de portée, le numéro de la salle, la période (gestation ou lactation), le poids et l'EPL (à l'insémination et à la mise-bas), la taille (nés totaux) et le poids de portée à la mise-bas (Figure 31). En fonction de la période indiquée, le sous-modèle sélectionné calculera la ration optimale à distribuer par jour par animal et transmettra cette information au DAC. Le DAC enregistrera des informations, comme l'ingestion qui est nécessaire au fonctionnement du sous-modèle « lactation ». Pour ce sous-modèle lactation, l'éleveur devra également renseigner les potentiels changements concernant le nombre de porcelets vivants de la naissance au sevrage afin de prédire au mieux le poids de portée au sevrage. Enfin, de nouvelles données pourront être intégrées progressivement au modèle, comme les données comportementales, environnementales ou de poids de la truie mesuré chaque jour grâce à des balances automatiques (projets décrits dans la partie 2).

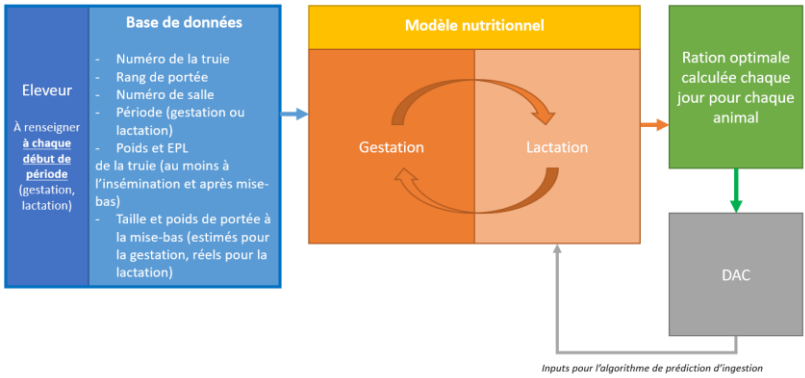

Figure 31 – Représentation de l'OAD permettant l'estimation et la distribution de la ration optimale journalière et individuelle tout au long de la vie des truies

Il faudra également se rapprocher des industriels d'automates ou capteurs afin d'automatiser le fonctionnement de ce nouveau modèle « complet » qui devra être lié aux DAC et potentiellement à d'autres automates ou capteurs (poids mesuré automatiquement ou manuellement).

3.3.3. Ressources alternatives pour les truies

Comme pour les travaux réalisés lors de mon postdoc sur les ressources alternatives pour les vaches laitières, je souhaite m'intéresser aux ressources alternatives comme sources de protéines disponibles pour l'élevage porcin et intégrer ces ressources dans la planification des rations en alimentation sur mesure. La première étape de ce nouveau projet sera de rédiger une synthèse bibliographique sur le sujet afin d'identifier les ressources alternatives disponibles et leurs caractéristiques. Le tableau 4 résume quelques résultats préliminaires de cette recherche. L'étape suivante sera de sélectionner une ou plusieurs ressources alternatives (selon leurs caractéristiques, localisation, coût …etc) à intégrer dans la ration des truies afin d'évaluer leurs

effets expérimentalement lorsqu'une stratégie d'alimentation sur mesure est appliquée.

Les protéines sont un nutriment essentiel pour la productivité des animaux d'élevage. Le soja et la farine de poisson sont deux des principaux ingrédients utilisés dans les rations pour répondre aux besoins en protéines des animaux car ils fournissent des niveaux substantiels de protéines (respectivement 44 et 60-70% CP) et AA essentiels. Cependant, la fluctuation des prix ainsi que la déforestation et les émissions de gaz à effet de serre liées à la production et au transport du soja, ainsi que la surpêche, ont accru le besoin d'ingrédients alimentaires alternatifs riches en protéines.

Idéalement, ces sources alternatives de protéines devraient, en plus de fournir des protéines et en particulier des AA essentiels, avoir des impacts négatifs minimes sur l'environnement. L'obtention, localement, de protéines de haute qualité peut être un défi dans de nombreux pays d'Europe du Nord, où les conditions climatiques limitent la production de cultures riches en protéines. Au Danemark, par exemple, plusieurs expériences ont été menées en utilisant des étoiles de mer, des moules et des insectes comme sources protéiques alternatives principalement pour les non-ruminants. Ces matières premières sont toutes potentiellement disponibles localement. D'autres aliments alternatifs au soja et à la farine de poisson ont été répertoriés dans le tableau 4 ainsi que les lieux de production spécifiques (si besoin) et quelques caractéristiques de ces aliments. Il s'agit d'un travail préliminaire, non exhaustif, mais qui montre bien la diversité des ressources potentielles et l'intérêt pour le sujet.

Tableau 4 – Liste non-exhaustive d'aliments alternatifs comme sources de protéines pour l'alimentation porcine, lieux de productions et caractéristiques

Ingrédient alternatif	Lieu de production spécifique	Caractéristiques de l'ingrédient
Farine de palmiste	Asie, Australie, Amérique du sud et Afrique (en raison de la croissance de la production d'huile de palme)	< 18 % CP Economique Pauvre en lysine Digestibilité moyenne Bonne teneur en énergie Relativement forte teneur en fibres (20%)
Colza (3ème grande culture oléagineuse après le soja et le palmier)	Climats froids	Niveaux élevés de FAN (y compris les glucosinolates qui réduisent la palabilité des aliments). Le canola produit au Canada ne contient pas de glucosinolates (« 00-colza ») : 40-43% CP Inclusion limité à 5% pour les porcelets, jusqu'à 25% pour les porcs en croissance-finition
Farine de graines de coton		40% CP Digestibilité modérée 15% de fibres Certains FAN
Tournesol	Climats froids	23 à 40 % CP

		Inclusion jusqu'à 20% dans l'alimentation lorsque les prix sont favorables. Forte concentration de fibres brutes. Déconseillé pour les jeunes porcs (problème de digestibilité des protéines)
Lupins	Australie, certaines régions d'Asie, intérêt croissant pour l'UE	32-42 % CP Inclusion entre 10 et 30% selon l'âge et le stade. Limitation : taux d'alcaloïdes et taux élevé de fibres brutes (25 %)
DDGS		30-40% CP Économie de coûts, bon niveau d'énergie Inclusion entre 20 % pour des animaux en croissance et 50 % pour des porcs adultes Limitation : taux de lysine et mycotoxines (selon qualité)
Farine de coprah (dérivé de la chair de noix de coco)	Asie	Ingrédient à faible coût Riche en fibres Faible en AA essentiel

		Inclusion limitée à 5-25% (augmente avec l'âge)
Pois et haricots	UE (fèves), Asie (pois chiches)	25% CP Niveau élevé d'AA, mais méthionine relativement faible
Insectes		30-70% CP Niveau de cystéine inférieur à celui dans le soja Bonne digestibilité Limitation : inclusion < 10%
Lemna (lentille d'eau)	De nombreuses régions du monde	35-45% CP Digestibilité iléale standard de 79 % (CP) et 82 % (AA) (supérieure à la farine de soja, similaire à la farine de poisson) Plante aquatique à croissance rapide
Farine de moules	A proximité de l'océan/mer (ex. pays nordiques de l'UE)	60-70% CP Profil AA similaire à la farine de poisson Haute digestibilité iléale de 83%
Farine d'étoiles de mer	A proximité de l'océan/mer (ex. pays nordiques de l'UE)	39% CP Niveaux élevés d'AA (mais < farine de poisson)

		Digestibilité iléale standardisée de 80% Limitation : 20 à 50 % de cendres, taux d'inclusion (< 7,5 % sinon cela réduit les performances de croissance chez les porcs)
Algues		45% CP Organismes à croissance la plus rapide

Cependant, l'inclusion d'aliments alternatifs dans l'alimentation des porcs ne réduit pas nécessairement le coût de l'alimentation par kilogramme de gain de poids. Par conséquent, leur inclusion dans les rations doit être optimisée en fonction de leur teneur en énergie et leur profil en AA. De plus, les aliments alternatifs ont généralement une teneur élevée en au moins un des facteurs anti-nutritionnels (**FAN**) suivants : fibres, tanins, glucosinolates et inhibiteurs de trypsine thermolabiles. Plusieurs méthodes peuvent optimiser l'utilisation des nutriments des porcs nourris avec des aliments alternatifs en réduisant les effets de leur FAN. Ces méthodes comprennent par exemple 1) la réduction de la taille des particules pour augmenter la digestibilité des nutriments, 2) le décorticage ou la scarification pour réduire la teneur en tanins et en fibres des légumineuses et des graines oléagineuses, 3) des traitements thermiques tels que l'extrusion et le grillage pour réduire les FAN thermolabiles, ou 5) la supplémentation alimentaire avec des enzymes dégradant les fibres (Woyengo et al., 2014).

CONCLUSION

Ces dix dernières années j'ai développé des recherches en sciences animales à une échelle internationale, sur plusieurs espèces et disciplines dans des centres d'excellence (Université d'Aarhus - Danemark, UBC Dairy – Canada, INRAE – France). La plus grande partie de mon travail porte sur l'alimentation sur mesure des vaches laitières et des truies. Cette stratégie d'alimentation s'est développée suite à l'identification d'une grande variabilité inter- et intra-individuelle des besoins nutritionnels (axe 1), et grâce à la mise en place de modèles nutritionnels ainsi qu'au développement de nouvelles technologies (alimentateurs, capteurs). Ces modèles couplés à des jeux de données permettent notamment d'effectuer des simulations (axe 2) afin de déterminer les effets de différentes stratégies alimentaires sur les performances de l'animal et éventuellement sur les rejets environnementaux, avant d'évaluer certaines de ces stratégies en fermes expérimentales (axe 3).

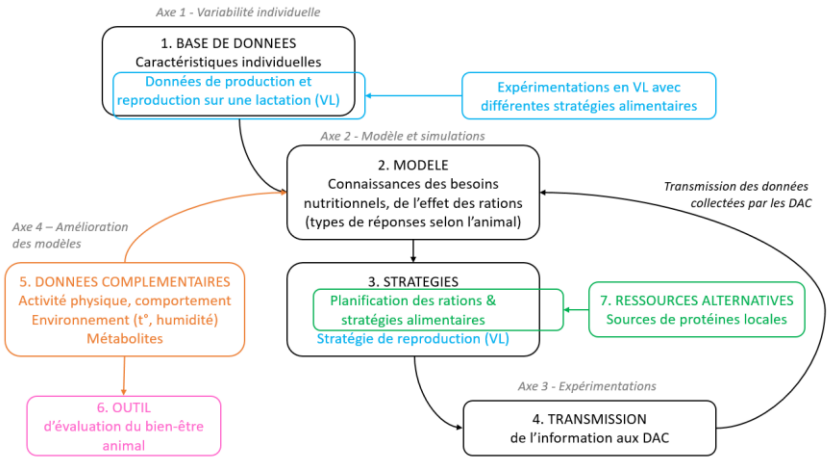

Figure 32 – Schéma bilan de mes travaux de recherches et perspectives

Des données complémentaires, comme la température extérieure ou l'activité de l'animal, peuvent être ajoutées au modèle afin d'améliorer la prédiction des besoins nutritionnels des animaux (axe 4, Figure 32).

Chez les truies, l'ajustement individuel et journalier de la composition en acides aminés et de la quantité des rations permet la diminution du coût alimentaire et des rejets environnementaux sans impacter les performances de l'animal. La mise en place dans les élevages de cette alimentation sur mesure est possible grâce aux alimentateurs automatiques qui intègrent des courbes d'alimentation individuelles produites par les modèles nutritionnels. A court terme, l'objectif est d'automatiser ce fonctionnement, qui nécessite encore l'intervention des chercheurs, et d'améliorer la précision du modèle nutritionnel. Cette étape d'amélioration passera par la possibilité d'ajuster les apports alimentaires non seulement aux besoins en protéines mais également aux besoins en minéraux. De plus, de nouveaux paramètres pourront être intégrés dans les modèles comme l'activité individuelle et journalière. Cela nécessitera le développement de nouveaux outils d'analyse d'images et de tracking individuel. A plus long terme, l'utilisation des données collectées en élevage grâces aux automates et aux capteurs devrait également permettre de mettre au point un système d'alertes et éventuellement d'actions pour garantir le bien-être de chaque animal.

Chez les vaches laitières, la mise en place de l'alimentation sur mesure est plus difficile bien que l'enregistrement des données et la pose de capteurs sur l'animal soient simplifiés par rapport aux truies. Le choix de la variable d'ajustement de l'alimentation est un premier problème qui nécessite plus d'investigation quant aux profils des vaches. En effet, il semble pertinent de penser que toutes les vaches ne vont

pas mobiliser leurs réserves de la même façon, ni même utiliser les nutriments apportés par la ration dans des proportions similaires pour les différentes fonctions. L'ajustement de la proportion en énergie de la ration par rapport au gain de poids de l'animal est une piste à développer, qui semble induire un effet positif à court terme sur la production laitière sans impacter les performances de reproduction. A long terme, les effets doivent être précisés. De plus, la réflexion sur l'alimentation de précision peut être combinée à la gestion de la date d'insémination (c'est-à-dire le choix de la durée de la lactation) afin de proposer les meilleurs scénarios en termes de performances de production et de reproduction. Enfin, le modèle utilisé pour étudier les effets de l'alimentation ou de la date d'insémination sur les performances futures reste à développer. Pour l'instant ce modèle fonctionne a posteriori et nécessite plus de données expérimentales évaluant différentes stratégies afin de faire le lien entre les effets de celles-ci et les caractéristiques individuelles des vaches.

Pour les deux espèces, les ressources alternatives aux sources de protéines actuelles feront l'objet d'un futur projet de recherche afin, notamment, de limiter la concurrence entre l'alimentation humaine et l'alimentation animale, et d'identifier les nouvelles ressources à faible coût selon les différents pays et régions. Il faudra également définir les potentiels impacts de ces ressources sur les performances animales et environnementales, et établir des seuils d'intégration aux rations des animaux.

En élevage, de nouveaux challenges apparaissent chaque jour, concernant, par exemple, la diminution et le remplacement des produits animaux. Cela peut mettre en danger le modèle laitier français (concurrence économique avec l'apparition de substituts végétaux) mais également, à plus long terme, le modèle porcin (viande synthétique). D'énormes investissements sont réalisés dans le monde sur la *foodtech* (les protéines de substitution) : l'industrie de la viande américaine est aujourd'hui le plus gros

investisseur dans la recherche sur les protéines animales de substitution aux États-Unis. La place de l'animal d'élevage dans notre société est donc fortement remise en question.

Tous ces projets de recherche de grande ampleur, et aux enjeux importants pour l'élevage d'aujourd'hui et de demain, permettent d'intégrer des stagiaires et des doctorant(e)s. L'encadrement de jeunes chercheurs prend donc de plus en plus de place dans mon activité et, par la transmission et les échanges qu'il implique, donne du sens à mon travail de chercheuse.

L'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches, étape clé de mon parcours professionnel, viendra reconnaître mon engagement auprès des étudiant(e)s et apporter un soutien de direction de recherches utile à mon équipe.

REFERENCES

Alstrup L., Nielsen M.O., Lund P., Sehested J., Larsen M.K., and Weisbjerg M.R., 2015. Milk yield, feed efficiency and metabolic profiles in Jersey and Holstein cows assigned to different fat supplementation strategies. Livestock Science 178, 165-176.

Anderson L.E., Holt J.P., van Heugten E., Poole D.H., 2020. Changes in growth performance, feeding behaviors, and posture behaviors of growing pigs subjected to low-intensity heat stress (Meeting Abstract). J. Animal Science 98. doi: 10.1093/jas/skaa278.006

André G., Berentsen P.B.M., Van Duinkerken G., Engel B., and Lansink A.G.J.M.O., 2010. Economic potential of individual variation in milk yield response to concentrate intake of dairy cows. Journal of Agricultural Science 148, 263-276.

André G., Ouweltjes W., Zom R.L.G., and Bleumer E.J.B., 2007. Increasing economic profit of dairy production utilizing real time process data. in European conference Precision Livestock Farming.

Andretta I., Pomar C., Rivest J., Pomar J., and Radunz J., 2016. Precision feeding can significantly reduce lysine intake and nitrogen excretion without compromising the performance of growing pigs. Animal 10(7):1137-1147. doi: 10.1017/s1751731115003067

Arbel R., Bigun Y., Ezra E., Sturman H., and Hojman D., 2001. The effect of extended calving intervals in high lactating cows on milk production and profitability. Journal of Dairy Science 84, 600-608

Bossen D., and Weisbjerg M.R., 2009. Allocation of feed based on individual dairy cow live weight changes II: Effect on milk production. Livestock Science 126, 273–285.

Brocard V., Tranvoiz E., Dupre S., Foray S., Le Coeur P., Raison M., Trou G., Follet D., 2020. Performances techniques, économiques et environnementales de deux systèmes laitiers contrastés. Rencontres Recherches Ruminants 25, 554–559.

Broderick G.A., 2003. Effects of varying dietary protein and energy levels on the production of lactating dairy cows. Journal of Dairy Science 86, 1370-1381.

Butler W.R., and Smith R.D., 1989. Interrelationships between energy balance and postpartum reproductive function in dairy cattle. Journal of Dairy Science 72, 767-783

Butler W.R., 2000. Nutritional interactions with reproductive performance in dairy cattle. Animal Reproduction Science 60, 449-457.

Codrea M.C., Højsgaard S., Friggens N.C., 2011. Differential smoothing of time-series measurements to identify disturbances in performance and quantify animal response characteristics: an example using milk yield profiles in dairy cows. Journal of Animal Science 89, 3089–98.

Chen, Y., Mou D., Hu L., Zhen J., Che L., Fang Z., Xu S., Lin Y., Feng B., Li J., Wu D., 2017. Effects of maternal low-energy diet during gestation on intestinal morphology, disaccharidase activity, and immune response to lipopolysaccharide challenge in pig offspring. Nutrients 9, 1115-1133

Cutullic E., Delaby L., Edouard N., Faverdin P., 2013. Rôle de l'équilibre en azote dégradable et de l'alimentation protéique individualisée sur l'efficience d'utilisation de l'azote. Rencontres Recherches Ruminants 20, 53–56.

Dobson H., Smith R.F., Royal M.D., Knight C.H., and Sheldon I.M., 2007. The high-producing dairy cow and its reproductive performance. Reproduction in Domestic Animals 42, 17-23.

Dourmad J.Y., Etienne M., Prunier A., Noblet J., 1994. The effect of energy and protein intake of sows on their longevity. Livestock Production Science 40, 87-97

Dourmad J.Y., Van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Brossard L., and Noblet J., 2015. Modelling nutrient utilization in sows: a way towards the optimization of nutritional supplies. In: N.K. Sakomura, R.M. Gous, I. Kyriazakis, L. Hauschild, dir., Nutritional modelling for pigs and poultry (p. 50-61).

Dumas A., Dijkstra J., and France J., 2008. Mathematical modelling in animal nutrition: A centenary review. Journal of Agricultural Sciences 146, 123–142

Favus M. J., Bushinsky D. A., Lemann J.Jr., 2006. Chapter 13. Regulation of calcium, magnesium and phosphate metabolism. In: M. J. Favus, editor, Primer on the metabolic bone diseases and disorders of bone metabolism. American Society for Bone and Mineral Research, Washington, D.C. p 76-83.

Fischer A., Friggens N.C., Berry D.P., Faverdin P., 2018. Isolating the cow-specific part of residual energy intake in lactating dairy cows using random regressions. Animal 12, 1396–1404.

Foray S., Gaborit M., Launay F., Delaby L., 2020. Stratégie d'alimentation, race, âge au 1er vêlage et taux de renouvellement : Evaluation intégrée de leur influence sur l'empreinte carbone du lait et les pertes azotées à l'échelle du système laitier. Rencontres Recherches Ruminants 25, 115–119.

Forbes J.M., 1995. Voluntary food intake and diet selection in farm animals. Institute of Integrative and Comparative Biology, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK. 532p.

Friggens N.C., Brun-Lafleur L., Faverdin P., Sauvant D., and Martin O., 2013. Advances in predicting nutrient partitioning in the dairy cow: Recognizing the central role of genotype and its expression through time. Animal 7, 89–101

Friggens N.C., Berg P., Theilgaard P., Korsgaard I.R., Ingvartsen K.L., Lovendahl P., and Jensen J., 2007. Breed and parity effects on energy balance profiles through lactation: Evidence of genetically driven body energy change. Journal of Dairy Science 90, 5291-5305.

García S.C., and Fulkerson W.J., 2005. Opportunities for future Australian dairy systems: a review. Australian Journal of Experimental Agriculture 45, 1041-1055

Garcia-Baccino C.A., Marie-Etancelin C., Tortereau F., Marcon D., Weisbecker J.L., Legarra A., 2021. Detection of unrecorded environmental challenges in high-frequency recorded traits, and genetic

determinism of resilience to challenge, with an application on feed intake in lambs. Genetics Selection Evolution 53, 1-14.

Gautier P., Le Doaré C., 2019. Observatoire de l'alimentation des vaches laitières françaises : que trouve-ton au menu des vaches laitières françaises? Idele FCEL and CNIEL

Gauthier R., 2021. PhD thesis – Système d'alimentation de précision des truies en lactation par modélisation et machine learning. Research units: INRAE UMR PEGASE and INRIA Equipe LACODAM. 252 pages

Gilmore H.S., Young F.J., Patterson D.C., Wylie A.R.G., Law R.A., Kilpatrick D.J., Elliott C.T., and Mayne C.S., 2011. An evaluation of the effect of altering nutrition and nutritional strategies in early lactation on reproductive performance and estrous behavior of high-yielding Holstein-Friesian dairy cows. Journal of Dairy Science 94, 3510-3526.

Gowda N.K.S., Manegar A., Raghavendra A., Verma S., Maya G., Pal D.T., Suresh K.P., and Sampath K.T., 2013. Effect of protected fat supplementation to high yielding dairy cows in field condition. Animal Nutrition and Feed Technology 13, 125-130.

Gomez A., and Cook N.B., 2010. Time budgets of lactating dairy cattle in commercial freestall herds. Journal of Dairy Science 93, 5772-5781.

Hardie L.C., VandeHaar M.J., Tempelman R.J., Weigel K.A., Armentano L.E., Wiggans G.R., Veerkamp R.F., de Haas Y., Coffey M.P., Connor E.E., Hanigan M.D., Staples C., Wang Z., Dekkers J.C.M., Spurlock D.M., 2017. The genetic and biological basis of feed efficiency in mid-lactation Holstein dairy cows. Journal of Dairy Science 100, 9061–9075.

Heuer C., Van Straalen W.M., Schukken Y.H., Dirkzwager A., and Noordhuizen J.P.T.M., 2000. Prediction of energy balance in a high yielding dairy herd in early lactation: model development and precision. Livestock Production Science 65, 91-105.

INRA, 2018. Alimentation des ruminants. ed. Nozière P., Sauvant D., Delaby L. Editions Quae, Versailles, France, 728 p.

Jensen C., 2014. Milk and growth responses to energy intake in dairy cattle – in the perspective of the non-additive feed evaluation ssytem – NorFor. PhD thesis. Science and Technology, Aarhus University. 105 pages

Jensen L.M., Markussen B., Nielsen N.I., Nadeau E., Weisbjerg M.R., and Norgaard P., 2016. Description and evaluation of a net energy intake model as a function of dietary chewing index. Journal of Dairy Science 99, 8699-8715.

Klei L.R., Lynch J.M., Barbano D.M., Oltenacu P.A., Lednor A.J., and Bandler D.K., 1997. Influence of milking three times a day on milk quality. Journal of Dairy Science 80, 427-436.

Knight C.H., 2005. Extended lactation: Turning theory into reality. Advances in Dairy Technology 17, 113-123.

Kolver E.S., and Muller L.D., 1998. Performance and nutrient intake of high producing Holstein cows consuming pasture or a total mixed ration. Journal of Dairy Science 81, 1403-1411

Leman A.D., 1992. Optimizing farrowing rate and litter size and minimizing nonproductive sow days. The Veterinary clinics of North America. Food animal practice 8, 609-21.

Laisse S., Baumont R., Dusart L., Gaudré D., Rouillé B., Benoit M., Veysset P., Rémond D., Peyraud J.L., 2018. L'efficience nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine. INRAE Prod. Anim. 31, 269–288.

Little M.W., O'Connell N.E., and Ferris C.P., 2016. A comparison of individual cow versus group concentrate allocation strategies on dry matter intake, milk production, tissue changes, and fertility of Holstein-Friesian cows offered a grass silage diet. Journal of Dairy Science 99, 4360-4373.

Machado S.C., McManus C.M., Stumpf M.T., and Fischer V., 2014. Concentrate: forage ratio in the diet of dairy cows does not alter milk physical attributes. Tropical Animal Health and Production 46, 855-859.

Madsen T.G., Nielsen M.O., Andersen J.B., and Ingvartsen K.L., 2008. Continuous lactation in dairy cows: effect on milk production and mammary nutrient supply and extraction. Journal of Dairy Science 91, 1791-1801.

Maltz E., Barbosa L.F., Bueno P., Scagion L., Kaniyamattam K., Greco L.F., De Vries A., and Santos J.E., 2013. Effect of feeding according to energy balance on performance, nutrient excretion, and feeding behavior of early lactation dairy cows. Journal of Dairy Science 96, 5249-5266

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.

Merlot E., Quesnel H., Prunier A., 2013. Prenatal stress, immunity and neonatal health in farm animal species. Animal 7, 2016-2025

Nguyen-Ba H., van Milgen J., Taghipoor M., 2020. A procedure to quantify the feed intake response of growing pigs to perturbations. Animal 14, 253-260.

Nizzi E., Boudon A., and Gaillard C., 2022. Détection d'évènements sanitaires ou techniques à partir de données individuelles d'abreuvement en truies gestantes. Journées Recherche Porcine, 54 (2 pages)

NRC, 2012. Nutrient Requirements of Swine, 11th ed., National Academy Press, Washington, DC

Osterman S., and Bertilsson J., 2003. Extended calving interval in combination with milking two or three times per day: effects on milk production and milk composition. Livestock Production Science 82, 139-149.

Pearson R.E., Fulton L.A., Thompson P.D., and Smith J.W., 1979. 3 times a day milking during the first half of the lactation. Journal of Dairy Science 62, 1941-1950.

Phuong H.N., Martin O., de Boer I.J.M., Ingvartsen K.L., Schmidely P., and Friggens N.C., 2015. Deriving estimates of individual variability in genetic potentials of performance traits for 3 dairy breeds, using a model of lifetime nutrient partitioning. Journal of Dairy Science 98, 618–632.

Portier B., Brocard V., Le Meur D., Lopez C., 2003. Effets du niveau de complémentation sur les performances et le coût alimentaire des vaches laitières. Rencontres Recherches Ruminants 10, 361–368.

Pryce J.E., Royal M.D., Garnsworthy P.C., and Mao I.L., 2004. Fertility in the high-producing dairy cow. Livestock Production Science 86, 125-135.

Purcell P.J., Law R. A., Gordon A.W., McGettrick S.A., and Ferris C.P., 2016. Effect of concentrate feeding method on the performance of dairy cows in early to mid-lactation. Journal of Dairy Science 99, 2811-2824.

Quesnel H., Père M.C, Louveau I., Lefaucheur L., Perruchot M.H., Prunier A., Pastorelli H., Meunier-Salaün M. C., Gardan-Salmon D., Merlot E., Gondret F., 2018. Sow environment during gestation: part II. Influence on piglet physiology and tissue maturity at birth. Animal 13, 1440–1447

Quiniou N., 2016. Conséquences de l'hétérogénéité des réserves corporelles de la truie à la fin de la gestation sur le déroulement de la mise bas et les performances de lactation. Journées de la Recherche Porcine 48, 207-2012

Ratnayake D., Berglund B., Bertilsson J., Forsberg M., and Gustafsson H., 1998. Fertility in dairy cows managed for calving intervals of 12, 15 or 18 months. Acta Veterinaria Scandinavica 39, 215-228.

Rinne M., Jaakkola S., Kaustell K., Heikkila T., and Huhtanen P., 1999. Silages harvested at different stages of grass growth v. concentrate foods as energy and protein sources in milk production. Animal Sciences 69, 251-263.

Rydhmer L., Lundeheim N., Canario L., 2008. Genetic correlations between gestation length, piglet survival and early growth. Livestock Science 115, 287-293.

Smith J.W., Ely L.O., Graves W.M., and Gilson W.D., 2002. Effect of milking frequency on DHI performance measures. Journal of Dairy Science 85, 3526-3533

Strusinska D., Minakowski D., Pysera B., and Kaliniewicz J., 2006. Effects of fat-protein supplementation of diets for cows in early lactation on milk yield and composition. Czech Journal of Animal Science 51, 196-204.

Tan Peck Yen F., 2015. Master Thesis: Impact of dietary calcium and phosphorus on sow reproductive performance and bone development in piglets. University of Saskatchewan, Canada, 152 pages

Tempelman R.J., Spurlock D.M., Coffey M., Veerkamp R.F., Armentano L.E., Weigel K.A., de Haas Y., Staples C.R., Connor E.E., Lu Y., VandeHaar M.J., 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.

Trottier N.L., Johnston L.J., de Lange C.F.M., 2015. Applied amino acid and energy feeding of sows. Chapter 6. In: C. Farmer, editor, The gestating and lactating sow. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands, p. 117-145

van Riet M.M.J., Millet S., Aluwé M., Janssens G.P.J., 2013. Impact of nutrition on lameness and claw health in sows. Livestock Science 156, 24–35.

Veerkamp R.F., Beerda B., and van der Lende T., 2003. Effects of genetic selection for milk yield on energy balance, levels of hormones, and metabolites in lactating cattle, and possible links to reduced fertility. Livestock Production Science 83, 257-275

Vérité R., Delaby L., 1998. Conduite alimentaire et rejets azotés chez la vache laitière. Interrelations avec les performances. Rencontres Recherches Ruminants 5, 185–192.

Weary D.M., Huzzey J.M., and von Keyserlingk M.A., 2009. Board-invited review: Using behavior to predict and identify ill health in animals. Journal of Animal Sciences 87, 770-777.

Woyengo T.A., Beltranena E., Zijlstra R.T., 2014. Controlling feed cost by including alternative ingredients into pig diets: A review. Journal of Animal Science 92, 1293-1305.

ANNEXES

ANNEXE 1 – CV

Charlotte GAILLARD

Researcher at INRAE, FRANCE

CONTACT

16 Le Clos, 35590 St-Gilles, FRANCE, + 33 (0)6 95 35 88 45
charlotte.gaillard@inrae.fr

SKILLS

PROJECT MANAGEMENT
FUND RAISING
DATA ANALYSIS (R, Python)
MODELLING
SCIENTIFIC WRITTING
PUBLIC SPEAKING
MENTORING

SCORES Au 04/02/2022

H-index 10 | RG-score 25.7

25 peer-reviewed papers
29 abstracts for conferences

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7896-2520

EDUCATION

2016 **PhD, Aarhus University, Denmark**
"Individualized feeding strategies supporting extended lactation on dairy cows", **REPROLAC EU project**
Laboratory Animal Science, FELASA B

2012 **Agricultural engineer, AgroCampus Ouest Rennes, France.** Internships:
"Fear and social transmission on horses" and "Importance of the maternal resources for the calf's welfare", **AU, Denmark**
"Effects of social versus individual rearing of dairy calves on cognitive performance", **UBC, Canada**

2009 Scientific preparatory classes, biology major (~ BSc), Poitiers, France

2006 A-levels scientific mathematic option, Poitiers, France

PROFESSIONNAL EXPERIENCES

Since 2017 **Researcher, INRAE, France**
Topic of interest: Precision feeding for sows and dairy cows

2017 **PostDoc, AU, Denmark**
"Use of milk metabolites to predict risk cows", **GplusE EU project**
"Alternative feeding strategies for dairy cows (seaweeds)"

2016 **Research Assistant, AU, Denmark**
"Alternative feeding strategies for dairy cows (DDGS)"
"Sow's welfare during the transportation to slaughter house"
"Do cattle, sheep and horses need shelter during summer in Denmark?"

- ✓ **Editor of ANIMAL Open Space**, new journal of ANIMAL (https://animal-journal.eu/)
- ✓ Belongs to the **Scientific Board of ANIMAL**
- ✓ **Jury member** of the INNOV SPACE 2021 (https://uk.space.fr/EN/innovspace.aspx

INTERESTS

RESEARCH FUNDING

Rennes Metropole, AIS (grant for young researcher) (2020)
UMT DIGIPORC, IRAE – IFIP, 1 half grant for 1 PhD (2022)
INRAE, 5 research grants (from 2017) , 2 half grants for 2 PhD (2020, 2022)
#DIGITAG digital agriculture convergence lab (https://www.hdigitag.fr/en/), ½ PhD grant (2020)

RECENT PROJECTS & COLLABORATIONS

Feed-a-Gene https://www.feed-a-gene.eu (2017-2019), **23 partners (8 EU + China)**
Development, implementation and validation of a model (SOFEE) predicting the nutritional requirements of each sow each day. Used to plan feeding strategies evaluated on experimental farm.

SOWELL & SOLIFE – sows' precision feeding

SOWELL (2020-2023), collaboration with **CDPQ, Canada**: measure, quantify and integrate individual behaviors in the model SOFEE

SOLIFE (2022-2025), collaboration **with IFIP, France**: study of the long long-term effects of precision feeding strategies on sows' health and productivity.

WIN Feed & LACTALIM – New feeding strategies for dairy cows

WIN Feed (2020-2022), collaboration **with INRAE AgroParisTech, France**: interest and feasibility of a individualized feeding strategy for dairy cows + to study and improve a prediction model of the performances of dairy cows regarding different feeding strategies.

LACTALIM (2020-2022), in collaboration **with Aarhus University, Denmark**: determine if lactose in blood and in milk can be relevant indicators of persistency to integrate into dairy cow nutritional models.

Previous projects & publications on http://chargaillard.wix.com/mycv

TEACHING & MANAGEMENT

Mentoring of
1 PhD student (2020-23)
7 Master (MSc) students (2014, 2020, 2021)

Teaching at
AgroCampusOuest, France:
Precision Farming (MSc), (2019-20-21-22)
AgroSup Dijon, France :
Precision Feeding (MSc), 2021
Aarhus University, Denmark :
Milk production & quality (BSc) (2014-15-16)
Animal Behavior & Welfare (BSc) (2016)
Animal anatomy & physiology (BSc) (2014-16)
Quantitative animal nutrition & physiology (Msc) (2013-14)

CONFERENCES

ASAS-NANP 2021, Louisville, US, **Invited Speaker**

EAAP 2014-15-16-19-20-21-22
2019-22: **Invited speaker**
2016: **Best Poster** of Cattle session & Physiology session

JRP 2018-19-20-21-22 Paris, France

ESLAV-ECLAM 2016, Lyon, France

8th ICFAE, 2015, Billund, Denmark

ADSA 2015, Orlando, US

3R, 2014, Paris, France

ISNP-ISRP 2014, Canberra, Australia

ANNEXE 2 – Liste des publications

Les noms des étudiants et doctorants que j'ai encadrés ou co-encadrés sont soulignés.

- ✓ ***Articles scientifiques***

[30] Gaillard C., Boutinaud M., J. Flament. Prediction of lactation persistency of dairy cows. Journal of Dairy Sciences (en cours de rédaction)

[29] Menendez H., J. Brennan, S. Neethirajan, **C. Gaillard**, Jacobs, M., A. Renus, L. Tedeshi 2022. **Invited Review**: Opportunities and Challenges of Confined and Extensive Precisions Livestock Production. Journal of Animal Sciences (soumis)

[28] Jacobs M., A. Renus, H. Menendez, J. Brennan, S. Neethirajan, **C. Gaillard**, L. Tedeshi. 2022. **Invited Review**: Vision and potential next steps for modeling and data analytics in the animal sciences. Journal of Animal Sciences (soumis)

[27] Durand M., **C. Gaillard,** C. Largouët. 2022. **Invited Review**: Machine learning for livestock precision feeding. Animal (soumis)

[26] Gaillard, C., Dourmad, J.Y. 2022. Application of a precision feeding strategy for gestating sows. Animal Feed Science and Technology (révisions mineures)

[25] Durand M., C. Largouët, J.-Y. Dourmad, C. Tallet, **C. Gaillard.** 2022. Alimentation de précision des truies gestantes: prise en compte de la santé, du comportement et de l'environnent. INRAE productions animales

[24] Dourmad J.Y., R. Gauthier, **C. Gaillard.** 2021. Évolution des concepts nutritionnels et des méthodes d'alimentation des truies

reproductrices : historique et perspectives. INRAE productions animales, 34(2), 111-126

[23] Dourmad J.Y., R. Gauthier, **C. Gaillard**. 2021. Évolution des concepts nutritionnels et des méthodes d'alimentation des truies reproductrices : historique et perspectives. Journées Recherche Porcine, 53, 12 pages

[22] Gaillard C., M. Durand, C. Largouët, J.-Y. Dourmad, and C. Tallet. 2021. Review: effects of the environment and animal behavior on nutrient requirements for gestating sows: Future improvements in precision feeding. Animal Feed Science and Technology 279:115034

[21] Gaillard C., N. Quiniou, R. Gauthier, L. Cloutier, J Dourmad. 2020. Evaluation of a decision support system for precision feeding of gestating sows. Journal of Animal Science

[20] Gaillard C., L. Brossard, J.Y. Dourmad. 2020. Review: Improvement of feed and nutrient efficiency in pig production through precision feeding. Animal Feed Science and Technology, 268

[19] Foldager L., **C. Gaillard,** M. T. Sorensen, T. Larsen, E. Matthew, R. O'Flaherty, F. Carter, M.A. Crowe, C. Grelete, M. Salavatif, M. Hostensg, GplusE Consortium, K.L. Ingvartsen, M. A. Krogh. 2020. Predicting physiological imbalance in Holstein dairy cows by three different sets of milk biomarkers. Preventive Veterinary Medicine

[18] Gaillard C., R. Gauthier, L. Cloutier, J.Y. Dourmad. 2019. Exploration of individual variability to better predict the nutrient requirements of gestating sows. Journal of Animal Science, 97:4934–4945

[17] Sehested J., **C. Gaillard,** J. Lehmann, G. Maciel, M. Vestergaard, M.R. Weisbjerg, T. Kristensen. 2019. Review: Extended lactation in dairy cattle. Animal, 13(S1), S65-S74.

[16] Gauthier R., C. Largouët, **C. Gaillard**, L. Cloutier, F. Guay, J.Y. Dourmad. 2019. Dynamic modeling of nutrient use and individual requirements of lactating sows. Journal of Animal Science, 97(7):2822–2836

[15] Gauthier R., C. Largouët, **C. Gaillard**, L. Cloutier, F. Guay, J.Y. Dourmad. 2019. Modélisation dynamique de l'utilisation des nutriments et des besoins individuels chez la truie en lactation. Journées Recherche Porcine, 51, 117-122

[14] Gaillard C., H. S. Bhatti, M. Novoa-Garrido, V. Lind, M. Y. Roleda, M. R. Weisbjerg. 2018. Amino acid profiles of nine seaweed species and their in situ degradability in dairy cows. Animal Feed Science and Technology, 241:210-222

[13] Gaillard C., M.T. Sørensen, M.Vestergaard, M.R. Weisbjerg, M. K. Larsen, H. Martinussen, U. Kidmose, J. Sehested. 2018. Effect of substituting barley with glycerol as energy feed on feed intake, milk production and milk quality in dairy cows in mid or late lactation. Livestock Science, 209:25-31

[12] Gaillard C., M.T. Sørensen, M.Vestergaard, M.R. Weisbjerg, A. Basar, M. K. Larsen, H. Martinussen, U. Kidmose, J. Sehested. 2017. Effect of substituting soybean meal and canola cake with grain based DDGS on two dietary crude protein levels on feed intake, milk production and milk quality in dairy cows. Journal of Dairy Science, 100:7980-7989

[11] Gaillard C., M.T. Sørensen, M.Vestergaard, M.R. Weisbjerg, A. Basar, M. K. Larsen, H. Martinussen, U. Kidmose, J. Sehested. 2017. Effect of substituting soybean meal and canola cake with grain based DDGS as protein feed on feed intake, milk production and milk quality in dairy cows. Journal of Dairy Science, 100:8928-8938

[10] Herskin M.S., K.K. Fogsgaard, D. Erichsen, M. Bonnichsen, **C. Gaillard**, K. Thodberg. 2017. Housing of cull sows in the hours before

transport to the abattoir – An initial description of sow behaviour while waiting in a transfer vehicule. Animals, 7:1-8

[9] Gaillard C., O. Martin, P. Blavy, N. Friggens, J. Sehested, H. Phuong. 2016. Prediction of the reproductive lifetime performance of Holstein cows managed for different durations, using a model of lifetime nutrient partitioning. Journal of Dairy Science, 99:9126-9135

[8] Maciel G., N. Poulsen, M. Larsen, U. Kidmose, **C. Gaillard**, J. Sehested, L. Larsen. 2016. Good sensory quality and cheesemaking properties in milk from Holstein cows managed for 18 months calving interval. Journal of Dairy Science, 99:8524-8536

[7] Gaillard C., J. Sehested and M. Vestergaard. 2016. Effects of delayed insemination and double insemination technique on the reproductive performance of Holstein cows. Journal of Agricultural Science and Technology A, 5:64-68

[6] Gaillard C., H. Barbu, H. Callesen, M. T. Sørensen, J. Sehested, M. Vestergaard. 2016. Milk yield and estrus behavior during eight consecutive estruses of Holstein cows grouped according to live weight change in early lactation. Journal of Dairy Science, 99:3134:3143

[5] Gaillard C., N. C. Friggens, M. Taghipoor, M. R. Weisbjerg, J. O. Lehmann, J. Sehested. 2016. Effects of an individual weight-adjusted feeding strategy in early lactation on milk production of Holstein cows during extended lactation. Journal of Dairy Science, 99:2221:2236

[4] Lehmann J. O., J. G. Fadel, L. Mogensen, T. Kristensen, **C. Gaillard**, and E. Kebreab. 2016. Effect of calving interval and parity on milk yield per feeding day in Danish commercial dairy herds. Journal of Dairy Science, 99:621-33

[3] Gaillard C., M. Vestergaard, M. R. Weisbjerg, J. Sehested. 2016. Effects of individualized feeding strategy in early lactation on indicators of energy balance in Holstein cows managed for extended lactation. Animal, 10:633-642

[2] Gaillard C., R.K. Meagher, M.A.G. von Keyserlingk, D.M. Weary. 2014. Social Housing Improves Dairy Calves' Performance in Two Cognitive Tests. PLoS ONE, 9(2): e90205. doi:10.1371/journal.pone.00902

[1] Christensen J.W., L.P. Ahrendt, R. Lintrup, **C. Gaillard**, R. Palme, J. Malmkvist. 2012. Does learning performance in horses relate to fearfulness, baseline stress hormone and social rank? Applied Animal Behaviour Science, 140, 44-52

- ✓ ***Chapitre d'ouvrages, rapport diplômants***

Brossard L., J. van Milgen, J.Y. Dourmad, **C. Gaillard.** 2021. Book Chapter "Smart pig nutrition in the digital era", in Smart Livestock Nutrition

Gaillard C. 2016. PhD Thesis. Extended lactation and feeding strategies. 173 pages

- ✓ ***Communications lors de congrès***

Orsini C., M. Durand, **C. Gaillard.** 2022. Effet de l'enrichissement de l'environnement sur le comportement des truies gestantes. Journées Recherche Porcine, 54 (2 pages)

Nizzi E., A. Boudon, **C**. **Gaillard.** 2022. Détection d'évènements sanitaires ou techniques à partir de données individuelles d'abreuvement en truies gestantes. Journées Recherche Porcine, 54 (2 pages)

Abarnou J., M. Durand, **C. Gaillard.** 2022. Effet de stress thermiques sur le comportement et les besoins nutritionnels de truies en gestation. Journées Recherche Porcine, 54 (2 pages)

Durand M., **C**. **Gaillard.** 2022. Comportement de truies gestantes en situation de compétition alimentaire. Journées Recherche Porcine, 54 (2 pages)

Lanthony M., M. Durand, C. Guérin, **C. Gaillard,** C. Tallet. 2022. Hiérarchie dans les groupes de truies gestantes : méthodes de calcul, caractéristiques et lien avec les données d'alimentation. Journées Recherche Porcine, 54 (6 pages)

Durand M., D. Renaudeau, **C. Gaillard**. 2021. Use of infrared thermography and rectal thermometer to measure body temperature of gestating sows. EAAP, Davos, Switzerland, oral presentation at session 44 "PLF methods for measuring health, welfare and caring for individual animals"

Durand M., **C. Gaillard**. 2021. Effect of feed competition on activity and social behaviour of gestating sows. EAAP, Davos, Switzerland, oral presentation at session 42 "Inclusive livestock nutrition: where we have a trade-off between performance, environmental sustainability and animal welfare"

Gaillard C., O. Martin. 2021. Can a virtual cow model help precision feeding in dairy cattle? EAAP, Davos, Switzerland, oral presentation at session 72 "Methods and technologies for research and smart nutrition management in dairy and beef cattle"

Gaillard C., M. Durand. 2021. Effect of sudden noises on gestating sows' behaviour. EAAP, Davos, Switzerland, oral presentation at session 58 "Animal behaviour: from horses to hens"

Gaillard C., R. Gauthier, J.Y. Dourmad. 2021. Integrating mechanistic models with AI for precision feeding of sows. ASAS-NANP Pre-Conference Symposium 2021, Louiseville, Kentucky, USA (**Invited speaker**)

Gaillard C., A. Julienne, J.Y. Dourmad. 2021. Comportement alimentaire des truies en gestation recevant une alimentation de précision. Journées Recherche Porcine, 53, 201-202

Dourmad J.Y., R. Gauthier, **C. Gaillard**. 2021. Évolution des concepts nutritionnels et des méthodes d'alimentation des truies reproductrices : historique et perspectives. Journées Recherche Porcine, 53, 12 pages

Gaillard C., R. Gauthier, J.Y. Dourmad. 2020. Gestating sows' feeding behaviour with precision feeding. EAAP virtual meeting, oral presentation. Book of abstract, p 112

Gaillard C., R. Gauthier, J.Y. Dourmad. 2019. Modélisation dynamique de l'utilisation des nutriments et des besoins individuels des truies: vers un nouveau paradigme. Défis scientifiques Phase, Nov 2019, Rennes, France. 2019, Recueil des résumés.

Gaillard C., R. Gauthier, J.Y. Dourmad. 2019. Mineral precision feeding for gestating sows. EAAP Ghent, Belgium, oral presentation session 46 Innovative approaches (competition)

Gaillard C., R. Gauthier, J.Y. Dourmad. 2019. Variability in gestating sows' nutrient requirements. EAAP Ghent, Belgium, **Invited speaker,** session 50 "Sow and gilt nutrition"

Gauthier R., C. Largouët, **C. Gaillard**, L. Cloutier, F. Guay. 2019. Modélisation dynamique de l'utilisation des nutriments et des besoins individuels chez la truie en lactation. JRP 2019 - 51èmes Journées de la Recherche Porcine, Feb 2019, Paris, France. pp.117-122.

Gaillard C., L. Brossard. 2018. Des données par millions - Elevage et alimentation de précision : une valeur à créer par la collecte et la maitrise des données. SPACE, Rennes

Thodberg K., K.K. Fogsgaard**, C. Gaillard**, H.S. Herskin. 2017. Changes in scratches and skin elasticity in cull sows after transport to the abattoir ASAS-CSAS Annual Meeting & Trade Show in Baltimore, MD.

Gaillard C., K.K. Fogsgaard, K. Thodberg, H.S. Herskin. 2016. Variation of a temperature-humidity index in the truck transporting

sows to slaughter. ESLAV-ECLAM Annual Scientific Meeting on Animal Welfare, Lyon, France

Herskin H.S., K.K. Fogsgaard, D. Erichsen, M. Bonnichsen, **C. Gaillard**, K. Thodberg. 2016. Housing of culled sows in the hours before transport top the abattoir - description of sows behavior while waiting in a pick-up vehicule. ESLAV-ECLAM Annual Scientific Meeting on Animal Welfare, Lyon, France

Gaillard C., H.N. Phuong, P. Blavy, J. Sehested. 2016 Simulations to define the optimum lifetime management for Holstein cows. Book of abstracts of the 67th Annual meeting of the European Federation for Animal Science, Belfast, UK

Gaillard C., M. Vestergaard, J. Sehested. 2016. Voluntarily delayed rebreeding and double insemination effects on pregnancy rates of Holstein cows. Book of abstracts of the 67th Annual meeting of the European Federation for Animal Science, Belfast, UK **[Best Poster of cattle session and physiology session]**

Gaillard C., M. Vestergaard, J. Sehested. 2015. Effects of estrus number on milk yield and estrus expression in Holstein cows managed for extended lactation. J. Anim. Sci. Vol. 93, Suppl. s3/J. Dairy Sci. Vol. 98, Suppl. 2, p. 383

Gaillard C., N.C. Friggens, M.R. Weisbjerg, J. Sehested. 2015. Carry-over effect of an individual feeding strategy on milk production of Holstein cows managed for extended lactation. J. Anim. Sci. Vol. 93, Suppl. s3/J. Dairy Sci. Vol. 98, Suppl. 2, p 286

Sehested J., **C. Gaillard**, T. Kristensen, J.O. Lehmann, L. Mogensen, et al. 2016. Extended lactation in dairy cows. 67. Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP), Belfast, United Kingdom.

Martin O., **C. Gaillard,** J. Sehested, N.C. Friggens. 2015. Using a dairy cow model to interpret in vivo individual data and to upscale results at

herd level through in silico experiments. Book of abstracts of the 66th Annual meeting of the European Federation for Animal Science, Warsow, Poland, vol 21, p.301

Gaillard C., M. Vestergaard, M.R. Weisbjerg, J. Sehested. 2014. Effect of individualized feeding strategy on plasma indicators of energy balance in Holstein cows during the 12 first weeks of lactation. Proceedings of the Australian Society of Animal Production, vol. 30, p. 80.

Gaillard C., M. Vestergaard, M.R. Weisbjerg, J. Sehested. 2014. Effect of individualized feeding strategy on milk production of Holstein cows. European Association for Animal Production. Annual Meeting, Copenhaguen, Denmark. Book of Abstracts, Vol. 20, p. 103.

- ✓ ***Communications orales invitées***

Gaillard C., R. Gauthier, J.Y. Dourmad. 2021. Integrating mechanistic models with AI for precision feeding of sows. ASAS-NANP Pre-Conference Symposium 2021, Louiseville, Kentucky, USA

Gaillard C., R. Gauthier, J.Y. Dourmad. 2019. Variability in gestating sows' nutrient requirements. EAAP Ghent, Belgium, session 50 "Sow and gilt nutrition"

- ✓ ***Autres produits ou documents***

Gaillard C., T. Kristensen, J. Sehested. 2015. Extended lactation strategies. DCA Report, vol 60, 48-5

Gaillard C., J. Sehested. 2014. Forlænget laktation - effekt af brunst på mælkeproduktion. Ny KvægForskning, Vol. 4, Nr. 12, s.2-3.

Roy H., **C. Gaillard**, P. Grelier, R. Monteville, E. Turmeau. Mai-juin 2012. Eau de boisson : un traitement au cas par cas. TechPorc, n°5, 31-33.

HDR - Résumé

Ce mémoire a été rédigé en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des travaux de Recherche (HDR). Il est structuré en trois parties : la présentation de mon parcours et de mes quatre axes de recherches, le résumé des résultats les plus marquants de mes différents projets de recherches, et une description de mes projets à venir.

Ces dix dernières années j'ai développé des recherches en sciences animales à une échelle internationale, sur plusieurs espèces et disciplines dans des centres d'excellence. La plus grande partie de mon travail porte sur l'alimentation sur mesure des vaches laitières et des truies, c'est-à-dire l'apport d'une ration ajustée fréquemment (chaque jour ou chaque semaine) en quantité et composition à une échelle individuelle. Cette stratégie d'alimentation s'est développée suite à l'identification d'une importante variabilité inter- et intra-individuelle des besoins nutritionnels (axe 1), et grâce à la mise en place de modèles permettant l'estimation de ces besoins ainsi qu'au développement de nouvelles technologies (alimentateurs, capteurs). Ces modèles couplés à des jeux de données permettent notamment d'effectuer des simulations (axe 2) afin de déterminer les effets de différentes stratégies alimentaires sur les performances de l'animal et sur les rejets environnementaux, avant d'en évaluer certaines en fermes expérimentales (axe 3). Des données complémentaires, comme la température extérieure ou l'activité de l'animal, peuvent être ajoutées au modèle afin d'améliorer la prédiction des besoins nutritionnels des animaux (axe 4).

Chez les truies, l'ajustement individuel et journalier de la composition en acides aminés et de la quantité des rations permet la diminution du coût alimentaire et des rejets environnementaux sans impacter les performances de l'animal. Une fois programmés, les alimentateurs automatiques permettent la distribution d'une ration individualisée. L'amélioration de cette stratégie alimentaire passera notamment par un ajustement des apports alimentaires selon les besoins en protéines mais

également ceux en minéraux. A plus long terme, l'utilisation des données collectées en élevage grâces aux automates et aux capteurs devrait également permettre de mettre au point un système d'alertes et éventuellement d'actions pour garantir le bien-être de chaque animal.

Chez les vaches laitières, la mise en place de l'alimentation sur mesure est plus difficile. Le choix de la variable d'ajustement de l'alimentation est un premier problème qui nécessite plus d'investigation quant aux profils des vaches. L'ajustement de la proportion en énergie de la ration par rapport au gain de poids de l'animal est une piste à développer, qui semble induire un effet positif à court terme sur la production laitière sans impacter les performances de reproduction. De plus, la réflexion sur l'alimentation sur mesure peut être combinée au choix de la durée de la lactation imposée via la date d'insémination afin de proposer les meilleurs scénarios en termes de performances de production et de reproduction.

Pour les truies et les vaches laitières, les ressources alternatives aux sources de protéines actuelles feront l'objet d'un futur projet de recherche afin, notamment, de limiter la concurrence entre l'alimentation humaine et l'alimentation animale, et d'identifier les nouvelles ressources à faible coût selon les différents pays et régions. Il faudra également définir les potentiels impacts de ces ressources sur les performances animales et environnementales, et établir des seuils d'intégration aux rations des animaux.

HDR – Summary

This document was written to obtain the Habilitation to supervise research works (HDR). It is structured in three parts: the presentation of my background and my four areas of research, the summary of the most significant results of my various research projects, and a description of my future projects.

Over the past ten years I have developed research projects in animal sciences at an international scale, on several species and disciplines, in centers of excellence. Most of my work relates to tailored feeding of dairy cows and sows, i.e. the supply of a ration adjusted frequently (every day or every week) in quantity and composition at an individual scale. This feeding strategy was developed following the identification of significant inter- and intra-individual variability in nutrient requirements (axis 1), and thanks to the implementation of models allowing the estimation of these requirements as well as the development of new technologies (feeders, sensors). These models coupled with data sets make it possible to carry out simulations (axis 2) in order to determine the effects of different feeding strategies on the performance of the animal and on environmental releases, before evaluating some of them on experimental farms (axis 3). Additional data, such as the outside temperature or the activity of the animal, can be added to the model in order to improve the prediction of the nutrient requirements of the animals (axis 4).

For the sows, the individual and daily adjustments of the amino acid composition and the quantity of the rations allow the reduction of feed costs and environmental emissions without impacting the performance of the animal. Once programmed, the automatic feeders allow the distribution of an individualized ration. Improving this feeding strategy will involve adjusting feed intake according to protein and mineral requirements simultaneously. In the longer term, the use of data collected on farm thanks to the automatons and sensors should also make it possible to develop an alert system and eventually actions to guarantee the well-being of each animal.

For the dairy cows, the implementation of an individual and daily-adjusted ration is more difficult. The choice of the adjustment variable is a first problem that requires more investigation regarding the profiles of the cows. Adjusting the proportion of energy in the ration in relation to the weight gain of the animal is a possibility to be developed, which seems to induce a positive short-term effect on milk production without affecting the reproductive performance. In addition, this tailored feeding strategy can be combined with the choice of the lactation duration, imposed via the insemination date, in order to offer the best scenarios in terms of production and reproduction performances.

For the sows and dairy cows, alternative resources to current protein sources will be the subject of a future research project in order to limit competition between human food and animal feed, and to identify the new low-cost resources according to different countries and regions. It will also be necessary to define the potential impacts of these resources on animal and environmental performances, and to establish thresholds for inclusion in animal rations.

coolLibri.com

IMPRIMÉ EN FRANCE
Achevé d'imprimer en avril 2022
chez Messages SAS
111, rue Nicolas Vauquelin - 31100 Toulouse
05 31 61 60 42
www.coollibri.com

Stratégies alimentaires

Truies & vaches laitières

Charlotte Gaillard

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) est structuré en trois parties : la présentation de mon parcours et de mes quatre axes de recherches, le résumé des résultats les plus marquants de mes différents projets de recherches et une description de mes projets à venir.

Mes travaux de recherche portent sur la mise en place de nouvelles stratégies alimentaires pour les vaches laitières et les truies afin de réduire les coûts alimentaires et les rejets environnementaux, tout en prenant en compte le bien-être animal.

PIROULETTE & TABAHIO Editeurs
168 rue Georges Guynemer
86000 POITIERS
Siret 44197141300022