

THESE DE DOCTORAT DE

L'INSTITUT AGRO RENNES ANGERS

ECOLE DOCTORALE N° 600

Ecologie, Géosciences, Agronomie, Alimentation

Spécialité : Biologie et physiologie animales

Par

Clément RIBAS

Nouvelles stratégies d'alimentation sur mesure pour la carrière des truies

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le jeudi 27 novembre 2025

Unités de recherche : Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Élevage -

UMR 1348 AO INRAE 1348 [PEGASE], 35590 Saint-Gilles, France

IFIP-Institut du Porc, 35740 Pacé, France

Thèse N° : 2025AGRORA17

Rapporteurs avant soutenance :

Giuseppe BEE
Marie-Pierre LÉTOURNEAU-MONTMINY

Directeur de recherche, Agroscope, Suisse
Professeure, Université Laval, Québec, Canada

Composition du Jury :

Président : Yannick LE COZLER
Examineurs : Giuseppe BEE
Marie-Pierre LÉTOURNEAU-MONTMINY
Yannick LE COZLER
Isabelle VEISSIER
Agnès NARCY
Clément ALLAIN
Dir. de thèse : Charlotte GAILLARD
Co-dir. de thèse : Nathalie QUINIOU

Professeur, Institut Agro Rennes-Angers
Directeur de recherche, Agroscope, Suisse
Professeure, Université Laval, Québec, Canada
Professeur, Institut Agro Rennes-Angers
Directrice de recherche, INRAE
Ingénieure de recherche, INRAE
Chef de projet, Institut de l'Élevage
Chargée de recherche, INRAE
Ingénieure, IFIP-Institut du Porc

«all models are wrong; some are useful»

George E. P. Box

«Ira-t-il jusqu'au bout ? Mystère. Ce que l'on sait, c'est qu'Aristote, à l'instar de Socrate, aura osé tenter l'impossible - condition nécessaire d'un possible grandiose. »

Socrate à vélo, Guillaume Martin-Guyonnet

« Le cochon a toujours souffert d'être trop semblable à l'homme, d'être trop 'humain' »

Le Roi tué par un cochon : une mort infâme aux origines des emblèmes de la France ?, Michel Pastoureau

Remerciements

Je tiens à remercier Giuseppe Bee et Marie-Pierre Létourneau-Montminy d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Merci également à Agnès Narcy, Isabelle Veissier, Yannick Le Cozler et Clément Allain de faire partie de mon jury de thèse. Je remercie mon CSI (Ludovic Brossard, Valérie Courboulay, Agnès Narcy, Mathieu Simon, Laetitia Cloutier et Lisanne Verschuren) pour les échanges fructueux que nous avons eus, pour vos conseils et pour m'avoir aidé à organiser au mieux ma thèse. Merci aux financeurs de ma thèse (INRAE et l'IFIP-Institut du porc) pour m'avoir permis de réaliser ce projet.

Je voudrais infiniment remercier Didier, Kelig, Angélique de la station expérimentale de l'IFIP pour avoir pris soin de mes truies. Merci à Romain, Loréna, Aurélien, Lisa, Sylvie, Nathalie, Mélodie, Anna et Johan dans l'appui à la collecte de données notamment l'urine matinale des truies. Sans vous, je n'aurais pas pu avoir de données à analyser, ni de résultats à discuter. Merci aux membres du projet SOMOVE pour les bons moments partagés durant les COPIL. Je n'oublie pas Maryline, Sophie, Nathalie, Raphaël et Cécile pour votre aide dans mes analyses de laboratoire, étant plutôt un novice dans ce domaine.

Quand je suis entré en école d'ingénieur et que nous faisions des cours de projet professionnel, je n'envisageais pas du tout de faire une thèse. Au contraire, je n'avais pas envie de poursuivre encore et encore mes études. Si je suis là pour écrire ces lignes, c'est que j'ai changé d'avis et que des rencontres ont été fondatrices pour que je suive cette voie. En ce sens je voudrais remercier, Loïc, Guillaume et Kambiz d'Axiom, Caroline d'Hycole, Elisa de Teagasc, Hervé, Ingrid et Hélène de Genphyse ainsi que l'ensemble des doctorants qui ont accepté de répondre à mes multiples questions et de me rassurer sur mes doutes.

Les 3 ans de thèse en France représentent une durée courte et longue à la fois. Courte, si j'énumère l'ensemble des tâches à effectuer. Longue si je compte que c'est quand même plus de 1000 jours et plus de six fois la période d'un stage de M2. J'ai toujours entendu puis ensuite répété à mes compères car je pense que c'est vrai, qu'il y a deux possibilités pour louper une thèse : ne pas aimer foncièrement son sujet ; avoir une relation conflictuelle avec ses encadrants. J'ai pour chance eu des encadrantes formidables, Charlotte, Nathalie sont mes "mamans" de thèse chacune à leur façon. J'ai fortement apprécié leur accompagnement que ce soit dans mes moments de doute et de questionnements nombreux (très nombreux), toujours prêtes à répondre lorsqu'elles avaient un avis ou dans les moments de joies et de bons résultats. Je peux littéralement dire que j'ai écrit ma thèse avec ChatNat® (Merci pour l'idée Auxane Hamon, propriétaire du terme). Merci pour votre accompagnement perpétuel et votre réactivité dans la correction et dans les commentaires des nombreux éléments rédigés.

Merci de m'avoir inculqué cette rigueur scientifique, votre sens de la formule et votre perfectionnisme. Reprendre l'état de l'art avec une correction manuscrite fut l'équivalent d'un treizième travail d'Hercule mais sans ceci, je n'aurais pu atteindre la qualité que je voulais pour mon manuscrit. Merci à mon équipe SYSPORC puis SYSMO dont j'ai fait partie. Grâce à nos échanges, j'ai pu prendre plus de recul sur ma thèse et me sentir plus confiant et légitime au niveau de mon sujet. Je remercie Laurence Thébault, Myriam, Emilie et Gwendal pour les échanges plus généraux que nous avons eus et d'avoir répondu à l'ensemble de mes questions autres que sur la thèse en elle-même. Merci à Jérôme, Nina et Wilfried pour leur bonne humeur journalière et la préparation de déjeuner qui ont ravi mes papilles et m'ont apporté beaucoup de bonheur. Je remercie par avance mon futur employeur qui a cru en moi et valorisé mes compétences de doctorant même avant la fin de thèse ce qui n'est pas le cas de toutes les entreprises.

I would like to thank all the people I met during my PhD exchange at Topigs Norsvin and in particular Rob, Lisanne and Xandra for helping me during my stay and with my project. I met there Arthur, a Brazilian from Canada who has become a very good friend (nationality is an human concept).

Pequeñas palabras ahora y agradecimientos para mis amigos sur-americanos que son "Bolonchos", "Peruanos", "Mexicanos" o de Colombia. Disfrute demasiado la vida con ellos en Argentina, aunque había el Covid. Al pollo (pocho), sabes que tienes un hogar si vienes a Francia y Europa para visitarme. Lo extraño mucho y espero que nos podamos volver a ver de nuevo pronto. No olvido también mis compañeros de España, que encontré en su mayoría en Irlanda.

Je voudrais maintenant remercier les membres non-permanents, mes compagnons d'aventure, mes compères "précaires" avec nos fous rires mémorables en pause au bureau 84, nos discussions philosophiques mais aussi plus frivoles ainsi que l'entretien de notre embonpoint avec divers plaisirs sucrés et salés. A Caroline (la douce enseignante), Anna (la badmintonneuse fofolle), Antoine (l'hermitageois), Ellynn (mon imitatrice favorite ; je pense que tu te souviens parfaitement de mon 1er jour et ce regard horrifié que j'avais en pensant à l' « accent breton », attends lysine ?), Manon (la dessinatrice), Elise (et Pierre, la grande sportive à l'énergie débordante), Angélique (la nouvelle supportrice du LOSC et bien entourée aussi par un Pierre mais pas le même Pierre, bref vous voyez RRRrrr !!!), Jean-Charles (et Elise, le normand adorateur de mon beetroot chocolate cake), Emmanuelle (La pâtissière croque-mort, master des aventuriers du rail), Coco et Abel (les sauveteurs des animaux), Estelle (ma présence toulousaine à PEGASE), Emma (Quentin et la petite Joanne, première titulaire à INRAE), Léa (la nordiste canadienne), Julie (la reportrice TV d'Ouveillan), Maurane

(la spécialiste du labo), Laura (la catalane castellane), Sanlong (le meilleur joueur de paintball), Auxane (coucou morty), Alexandre et Mathilde (les agros), Clément-Marc (mon homonyme, maire marin de Pornichet, qui apparemment organise sa propre cagnotte de thèse). A Clément de Clément (on aura bien rigolé à 3 au foot), Tristan (pote d'Arthur, coloc de Clément, le monde est petit). Je n'oublie pas également les nombreux stagiaires que j'ai côtoyés.

Également une pensée pour les rencontres (ou retrouvailles) des doctorants d'Agreenium (Anne-Cécile, Joseph, Alexandre, Laurine, Mathilde, Oliver (tristesse), Ludovic, Valentin, Camille, Stacy, Corentin, Théo, Marine).

Mention particulière à mes « colocataires » du bureau de Saint-Gilles sans chiffre au fond du couloir de l'extension (mais a fortiori avec une belle luminosité et baie vitrée) peuplé par Cloclo (la parisienne sans pass navigo et adoratrice de R), Maëva (ma grande sœur de thèse ; « oui, oui il y a bien une cantine »), Adrien (le footballeur gaélique montpellierain), Margot (petite sœur de thèse et femme engagée) et Margaux (ma première stagiaire). Pour ceux qui n'ont pas encore terminé, ayez confiance en vous. Tout est question de travail, de motivation et de volonté. J'avoue que c'est plus facile à dire, une fois terminé. La thèse est une aventure de la vie qui a une fin en soi. La décomposer, étape par étape, permet de franchir la « montagne » que représente la thèse comme des petits efforts qui paraissent plus simples à fournir chaque jour.

À mes amis de longue date qui malgré le temps qui passe et la distance qui nous sépare, j'apprécie toujours autant passer du temps avec vous. Je pense à mes amis d'enfance (Arthur, Guilhem, Damien, Fabien, Titouan, Hugo) ; mes collocs de Fermat (Benjamin aka le cinglé du midi de l'Ossau et Basile si un jour tu vois mes messages, n'hésite pas à me répondre), mes petits Hugo et Yuyu, la team « SDF » n'a pas fini de voyager et rigoler. Vous êtes des amis sur qui je peux vraiment compter. A notre famille d'école, la CPT (Acronyme non détaillé pour plus de professionnalisme), hâte de poursuivre avec vous les premiers instants de chaque année.

Je dédie l'entièreté de cette thèse à ma famille, sans vous je ne serais rien. Vous avez beau être à 1000 km (ou plus) de mon lieu de vie, votre soutien sans faille fait partie de mon équilibre et je suis comblé de pouvoir compter sur vous en chaque instant. Je suis fier de représenter les catalans à l'accent chantant en Bretagne. Claude, tu n'es pas de ma famille mais tu es plus que mon entraîneur de vélo, j'ai trouvé en toi, un psychologue et un 3^{ème} grand-père. A mon papa, mon idole sportif, finisher de l'Altriman, rêve mythique de nos montagnes. A ma maman, soutien de tous les instants et sans qui ce manuscrit serait beaucoup plus fourni en fautes d'orthographe. A mon grand-père maternel avec qui je suis très proche, ingénieur agronome comme moi, j'espère que tu seras fier de cette thèse et j'adore toujours autant écouter tes

histoires de voyage pendant des journées entières. Je pense que j'aurai réussi beaucoup de choses quand ma sœur en comprendra un peu plus sur mon « travail avec les cochons ». Je suis fier également que mon frère ait pu s'installer et hâte que tu me fasses les massages post-sortie. J'aimerais pouvoir être avec vous plus souvent.

Merci à Bae sans qui la vie aurait été moins passionnante. Merci de me supporter et me soutenir en chaque instant que ce soit dans les très bons et les mauvais moments. Merci d'accepter autant mes défauts que tu aimes mes qualités. J'espère que tu trouveras cet équilibre que tu mérites tant.

Je ne peux finaliser mes remerciements sans parler de mon "autre" famille, ma famille cycliste. J'y ai fait des rencontres formidables, tous les citer me ferait peur d'en oublier et je préfère qu'ils se reconnaissent à travers ces quelques mots. J'aimerais particulièrement remercier les clubs dont j'ai fait partie : le Vélo Club Saint-Estève, le Canohès Avenir Cycliste 66, l'Amicale Vélo Club Fabrègues, le Béziers Méditerranée Cyclisme et enfin le Cyclo Club Rennes Métropole (L'Hermitage). Patrick, merci d'avoir été là pour m'accompagner dans mes grandes folies et grands objectifs. Il est important d'avoir des rêves un peu fous pour continuer à avancer. Merci à Lolo, Rosita et Léonie sans qui je n'aurais pu prendre le départ de nombreuses fois (j'attends toujours les CRS aux portes du garage). Merci à Pierre, Benjamin, Quentin et Simon pour nos nombreuses discussions hors ou sur le vélo. Je ne peux compter le nombre d'idées pour la thèse ou de déblocage vis-à-vis des problèmes de la thèse que j'ai pu résoudre sur mon vélo. Le cyclisme m'a appris que le travail paye toujours, peut-être pas dans l'immédiat mais forcément un jour. Cette passion m'a tant appris sur moi-même et tant aidé dans les moments difficiles. Elle m'a appris le sens du sacrifice et le partage. Qui aurait pu penser que je fasse mon meilleur résultat cycliste en dernière année de thèse ? Mon meilleur résultat pour l'instant. A mon vélo fidèle compagnon de fortune et d'infortune, à ces milliers de kilomètres passés en tout temps (sous conditions dantesques « Coucou la Bretagne ») et mon esprit léger vagabondant.

Je voudrais finir ces remerciements par ces quelques mots issus de M. Franck Thilliez dont j'admire la prose et le sens du suspense. J'attends chaque année de manière interminable la sortie de son ouvrage. Je voudrais citer un passage de son ouvrage le plaisir de la peur (2022) lorsqu'il parle d'écriture (fort à propos pour un manuscrit de thèse) : « Pour expliquer ce processus de manière claire, j'aime faire l'analogie avec le Tour de France. Je suis un cycliste sur le départ, je connais les étapes du Tour, je sais qu'il y aura des zones tranquilles de plaine et d'autres beaucoup plus compliquées de montagne. Je sais que pour arriver au bout, je dois relier tous les points, mais qu'entre ces étapes tout est possible. Il peut y avoir des chutes, des coureurs vont abandonner, d'autres vont s'illustrer. D'horribles conditions météo imprévues

viendront probablement rebattre les cartes mais, coûte que coûte, moi j'avancerai, parce que je suis mentalement fort et que je me suis préparé à cette course. J'irai le plus loin possible et advienne que pourra. C'est ça l'écriture : votre Tour de France à vous ».

Si une personne se sent oubliée de ces remerciements, je lui saurais gré de ne pas m'en tenir rigueur et que ces quelques lignes ne peuvent pas tout énumérer. J'espère que le lecteur qui sera arrivé jusque-là aura obtenu des émotions positives. Si vous lisez la suite de ce manuscrit, j'espère qu'il vous en procurera tout autant.

Pour finir, une petite énigme :

1-J 6202 UFA FDT ; en Anna vous trouverez la clé.

A bord d'une rame de train corail,

Septembre 2025,

Clément Ribas (Le s se prononce)

Sommaire

REMERCIEMENTS	IV
SOMMAIRE.....	IX
AVANT-PROPOS.....	XII
VALORISATION AU COURS DE LA THESE	XIII
LISTE DES FIGURES	XVI
LISTE DES TABLEAUX.....	XVIII
LISTE DES ABREVIATIONS	XX
INTRODUCTION GENERALE	1
1. ÉTAT DE L'ART	5
1.1. CONDUITE TECHNIQUE DU TROUPEAU DE TRUIES EN ELEVAGE	5
1.1.1. <i>La conduite en bande pour optimiser le travail en suivant le cycle reproductif de la truie</i>	<i>5</i>
1.1.2. <i>Conditions de logement selon le stade physiologique et les systèmes d'alimentation associés ...</i>	<i>6</i>
1.1.3. <i>Caractérisation des performances des truies</i>	<i>8</i>
1.1.4. <i>La sélection génétique : facteur d'évolution des performances au sein des élevages</i>	<i>9</i>
1.2. ESTIMATION DES BESOINS NUTRITIONNELS DE LA TRUIE GESTANTE	12
1.2.1. <i>Modélisation des besoins par une approche factorielle</i>	<i>12</i>
1.2.2. <i>Modélisation des besoins en énergie</i>	<i>14</i>
1.2.3. <i>Modélisation des besoins en acides aminés</i>	<i>20</i>
1.2.4. <i>Modélisation des besoins en phosphore et calcium</i>	<i>25</i>
1.3. LES STRATEGIES D'ALIMENTATION DES TRUIES GESTANTES	30
1.3.1. <i>Rationner pour piloter l'état corporel à la mise-bas</i>	<i>30</i>
1.3.2. <i>Alimenter en phases.....</i>	<i>31</i>
1.3.3. <i>L'alimentation sur mesure</i>	<i>35</i>
1.4. VERS UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION : AUTOMATISATION ET INTEGRATION DES DONNEES EN TEMPS REEL POUR UN ELEVAGE SUR MESURE	43
1.4.1. <i>Collecter automatiquement des données en élevage.....</i>	<i>44</i>
1.4.2. <i>Traitement pour fiabiliser les données.....</i>	<i>46</i>
1.4.3. <i>Incorporation du modèle nutritionnel dans une chaine de décision automatisée.....</i>	<i>47</i>
1.4.4. <i>Intégration de données en temps réel dans les OAD</i>	<i>48</i>
1.5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	51
2. QUESTION DE RECHERCHE ET DEMARCHE SCIENTIFIQUE	63
2.1. QUESTIONNEMENT DE LA THESE.....	63
2.2. DEMARCHE ENTREPRISE DURANT LA THESE.....	65
2.3. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	67
3. MATERIEL ET METHODES GENERAL	68
3.1. <i>IN SILICO</i> : MODIFICATION DU MODELE NUTRITIONNEL ET METHODE D'OPTIMISATION PAR SIMULATION	68

3.2. <i>IN VIVO</i> : DEUX EXPERIMENTATIONS ANIMALES SUR TROIS CYCLES DE GESTATION CONSECUTIFS.....	73
3.3. <i>IN LABORATORIO</i> : DES MATRICES NON INVASIVES POUR LE SUIVI DES MINERAUX ET DES BIOMARQUEURS DE LA MINERALISATION OSSEUSE	75
3.4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	78
4. PRISE EN COMPTE DE DONNEES COMPLEMENTAIRES POUR AMELIORER L'ESTIMATION DES BESOINS ENERGETIQUES INDIVIDUELS	79
4.1. POIDS JOURNALIER	79
<i>Introduction</i>	80
<i>Matériel et méthodes</i>	81
<i>Résultats</i>	84
<i>Discussion</i>	87
<i>Conclusion</i>	89
<i>Références bibliographiques</i>	90
4.2. ACTIVITE PHYSIQUE	91
<i>Introduction</i>	91
<i>Matériel et méthodes</i>	92
<i>Résultats</i>	94
<i>Discussion</i>	96
<i>Conclusion</i>	98
<i>Références bibliographiques</i>	98
5. EFFETS D'UNE ALIMENTATION SUR MESURE DES TRUIES GESTANTES AJUSTEE EN ENERGIE ET ACIDES AMINES SUR LES PERFORMANCES A LA MISE-BAS ET LE COMPORTEMENT ALIMENTAIRE SUR TROIS CYCLES CONSECUTIFS	100
<i>Introduction</i>	101
<i>Material and methods</i>	102
<i>Results</i>	108
<i>Discussion</i>	115
<i>Conclusion</i>	120
<i>References</i>	121
<i>Supplementary material</i>	124
6. APPLICATION D'UNE ALIMENTATION SUR MESURE DES TRUIES GESTANTES AJUSTEE EN ENERGIE, ACIDES AMINES ET MINERAUX SUR TROIS CYCLES CONSECUTIFS ET EFFETS SUR LES PERFORMANCES EN MATERNITE, LE STATUT MINERAL DES TRUIES ET LES REJETS ENVIRONNEMENTAUX.....	126
<i>Introduction</i>	127
<i>Material and methods</i>	128
<i>Results</i>	137
<i>Discussion</i>	145
<i>Conclusion</i>	151
<i>References</i>	152
<i>Supplementary material</i>	155

7. UNE BASE DE DONNEES DE PRODUCTION DE TRUIES GESTANTES LOGEES EN GROUPE ET AYANT UNE ALIMENTATION SUR MESURE SUR LE LONG TERME.....	159
<i>Specifications Table</i>	160
<i>Value of the Data</i>	161
<i>Data Description</i>	162
<i>Experimental Design, Materials and Methods</i>	164
<i>References</i>	170
8. SIMULATION D'UNE ALIMENTATION SUR MESURE SUR LA CARRIERE DES TRUIES ET LEUR LONGEVITE.....	171
<i>Introduction</i>	172
<i>Material and methods</i>	173
<i>Results</i>	181
<i>Discussion</i>	187
<i>Conclusion</i>	191
<i>References</i>	192
9. DISCUSSION GENERALE.....	196
9.1. L'ALIMENTATION SUR MESURE DE LA TRUIE SUR LE LONG-TERME	197
9.1.1. Caractériser le besoin minéral individuel et journalier pendant la gestation	197
9.1.2. Restaurer les réserves osseuses mobilisées pendant la lactation	199
9.1.3. Nourrir des truies dont les caractéristiques évoluent.....	202
9.1.4. Mettre en place l'alimentation sur mesure en élevages commerciaux, une dépendance aux normes environnementales ?.....	202
9.2. DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION SOUPLE POUR LA NUTRITION DE LA TRUIE.....	204
9.2.1. Modification du modèle existant	205
9.2.2. Intégration des données d'ambiance.....	206
9.2.3. Fenêtre temporelle de l'estimation du besoin	207
9.2.4. Vers un modèle hybride stochastique ?.....	207
9.2.5. L'intégration du numérique et de l'intelligence artificielle (IA) au sein des élevages	208
9.2.6. Création d'un outil support de nutrition.....	209
9.2.7. Empreinte environnementale de stratégies d'alimentation sur mesure	210
9.3. UN ELEVAGE PORCIN EFFICIENT, PIERRE ANGULAIRE POUR LA CIRCULARITE DES AGROSYSTEMES.....	212
9.3.1. Le porc, un recycleur dans les systèmes alimentaires.	212
9.3.2. Potentiel de l'alimentation sur mesure pour les systèmes alimentaires.....	215
9.4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	217
10. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	221
ANNEXES	222

Avant-Propos

La thèse s'est déroulée au sein de l'unité mixte de recherche 1348 de Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Élevage (PEGASE) regroupant INRAE et l'Institut Agro Rennes-Angers localisée à Saint-Gilles (35, France). Le financement de la thèse était issu à 50 % du département (PHASE) d'INRAE et à 50 % de l'IFIP – Institut du porc à travers l'UMT DIGIPORC. Elle a été supervisée par Charlotte Gaillard (INRAE) et Nathalie Quiniou (IFIP). La thèse s'est également inscrite au sein du label doctoral de l'école internationale de recherche d'Agreenium (EIR-A). L'expérimentation à l'élevage expérimental de l'IFIP a été financée par le projet CASDAR Connaissances 2022 SOMOVE (No. 7376619).

Durant la thèse, une collaboration a été établie avec l'entreprise de génétique porcine Topigs Norsvin à 'S-Hertogenbosch, aux Pays-Bas où j'y ai réalisé une mobilité de 4 mois. J'ai été encadré par Lisanne Verschuren, Rob Bergsma et Xandra Benthem de Grave. Cette mobilité a été financée grâce à l'obtention de trois bourses sélectives (ED EGAAL, Rennes Métropole et ERASMUS +). Ma participation au 75^{ème} congrès de l'European Federation of Animal Science (EAAP) de 2024 (Florence, Italie) a reçu le soutien financier de la bourse Crédit Agricole Île-de-France Mécénat en partenariat de l'Académie d'Agriculture de France après sélection de mon dossier.



Valorisation au cours de la thèse

Articles scientifiques dans des journaux à comité de lecture

Acceptés et publiés

Ribas, C., Quiniou, N., Gaillard, C., 2024. On farm precision feeding of gestating sows based on energy and amino acids on farrowing performances and feeding behavior over 3 consecutive gestations. Journal of Animal Science 102, skae201. <https://doi.org/10.1093/jas/skae201> [Chapitre 5]

Ribas, C., Blanc, A., Simon, M., Thomas, J., Quiniou, N., Gaillard, C., 2025. Data paper: behavioural and production data of sows fed tailored diets over three consecutive gestations. Animal – Open Space 4, 100105. <https://doi.org/10.1016/j.anopes.2025.100105> [Chapitre 7]

Ribas, C., Gaillard, C., Quiniou, N., 2025. Precision feeding of sows over three consecutive gestations adjusted for energy, amino acids and minerals on sow performances and a marker of bone resorption. Animal 19, 101638. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101638> [Chapitre 6]

Soumis

Ribas, C., Quiniou, N., Verschuren, L. M. G., Bergsma, R., Benthem de Grave, X., Gaillard, C., 2025. Modeling sow precision feeding based on farm-specific body composition reduces feed costs and environmental load. Soumis le 26/09/2025. [Chapitre 8]

Conférences internationales

Présentations orales

74^{ème} Congrès annuel de l'EAAP, Lyon, France, 2023 :

Gaillard C., **Ribas C.**, Durand M. Precision feeding, recent advances for gestating sows and dairy cows. Session 81. Precision Feeding.

75^{ème} Congrès annuel de l'EAAP, Florence, Italie, 2024 :

Ribas, C., Quiniou, N., Gaillard, C. Impact of long-term precision feeding based on energy and lysine on the productive, economic and environmental performance of gestating sows. Session 89. Free communications in animal nutrition.

76^{ème} Congrès annuel de l'EAAP, Innsbruck, Autriche, 2025 :

Ribas, C., Gaillard, C., Quiniou, N. Accounting for phosphorus needs in precision feeding of gestating sows over three gestations. Session 34. Monogastric nutrition, management and product quality.

Conférences nationales

Article

57^{ème} Journées de la Recherche Porcine, Saint-Malo, 2025 :

Ribas, C., Gaillard, C., Quiniou, N., 2025. Prendre en compte le poids en temps réel des truies gestantes pour l'estimation des besoins énergétiques dans le cadre d'une alimentation sur mesure. Journées Recherche Porcine 57, 173–178.

Présentation orale

57^{ème} Journées de la Recherche Porcine, Saint-Malo, 2025 :

Ribas, C., Gaillard, C., Quiniou, N. Prendre en compte le poids en temps réel des truies gestantes pour l'estimation des besoins énergétiques dans le cadre d'une alimentation sur mesure. Session Alimentation.

Posters

56^{ème} Journées de la Recherche Porcine, Saint-Malo, 2024 :

Ribas, C., Quiniou, N., Gaillard, C. Détermination des teneurs urinaires en minéraux et biomarqueurs de la minéralisation osseuse chez la truie gestante à partir de prélèvements sur tampons vaginaux. Session Alimentation.

57^{ème} Journées de la Recherche Porcine, Saint-Malo, 2025 :

Ribas, C., Quiniou, N., Gaillard, C. Evaluation du statut minéral de la truie gestante à partir de prélèvements salivaires analysés avec deux méthodes d'analyses. Session Alimentation.

58^{ème} Journées de la Recherche Porcine, Saint-Malo, 2026 :

Ribas, C., Quiniou, N., Gaillard, C. Améliorer la couverture des besoins en acides aminés et en phosphore de la truie pendant la phase d'élevage en groupe : quels effets après une gestation ? Session Alimentation.

Desmet, M., Gaillard, C., **Ribas, C.** Caractérisation de l'activité physique individuelle de la truie au cours de la gestation à l'aide d'accéléromètres. Session Alimentation.

Autres activités de valorisation

Finaliste du prix « Durabilité des élevages 2023 » de la chaire Futurs d'élevage.

Présentation orale aux Journées scientifiques EGAAL le 3 avril 2025 : Influence of long-term precision feeding on the productive and economic performance of gestating sows: two-case studies.

Enseignement :

Cours (3 h/an) : Alimentation de précision en élevage porcin, Institut Agro Dijon, 2024 et 2025

Cours (3 h/an) : Alimentación de precisión en la producción porcina, Universidad Nacional de Río Cuarto, 2024

Travaux dirigés (2 h/an) : Prise en compte de l'activité physique dans le calcul des besoins en énergie des truies gestantes, Institut Agro Rennes-Angers, 2024 et 2025

Encadrement de stagiaire

Desmet, M. (**Ribas, C.**, Gaillard, C.). 2025. Caractérisation de l'activité physique individuelle et journalière des truies en gestation et estimation des besoins énergétiques. Mémoire de Master 2, INP Purpan, INRAE UMR PEGASE, 79 p. (Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence ANR-16-CONV-0004; sélection du sujet sur dossier par #DigitAg).

Liste des figures

Figure 1.1 : Le cycle reproductif de la truie	5
Figure 1.2 : Exemples de systèmes d'alimentation en groupe.....	8
Figure 1.3 : Evolution du nombre de nés totaux (NT), nés vivants (NV), et sevrés par portée de 1973 à 2023 en France à partir des données de gestion technique du troupeau de truies	10
Figure 1.4 : Les différents compartiments pris en compte dans l'estimation des besoins de la truie gestante par l'approche factorielle. Adapté de Dourmad et al. (2005).....	13
Figure 1.5 : Utilisation de l'énergie d'un aliment et expressions de la valeur énergétique en % de l'énergie brute (EB)	15
Figure 1.6 : L'utilisation de l'énergie métabolisable au cours de la gestation	17
Figure 1.7 : Évolution du besoin en lysine digestible iléale standardisée (Lys DIS) au cours de la gestation selon le poids de la portée à la mise-bas.....	22
Figure 1.8 : Contribution de chaque compartiment au besoin journalier en phosphore digestible (P_{dig}) et en calcium (Ca) estimé par des modèles mécanistes.....	28
Figure 1.9 : Évolution des besoins en lysine digestible iléale standardisée (Lys DIS) et en phosphore digestible standardisé total (STTD-P) par kg d'aliment au cours de la gestation	29
Figure 1.10 : Différentes phases considérées dans la stratégie d'alimentation de la truie gestante.....	35
Figure 1.11 : Évolution de la contribution de l'aliment à basse teneur en acides aminés (B) dans le mélange apporté aux truies selon leur rang de portée	37
Figure 1.12 : Couverture des besoins estimés en lysine digestible iléale standardisée (Lys DIS) au cours de la gestation avec une stratégie d'alimentation conventionnelle (A) ou sur mesure (B). Adapté de Gaillard et al. (2020b).	38
Figure 1.13 : Simulation de l'évolution de la masse minérale osseuse pendant la carrière d'une truie reproductrice (cinq cycles).....	39
Figure 1.14 : Schématisation du concept d'élevage sur mesure. Adapté de Allain et al. (2014).	43
Figure 1.15 : Distributeurs automatiques d'aliments à une voie (A) ou deux voies (B).	45
Figure 1.16 : Schématisation de l'utilisation actuelle du modèle nutritionnel pour truies gestantes.....	48
Figure 2.1 : Schéma de la démarche scientifique adoptée au cours de la thèse (Chapitre 2)	66
Figure 3.1 : Documentation de la fonction <i>proportion_aliment</i> suivant le style numpy créée dans la classe Aliment du modèle nutritionnel	70
Figure 4.1 : Poids journalier en temps réel (P_R) et prédiction (P_M) selon l'élevage (UE3P ou CIRI).....	84
Figure 4.2 : Exemples d'évolution individuelle du poids brut (truie et conceptus) au cours de la gestation pour six truies du CIRI selon la méthode de prise en compte du poids journalier, <i>i.e.</i> modélisé (P_M) ou pesées journalières (P_R).....	85
Figure 4.3 : Temps moyen passé par activité (debout ou en mouvement ; min/j) en fonction du poids moyen de la truie (kg) au cours de la gestation.	95
Figure 4.4 : Apport supplémentaire (en g/j) avec une stratégie prenant en compte l'activité physique individuelle (avec une vitesse de déplacement lente de 1,50 km/h) comparativement à une stratégie initiale considérant 4 h debout d'activité journalière pour l'ensemble des truies.	97
Figure 5.1 : Weekly evolution of the standardized ileal digestible lysine (SID Lys) intake during gestation regarding cycle (1, 2 or 3) and strategy (CF vs. PF). The 'cloud' corresponds to the average standard deviation of the three cycles for each strategy. P value of the Student's test of the effect of the feeding strategy for each week of gestation was performed. (***) = $P < 0.001$; NS = $P > 0.10$ CF: conventional feeding; PF: precision feeding	110

Figure 5.2 : Weekly evolution of (A) lameness (0 = absence vs. 1 = all sows are lamed), (B), bursitis (0 = absence vs. 1 = all sows have bursitis), and (C) dirtiness (0 = 100% sow's body clean vs. 1 = 100% sow's body dirty) observed over gestation and cycles for CF and PF sows. CF: conventional feeding; PF: precision feeding.....	114
Figure 6.1 : The number of sows in the standard feeding (SF) and precision feeding (PF) strategies throughout the three experimental cycles. Sows are ordered by parity in each group. Culled and supernumerary sows were removed from the experiment.	129
Figure 6.2 : The mean apparent total tract digestibility (ATTD) of P intake by sows per week during gestation over the three experimental cycles by feeding strategy (standard feeding (SF) vs. precision feeding (PF)). Shaded areas correspond to the mean SD of the three experimental cycles for each feeding strategy. ***: $P < 0.001$	139
Figure 6.3 : Mean ($\pm$ confidence interval) of urinary Ca concentration (A), urinary P concentration (B), urinary Ca:P ratio (C) and concentration of C-terminal telopeptide of type I collagen (CTX; D) on days 80 (G80) and 108 (G108) of gestation of the experimental cycles by feeding strategy (standard feeding (SF) vs. precision feeding (PF)). 280 urine samples were analysed for Ca and P concentration. For CTX, urine samples for 10 sows of each feeding strategy that completed all three cycles were analysed, i.e. 120 urine samples.	143
Figure 6.4 : Percentage difference ($\pm$ confidence interval) in feed cost and urinary and faecal N and P output (in percentage points) of precision feeding (PF) sows compared to those of standard feeding (SF) for the three experimental cycles.	145
Figure 7.1 : Schema of the relational diagram of the database of gestating sows fed tailored diets made with Luna modeler (Ideamerit s.r.o., 2025).	164
Figure 7.2 : Summary of the experimental design and data collection on gestating sows for the two trials. Only one gestation-lactation cycle is represented but the data collection is similar between cycles unless otherwise stated.	165
Figure 8.1 : Sow body weight (BW) according to age. Solid line is the Weibull equation calibrated on the data of the current study. Dashed line corresponds to adjusted equation from Gaillard et al. (2020) and dotted line from those of Quiniou (2019).	181
Figure 8.2 : Maternal sow body weight (BW) throughout six cycles in response to the feeding strategy applied (conventional feeding (CF) vs. standard feeding (SF) vs. precision feeding on amino acids (PF AA) or amino acids and phosphorus (PF AA-P)).	185
Figure 8.3 : Maternal sow backfat thickness (BT) throughout six cycles in response to the feeding strategy applied (conventional feeding (CF) vs. standard feeding (SF) vs. precision feeding on amino acids (PF AA) or amino acids and phosphorus (PF AA-P)).	185
Figure 9.1 : Modèle d'estimation du besoin phosphocalcique durant la gestation intégrant le compartiment osseux à reconstituer après la lactation.....	198
Figure 9.2 : Schéma de l'outil d'aide à la décision pour l'alimentation des truies	210
Figure 9.3 : Dénombrement des capteurs utilisés au cours des expérimentations et évaluation de la consommation électrique associée	211
Figure 9.4 : Schéma de l'utilisation de l'outil d'aide à la décision pour l'alimentation des truies dans un agro-système via la prise en compte des ressources disponibles et d'un module d'allocation des ressources	216

Liste des tableaux

Tableau 1.1 – Les performances des truies des élevages français et dans les autres principaux pays producteurs	2
Tableau 1.2 – Besoins énergétiques moyennés de la truie (en énergie métabolisable, EM), en fonction du rang de portée et de la taille de portée pour deux stades de gestation	19
Tableau 1.3 – Profil de la protéine idéal pour la truie gestante en fonction du compartiment considéré pour deux modèles (NRC, 2012 ; InraPorc présenté par Dourmad et al., 2008)	21
Tableau 1.4 – Besoins en lysine digestible iléale standardisée de la truie en fonction du rang de portée et de la taille de portée pour deux stades de gestation.....	24
Tableau 1.5 – Plage optimale d'épaisseur de lard dorsal (ELD) à la mise-bas ¹ en fonction du type génétique et de l'appareil de mesure utilisé. Adapté de Muro et al. (2023).....	32
Tableau 1.6 – Effets de l'alimentation sur mesure sur l'ingestion d'AA et de P, l'excrétion de N et de P ainsi que sur les coûts alimentaires et les performances reproductives des truies gestantes	40
Tableau 3.1 – Equation ¹ d'estimation du besoin en P de la truie gestante en fonction du compartiment, de la méthode utilisée et du stade de gestation	71
Tableau 3.2 – Equation ¹ d'estimation du besoin en Ca de la truie gestante en fonction du compartiment, de la méthode utilisée et du stade de gestation	72
Tableau 4.1 – Caractéristique des jeux de données.....	82
Tableau 4.2 – Poids (kg) modélisé (P _M) et en temps réel (P _R) moyen selon le stade de gestation dans les élevages étudiés	85
Tableau 4.3 – Besoin énergétique total de gestation estimé selon trois scénarios de définition des objectifs de fin de gestation et deux méthodes de prise en compte du poids journalier (P _M , P _R)	88
Tableau 4.4 – Dépense énergétique en énergie métabolisable de l'activité debout sans déplacement et en mouvement avec différentes vitesses de marche.....	94
Tableau 4.5 – Temps journalier consacré à chaque activité les jours où le suivi était possible (du 5 ^{ème} au 109 ^{ème} jour de gestation) (moyenne ± écart-type).....	95
Tableau 4.6 – Apport à effectuer sur la gestation selon le scénario de prise en compte de l'activité physique	96
Tableau 5.1 – Ingredients and chemical composition of sows' diets (on an as-fed basis).....	105
Tableau 5.2 – Cumulated and daily feed intake and SID Lys intake regarding feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles.....	109
Tableau 5.3 – Observed and expected body weight (BW) and backfat thickness (BT) at gestation group-housed entrance and at maternity entrance regarding feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles	111
Tableau 5.4 – Expected and observed litter characteristics at birth and performance observed until weaning regarding feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles.....	112
Tableau 5.5 – Effects of the feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles on feeding and drinking behaviors defined through the number of visits and time spent in the automaton per day	113
Tableau 5.6 – Effect of the feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles on feed costs and nutrient excretions	115
Tableau 6.1 – Ingredients in the gestation and lactation diets of sows (on an as-fed basis)	132
Tableau 6.2 – Chemical composition of the gestation and lactation diets of sows (on an as-fed basis).....	133
Tableau 6.3 – Feed and nutrient intake at different periods by feeding strategy (SF vs. PF) for the sows that completed at least one experimental cycle.....	139

Tableau 6.4 – Observed and predicted BW and backfat thickness (BT) at the beginning of gestation, one month before farrowing, at the beginning of maternity and at weaning by feeding strategy (SF vs. PF) for sows that completed at least one experimental cycle	141
Tableau 6.5 – Observed and predicted litter characteristics at birth and performance observed until weaning by feeding strategy (SF vs. PF) for the sows that completed at least one experimental cycle	142
Tableau 6.6 – Effect of the feeding strategy (SF vs. PF) on feed costs and nutrient balances during gestation for the sows that completed at least one experimental cycle.....	144
Tableau 7.1 – Description of the 20 tables of the database of gestating sows fed tailored ¹ diets.....	163
Tableau 8.1 – Description of the database collected at an experimental farm averaged by parity	174
Tableau 8.2 – Root mean squared error (RMSE) and mean absolute error (MAE) used as metrics to quantify and compare the quality of predictions of the BW according to the sow age ¹ with different K-folds cross-validation on two datasets: all the gestations available <i>i.e.</i> 3,098 gestations or gestations from sows followed at least over 5 cycles (5+) <i>i.e.</i> 991 gestations	177
Tableau 8.3 – Ingredient, chemical composition and price of simulated gestation diets with Evapig software (on as fed basis).....	179
Tableau 8.4 – Adjusted prediction of sow net body weight according to the age of sows and prediction of energy, protein, or fat content of sows as function of empty body weight and backfat thickness (adapted from Dourmad 1998). For the current study, values are presented as the mean $\pm$ the standard error	183
Tableau 8.5 – Effects of the feeding strategy on feed and nutrient intake and feed costs throughout six successive gestations	184
Tableau 8.6 – Effects of the feeding strategy applied on nitrogen and phosphorus balance throughout six successive gestations	186
Tableau 9.1 – Evaluation des quantités de minéraux mobilisées à la précédente lactation pour les truies suivies sur trois cycles de gestation consécutifs durant l'expérimentation 2 et apports effectués sur la gestation suivante..	200
Tableau 9.2 – Composition de l'aliment faible en lysine digestible et en teneur standard en P digestible basé sur le principe du moindre coût ¹ à partir des matières premières communes utilisées lors de l'expérimentation 2 (Témoin) ou à partir de déchets consommables et co-produits (Co-pro).	214

Remarque : Les mots « Table » des articles en anglais ont été modifiés en Tableau pour une homogénéisation du terme à l'intérieur du manuscrit et pour permettre les renvois automatiques. Par exemple, le Tableau 5.1 correspond à la « Table 1 » de l'article en question.

Liste des abréviations

AA = Acides aminés

AC (CF) = Alimentation conventionnelle

AM (PF) = Alimentation sur mesure

ATTD-P = Digestibilité totale apparente du P

Ca = Calcium

Ca_{dig} = Calcium digestible

CNR = Coefficient de rétention azotée

CTX = Télopeptide C-terminal du collagène de type I

DAC = Distributeur automatique de concentrés

Dig = Digestible

DIS = Digestibilité iléale standardisée

DXA = Scanner à absorptiométrie biphotonique à rayons X

ELD = Épaisseur de lard dorsal

ED = Énergie digestible

EM = Énergie métabolisable

EN = Énergie nette

GTTT = Gestion technique du troupeau de truies

GMQ = Gain moyen quotidien

ICP = Spectromètre à plasma par couplage inductif

ISSF = Intervalle entre le sevrage et la saillie fécondante

Lys = Lysine

MN = Porcelets mort-nés

N = Azote

NP = Taille de portée

NT = Porcelets nés totaux

NV = Porcelets nés vivants

OAD = Outil d'aide à la décision

P = Phosphore

P_{dig} = Phosphore digestible

PV = Poids vif

PV^{0,75} = Poids métabolique

PVV = Poids vif vide

RFID = Radio-identification individuelle

STTD-P = Digestibilité totale standardisée du P

SF = Alimentation conventionnelle ajustée sur l'énergie

Témoin = Stratégie de référence

Liste des abréviations des articles anglophones

AA = Amino acids

ADG = Average daily gain

ATTD-P = Apparent total tract digestibility of phosphorus

BT = Backfat thickness

BW = Body weight

CF = Conventional feeding

CTX = C-terminal telopeptide of type I collagen

EBW = Empty body weight

Lys = Lysine

MAE = Mean absolute error

NE = Net energy

PF = Precision feeding

PF_{AA} = Precision feeding adjusted on energy and amino acids

PF_{AA-P} = Precision feeding adjusted on energy, amino acids and phosphorus

RFID = Radio-frequency identification

RMSE = Root mean squared error

RSD = Residual standard deviation

SID = Standardized ileal digestible

SF = Standard feeding adjusted on energy

STTD = Standardized total tract digestibility

Introduction générale

Au niveau mondial, les prévisions de consommation humaine de protéines animales sont évaluées à +12 % pour la prochaine décennie (OECD/FAO, 2024) alors que les tendances des dernières années (-2 % sur 10 ans) et les prévisions sont à la décroissance au niveau français (IFIP, 2024). Cette hausse mondiale correspond majoritairement à une augmentation de la consommation de viande de volaille, déjà première viande consommée au monde devant la viande de porc. En Europe, la viande de porc reste la première source de protéines animales consommée (OECD/FAO, 2024). En France, elle vient de passer début 2025 au deuxième rang derrière la volaille (ANVOL, 2025). En parallèle, les capacités de production française sont proches de l'équilibre vis-à-vis de la consommation nationale (99,3 % ; IFIP, 2024).

En 2023, la France possède un cheptel de 11,8 millions de porcs qui la classe au troisième rang européen derrière l'Espagne et l'Allemagne. Le Grand Ouest de la France (régions Bretagne, Normandie et Pays de la Loire) représente 73,6 % de la production française de porc charcutier. La production porcine française se caractérise par des exploitations spécialisées deux à trois fois plus petites que celles des pays du Nord de l'Union Européenne (IFIP, 2024). Ainsi, d'après les résultats de gestion technique des troupeaux de truies (**GTTT**) de 2023 (IFIP, 2024), l'élevage moyen français compte 267 truies en production avec une productivité de 32,9 porcelets sevrés par an (Tableau 1.1). Leurs performances sont parmi les meilleures au niveau mondial. Maîtriser au mieux l'alimentation est un enjeu majeur et une préoccupation constante pour la filière porcine car c'est le premier poste de charges de l'élevage. La société étant de plus en plus regardante sur les effets environnementaux de l'élevage et sur le bien-être animal, des améliorations sont attendues sur ces différents plans. Un des leviers actionnables et prometteurs pour cela est la mise en place de l'élevage sur mesure. Ce concept utilise les nouvelles technologies (capteurs, automates, caméras, etc...) permettant d'automatiser, d'individualiser et de piloter en temps réel l'élevage afin d'en améliorer les performances économiques et environnementales. Elle passe par un apport adéquat de nutriments chaque jour pour répondre aux besoins individuels des truies du troupeau. Les nutriments correspondent à des substances assimilables (glucides simples, acides aminés (**AA**), acides gras, etc...) par l'individu (Wainsten et al., 2022). Par extension dans ce travail, le terme prend en compte les structures plus complexes composées d'un ensemble de ces éléments simples (glucides, protéines et lipides) et transformées *via* les enzymes digestives. Le besoin quant à lui est défini par l'Anses (2021) comme la quantité minimale d'un nutriment qu'un individu doit consommer pour favoriser sa santé au sens large.

Tableau 1.1 – Les performances des truies des élevages français et dans les autres principaux pays producteurs

Pays	France ¹	Espagne ^{2,3}	Allemagne ⁴	Etats-Unis ^{2,5}		Brésil ⁶
(Année)	(2023)	(2019)	(2020)	(2023-2024)		(2023)
Rang de production mondial ^{1,7} (2023)	9	4	6	2		3
Nombre d'élevages	13 017	63 477	15 620	56 265		60 000
Catégorie	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Top 10%	Concours du meilleur producteur, moyenne
Effectifs moyens, nombre						
Truies en production / élevage	267	250	256	2601	3314	-
Porcelets sevrés, par truie productive par an	32,9	26,9	30,6	25,6	31,1	30,05
Résultats par portée, nombre						
Nés vivants	15,6	13,7	15,6	13,8	15,3	14,1
Mort-nés	1,3	1,2	1,2	1,7	1,4	0,9
Sevrés	13,2	11,8	13,0	11,4	13,5	12,8
Rythme de reproduction, jours						
Age des porcelets au sevrage	23,5	25,1	25,0	20,6	-	-
Intervalle sevrage- 1 ^{ère} saillie	5,6	6,4	5,8	7,5	-	6,3
Taux de fécondation en 1 ^{ère} saillie	91,0	90,4	-	92,7	98,2	-
Renouvellement						
Taux de renouvellement annuel, %	45,0	46,8	-	39,1	56,9	-
Rang de portée à la réforme	5,2	4,8	5,3	-	4,2	-

Note : La Chine, premier producteur mondial, n'a pas de données disponibles en libre accès.

¹ IFIP (2024)

² de Andrés et al. (2022)

³Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2023)

⁴Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2022)

⁵Eckberg (2024)

⁶ Agriness (2023)

⁷Kim et al. (2023)

Réduire les coûts alimentaires durant la gestation. A travers le monde, les contenus nutritionnels des aliments pour truies gestantes varient peu (Theil, 2014). Les céréales principales (blé, orge, maïs) et secondaires (sorgho, seigle, triticales) sont incorporées comme source énergétique avec les huiles tandis que les tourteaux (soja, colza, tournesol) sont incorporés comme source azotée (IFIP, 2013). Le contenu énergétique et protéique de l'aliment sont les deux postes principaux de son coût. L'alimentation représente 70 % des coûts de production en élevage porcin (Noblet et al., 2016) et correspond au premier critère de différenciation économique entre les élevages (IFIP, 2018). D'un point de vue économique, il est donc important d'en raisonner les apports. L'amélioration de l'efficacité alimentaire, qui caractérise le ratio entre caractère de production et consommation d'aliment sur une période donnée, est un paramètre à optimiser pour maximiser le revenu des éleveurs. Utiliser une stratégie d'alimentation sur mesure durant plusieurs gestations pourrait améliorer l'efficacité alimentaire sur la carrière de la truie et pourrait affecter positivement ses performances productives. L'effet de nouvelles stratégies d'alimentation sur mesure, avec des apports individualisés et ajustés quotidiennement aux besoins des animaux ont été évalués sur la truie en lactation (Gauthier, 2021) et sur la truie pendant une gestation (Gaillard et al., 2020b ; Gaillard et Dourmad, 2022 ; Quiniou, 2021). En revanche, les effets à long-terme n'ont pas encore été évalués. La gestation et la lactation étant deux stades physiologiques très différents, un focus sera fait dans cette thèse sur la gestation qui représente plus de 75 % du temps d'un cycle reproductif.

Améliorer les performances environnementales des élevages. L'alimentation sur mesure a également été initiée pour améliorer le pilier environnemental des élevages. Un apport adéquat en AA et en minéraux est essentiel pour, respectivement, maximiser la rétention protéique et la minéralisation osseuse, tout en minimisant le gaspillage (Gaillard et al., 2020a). Raisonner l'apport en fonction des besoins des animaux permet d'éviter l'ingestion en excès de nutriments, donc les rejets dans l'environnement et des surcoûts économiques. L'application d'une alimentation sur mesure ajustée sur la base des besoins en énergie et AA permet ainsi de réduire de 18 % l'excrétion d'azote (**N**) comparée à une alimentation conventionnelle (Gaillard et Dourmad, 2022) avec une réduction des émissions gazeuses (ammoniac) dans le lisier (Jongbloed, 2008). Quand celui-ci est appliqué en excès sur les parcelles au regard du besoin des cultures, la qualité des eaux est dégradée par lessivage des nitrates mais également à cause d'apport en excès de phosphore (**P** ; Schoumans et al., 2014). Ainsi même si les minéraux présentent un effet moindre que l'énergie et les acides aminés sur le coût alimentaire, au niveau environnemental, il est d'un intérêt majeur d'éviter les apports en excès de P. Le P est peu digestible et excrété à 70 % par les truies sans ajout de phytase exogène dans l'aliment (Poulsen et al., 1999). Le P inorganique incorporé dans

l'aliment provient principalement de mines de phosphates, qui sont un gisement limité et une ressource non renouvelable dont les réserves pourraient s'épuiser d'ici la fin du siècle (Cordell et al., 2009). L'alimentation sur mesure fondée sur les besoins en P des animaux en supplément de ceux en énergie et AA permettrait de répondre aux enjeux de réduction de l'impact environnemental des élevages porcins et d'économie des ressources.

Individualisation, automatisation et objets connectés au sein des élevages porcins.

L'augmentation de la taille des élevages réduit le temps disponible pour chaque animal. Sans automate d'alimentation, il n'est pas possible de nourrir de façon individualisée chaque truie du troupeau (Solà-Oriol et Gasa, 2017). Les besoins sont variables et dépendent du stade physiologique de l'animal ainsi que de ses caractéristiques propres tels que son âge, son poids ou son rang de portée. Des modèles nutritionnels permettent d'estimer les besoins nutritionnels individuels et journaliers des truies et ainsi de raisonner l'apport de nutriments à partir des aliments disponibles sur l'élevage. En plus de permettre le pilotage individualisé de l'alimentation, les automates d'alimentation permettent le suivi du comportement alimentaire des animaux. Associés à d'autres capteurs connectés, il est possible de collecter au niveau individuel une grande quantité de données supplémentaires tels que le poids ou le niveau d'activité physique. Prendre en compte ces données en temps réel est une perspective intéressante pour le pilotage des apports nutritionnels.

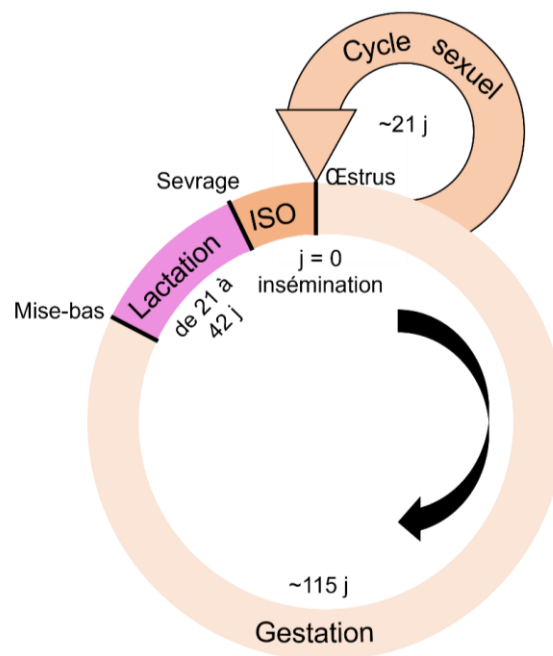
Le présent manuscrit s'articule en 9 chapitres. Le chapitre 1 présente un état de l'art qui détaille et replace le sujet dans son contexte scientifique. La première partie se consacre à la conduite du troupeau de truies en élevage. La deuxième concerne les modèles nutritionnels et l'estimation des besoins des truies gestantes. Une troisième partie s'intéresse aux stratégies alimentaires adoptées pendant la gestation et leurs effets sur les truies. La quatrième partie se focalise sur l'élevage sur mesure et la possibilité d'intégrer en temps réel de nouvelles données disponibles au niveau de la ferme. Le chapitre 2 développe le questionnement et la démarche scientifique adoptés durant la thèse. Le chapitre 3 met en lumière les trois échelles étudiées et méthodes utilisées au cours de la thèse : du modèle nutritionnel aux mesures en laboratoire en passant par les essais expérimentaux (*in silico*, *in vivo*, et *in laboratorio*). Les chapitres 4 à 8 récapitulent l'ensemble des résultats obtenus issus de deux expérimentations animales et de simulations au cours de cette thèse. Enfin, le chapitre 9 propose une discussion générale avant la conclusion générale qui finalise ce manuscrit.

1. État de l'art

1.1. Conduite technique du troupeau de truies en élevage

1.1.1. La conduite en bande pour optimiser le travail en suivant le cycle reproductif de la truie

Pour assurer un haut niveau sanitaire et de productivité, les élevages porcins sont organisés avec une conduite technique du troupeau par bandes. Plusieurs bandes composent le cheptel productif de l'élevage. Les truies d'une même bande sont au même stade physiologique du cycle de reproduction. Le cycle de reproduction se compose de différentes étapes : l'insémination, la gestation, la lactation puis l'intervalle entre le sevrage et l'œstrus (ISO) (Figure 1.1).



Abréviation : ISO = Intervalle Sevrage-Oestrus.

Figure 1.1 : Le cycle reproductif de la truie

La gestation d'une truie dure environ 115 jours. Après la mise-bas, elle allaite ses petits jusqu'au sevrage à un âge qui dépend de la conduite adoptée par l'éleveur (21, 28 ou 42 jours sont les plus communs). Les chaleurs spontanées interviennent environ 4,5 jours après le jour de sevrage de la bande (Pellicer-Rubio et al., 2024). Si la saillie n'a pas été fécondante, la truie revient en chaleur en moyenne 21 jours plus tard.

La conduite en bande permet d'optimiser l'organisation hebdomadaire du travail et l'occupation des salles d'élevage. En effet, avec l'exemple d'une conduite traditionnelle en 7 bandes avec un sevrage des porcelets autour de 28 jours, le même schéma technique se répète toutes les

3 semaines : la première semaine correspond au sevrage de la bande n, s'ensuit l'insémination de cette même bande la semaine suivante puis la troisième semaine correspond à la mise-bas de la bande n + 2. Comme le cycle sexuel dure 3 semaines, une conduite en 7 bandes permet le décalage d'une truie de la bande n n'ayant pas été fécondée à la bande n + 1. La conduite en bande permet également de mieux gérer les porcelets surnuméraires par rapport au nombre de tétines fonctionnelles pour chaque truie. L'adoption des porcelets par des truies de la même bande est facilitée par cette conduite technique (Martel, 2008). Cette organisation permet un enchaînement des cycles de gestation-lactation pour les truies productives du troupeau en réduisant le temps dit improductif, *i.e.* quand la truie n'est ni gestante ni allaitante. Ainsi, la truie productive passe la majeure partie de son temps (78 %) en gestation.

1.1.2. Conditions de logement selon le stade physiologique et les systèmes d'alimentation associés

L'élevage porcin est réalisé principalement en bâtiment en France et plus généralement dans les grands bassins de production mondiaux (Chine, Etats-Unis, Brésil et Europe). Depuis la directive européenne 2008/120/EC et sa mise en application à travers tous ses pays membres en janvier 2013, la mise en groupe des truies gestantes, animal grégaire, est obligatoire à partir de 4 semaines après l'insémination et jusqu'à 1 semaine avant la mise-bas pour favoriser le bien-être des animaux (Council of the European Union, 2008). Le début de la gestation est une période critique pour la bonne implantation des embryons (Spooler et al., 2009) : la deuxième et troisième semaine de gestation correspondent à la période la plus sensible où 5 à 40 % des échecs de gestation ont lieu en conditions commerciales (Langendijk, 2015). Ainsi, pour éviter le stress inhérent à l'établissement de la hiérarchie au cours de la mise en groupe (Arey et Edwards, 1998), les truies sont mises en groupe soit quelques jours après insémination ou soit 4 semaines plus tard.

Une semaine avant la mise-bas, les truies sont transférées en salle de maternité où elles sont logées en case individuelle jusqu'au sevrage des porcelets (Phillips et Fraser, 1994). Pendant cette période, les truies peuvent être bloquées dans une stalle ou libres dans leur case. Le blocage partiel pendant la mise-bas et durant les 2 jours qui suivent permet de réduire significativement le nombre de porcelets écrasés par rapport à une liberté totale (Salaün et al., 2004). Après le sevrage, les truies sont transférées en loge individuelle dans la salle d'attente-saillie. Une fois en chaleur elles sont inséminées et commencent un nouveau cycle reproductif. Les salles peuvent être sur caillebotis (majoritaire en France et dans le monde ; Figure 1.2A), sol plein sans (Figure 1.2B) ou avec litière (Figure 1.2C).

Les systèmes d'alimentation associés au logement en groupe des truies peuvent être divisés en deux catégories :

- Une alimentation simultanée de l'ensemble du groupe au sol, à l'auge avec ou sans bat-flanc (Figure 1.2B) ou encore une alimentation qui s'effectue en réfectoire (Figure 1.2A). Pour l'ensemble de ces systèmes, les truies sont conduites en groupes statiques, *i.e.* les individus sont au même stade physiologique dans la même case et le groupe reste stable (hors réforme ; *i.e.* sortie). Ainsi, une case correspond à une bande ou à un sous-groupe d'une bande.
- Une alimentation séquentielle individualisée où chaque truie vient manger à tour de rôle dans un distributeur automatique d'aliments (**DAC**, Figure 1.2C) (Thomas et al., 2018) grâce à l'identification de leur puce individuelle auriculaire de radio-identification (**RFID**). Le DAC est un système permettant une conduite en groupes dynamiques, *i.e.* des truies de différents stades physiologiques et de différentes bandes se retrouvent dans la même case. Les groupes dynamiques permettent une meilleure utilisation de l'espace en bâtiment disponible, des salles plus grandes et une meilleure réponse à la variabilité interbandes du nombre d'individus (Turcotte, 2018). En contrepartie, la hiérarchie du groupe doit être établie à chaque entrée d'une nouvelle bande et il est plus difficile de réaliser le vide sanitaire de la salle car elle est toujours occupée au minimum par une bande.

Les systèmes d'alimentation décrits permettent d'obtenir des performances semblables lorsque la conduite technique associée est bien maîtrisée (Couboulay et al., 2010). Il faut éviter notamment la compétition alimentaire entre individus que ce soit avant l'accès au DAC (Jang et al., 2017) ou lors de la distribution simultanée à l'auge à l'ensemble du groupe (Boulot et al., 2011) et s'assurer que les truies peuvent consommer l'ensemble de la ration allouée (Kongsted, 2006). D'après Couboulay et al. (2010), avant 2013 et la mise en groupe obligatoire des truies gestantes, les truies étaient préférentiellement alimentées en France à l'auge (44 %) devant les réfectoires (31 %) et enfin les DAC (12,8 %). Depuis l'application de la directive européenne, les DAC sont plus répandus et équipent désormais, 20 à 30 % des élevages (Lachia, 2020).



Abréviation : DAC = distributeur automatique d'aliments. Crédit photo : A) Chambre d'agriculture de Bretagne ; B) Turcotte et Ricard (2015) ; C) UE3P, INRAE, Saint-Gilles

Figure 1.2 : Exemples de systèmes d'alimentation en groupe

1.1.3. Caractérisation des performances des truies

Les performances des truies productives des élevages sont suivies tout au long de leurs cycles reproductifs. En France, une base de données de référence nationale créée en 1970 (Legault et al., 1971) permet aux éleveurs de suivre les performances de leur troupeau. La base de la GTTT est renseignée par les éleveurs et/ou les techniciens de leur organisation de production sur la base du volontariat. En 2015, elle regroupait 46 % des éleveurs de truies français (Badouard, 2015). Elle permet à chaque élevage de comparer son niveau de performances à celui des élevages ayant les mêmes conduites techniques et taille de cheptel. Dans la conduite en routine de l'élevage, les performances suivies peuvent être divisées en deux catégories :

- Les caractéristiques propres à la truie qui dépendent du temps (âge, rang de portée). Une attention particulière est portée à l'évolution des indicateurs d'état corporel de la truie (note corporelle, poids vif (**PV**), épaisseur de lard dorsal (**ELD**)). Ce dernier est utilisé comme un indicateur des réserves lipidiques de l'animal.

- Les performances de production observées à la mise-bas : nombre de porcelets nés totaux (**NT**), nés vivants (**NV**) et mort-nés (**MN**). Les qualités maternelles et la production laitière peuvent être évaluées à travers le gain moyen quotidien (**GMQ**) de la portée. La durée de l'intervalle moyen entre le sevrage et la saillie fécondante (**ISSF**), indicateur de fertilité, est également scrutée car elle influe sur le nombre de porcelets sevrés par an.

La carrière productive d'une truie commence lors de sa 1^{ère} saillie fécondante au sein de l'élevage et se termine lors de sa mise à la réforme quand elle est retirée du cheptel reproducteur. Le taux moyen de réforme annuel français est de 44 % avec des truies réformées en moyenne au 5^{ème} rang de portée, soit une présence pendant 2 ans comme reproductrice au sein de l'élevage (IFIP, 2024).

La politique de réforme dépend de choix effectués par l'éleveur pour maintenir ses objectifs de production. Elle vise à intégrer différents aspects :

- Le retrait des truies ayant des problèmes locomoteurs (boiterie), reproducteurs (retour en œstrus) ou sanitaires.
- Le retrait des truies du cheptel dont les performances en maternité sont jugées insuffisantes.
- L'incorporation de cochettes dont le potentiel génétique de performances est supérieur tout en veillant au maintien de la démographie (distribution optimale des rangs de portée) du cheptel.

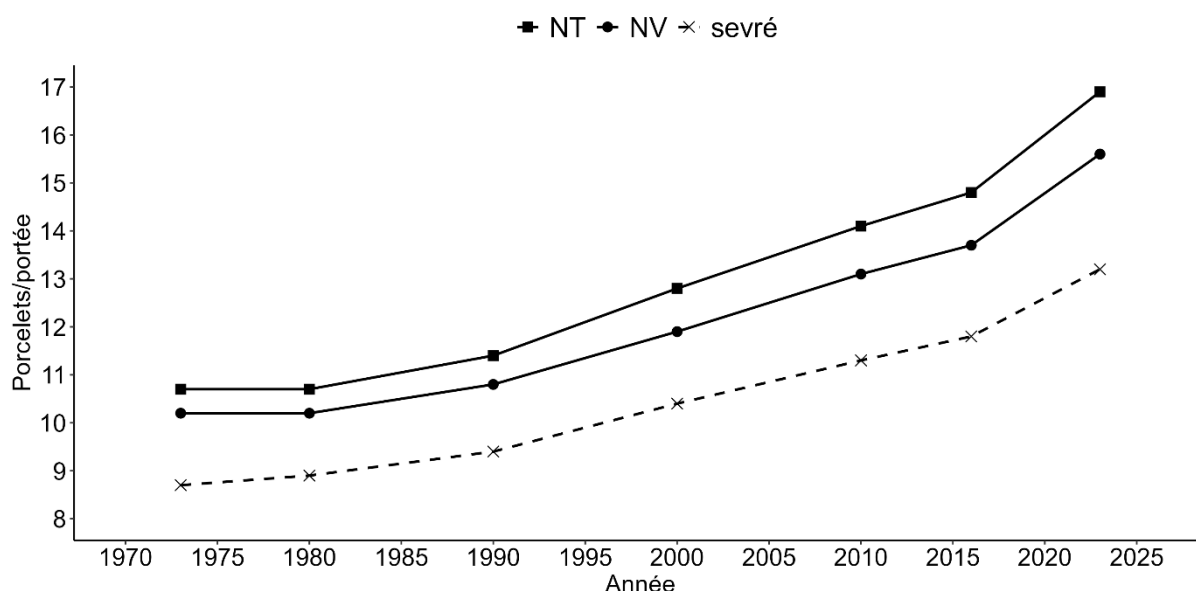
En 2010 en France, ces causes motivent, respectivement, 45 %, 11 % et 34 % des réformes (Courboulay et al., 2010). Pour que l'investissement dans l'achat de cochettes soit rentable, elles doivent réaliser au moins 3 portées au sein de l'élevage (Stalder et al., 2003) sachant qu'elles approchent leur potentiel productif au rang 4 (Legault et al., 1996).

1.1.4. La sélection génétique : facteur d'évolution des performances au sein des élevages

Les performances de production ont augmenté de manière conséquente depuis les années 1970 par la mise en place de la sélection génétique. Le nombre de porcelets nés totaux et sevrés par portée a augmenté respectivement de 4 et 3 individus sur les 25 dernières années (Figure 1.3), notamment avec la sélection de lignées dites hyperprolifiques (Bidanel et al., 2020). Cependant, au vue du potentiel génétique des animaux évalués par les organismes de sélection, les performances pourraient être encore supérieures en élevage de production avec une meilleure adaptation à leurs conditions d'élevage (Dourmad et al., 2010) et une réduction des pertes (MN et écrasés) en maternité (IFIP, 2008).

La sélection sur la prolificité s'accompagne d'une diminution du poids de naissance moyen des porcelets, ce qui a un effet négatif sur la survie à la mise-bas (Canario et al., 2007) et durant la lactation ; d'autant plus que le poids des porcelets à la naissance est également plus variable au sein de la portée (Herpin et Le Dividich, 1998 ; Quesnel et al., 2008). Les porcelets de moins de 1 kg à la naissance ont 70 % de risque de mourir avant l'abattage, les deux tiers des pertes ayant lieu pendant la lactation (Le Cozler et al., 2004 ; Quiniou et al., 2002).

L'augmentation du nombre de fœtus augmente peu les besoins en énergie de la truie sur l'ensemble de la gestation (+4 % en passant de 11 à 17 fœtus). Cependant, elle accroît fortement les besoins en AA et en phosphore digestible (P_{dig}), respectivement +16 % et +17 %, pour la truie gestante pour le dernier tiers de gestation (Dourmad et al., 2010) lorsque la croissance *in utero* s'accélère (Salmon-Legagneur, 1965). Une attention particulière doit donc être portée à la qualité de l'aliment pour les truies hyperprolifiques en fin de gestation.



Note : Les données proviennent de Couanon et Thorel (1984), Dourmad et al. (2021) et IFIP (2024).

Figure 1.3 : Evolution du nombre de nés totaux (NT), nés vivants (NV), et sevrés par portée de 1973 à 2023 en France à partir des données de gestion technique du troupeau de truies

En lien avec la prolificité, les qualités maternelles sont accrues avec une augmentation forte de la croissance journalière de la portée (+55 % en 40 ans), indicateur d'une production laitière accrue des mères (Dourmad et al., 2021) mais de façon non proportionnelle à la taille de portée sevrée (+32 % en 40 ans). En revanche, la hausse de prolificité n'est pas associée à une plus grande quantité de colostrum produite (Devillers et al., 2007). Cela réduit la quantité disponible par porcelet, pourtant vitale pour leur survie et leur santé et pouvant impacter négativement sur le long-terme leur performance de croissance (Krogh et al., 2016). La sélection génétique

pour des porcs charcutiers plus maigres et l'amélioration de l'efficacité alimentaire augmente le poids à maturité des truies (Quiniou, 2019). Les truies d'aujourd'hui ont une teneur en maigre supérieure et une difficulté à stocker l'énergie dans les tissus gras (Theil et al., 2023) avec une forte variabilité en fonction de la lignée génétique (Gill, 2006). Les réserves corporelles sont pourtant essentielles pour un bon déroulement de la lactation et des performances reproductives subséquentes (Tokach et al., 2019). Avec l'évolution des caractéristiques des truies sous l'effet de la sélection génétique, Il est donc primordial d'adapter en parallèle les apports alimentaires pour couvrir les besoins nutritionnels de ces truies à haut potentiel.



Éléments-clés : Les truies d'aujourd'hui (2025) ont des performances supérieures à celles des générations antérieures (1990 - 2020). Il faut accompagner l'augmentation des besoins nutritionnels des truies qui évoluent avec leur niveau de performance.

L'élevage porcin en bande permet d'optimiser l'organisation du travail, l'utilisation des salles et d'assurer une haute productivité du troupeau de truies. Le suivi des performances au niveau individuel et durant la carrière productive de l'individu permet d'ajuster la conduite de l'élevage. Les 35 dernières années sont marquées par une augmentation nette de la prolificité des animaux sous l'effet de la pression de sélection génétique et l'amélioration de la conduite d'élevage (bâtiment, ambiance, alimentation et sanitaire). L'augmentation des performances des truies (+4 porcelets nés vivants par portée entre 1995 et 2023) et l'augmentation de leur poids à maturité sont le moteur de la hausse des besoins quantitatifs et qualitatifs en nutriments des animaux. Un des leviers pour répondre à l'évolution de ces besoins est de mieux les prendre en compte *via* des stratégies d'alimentation adaptées, ce qui nécessite en amont de pouvoir estimer précisément ces besoins nutritionnels.

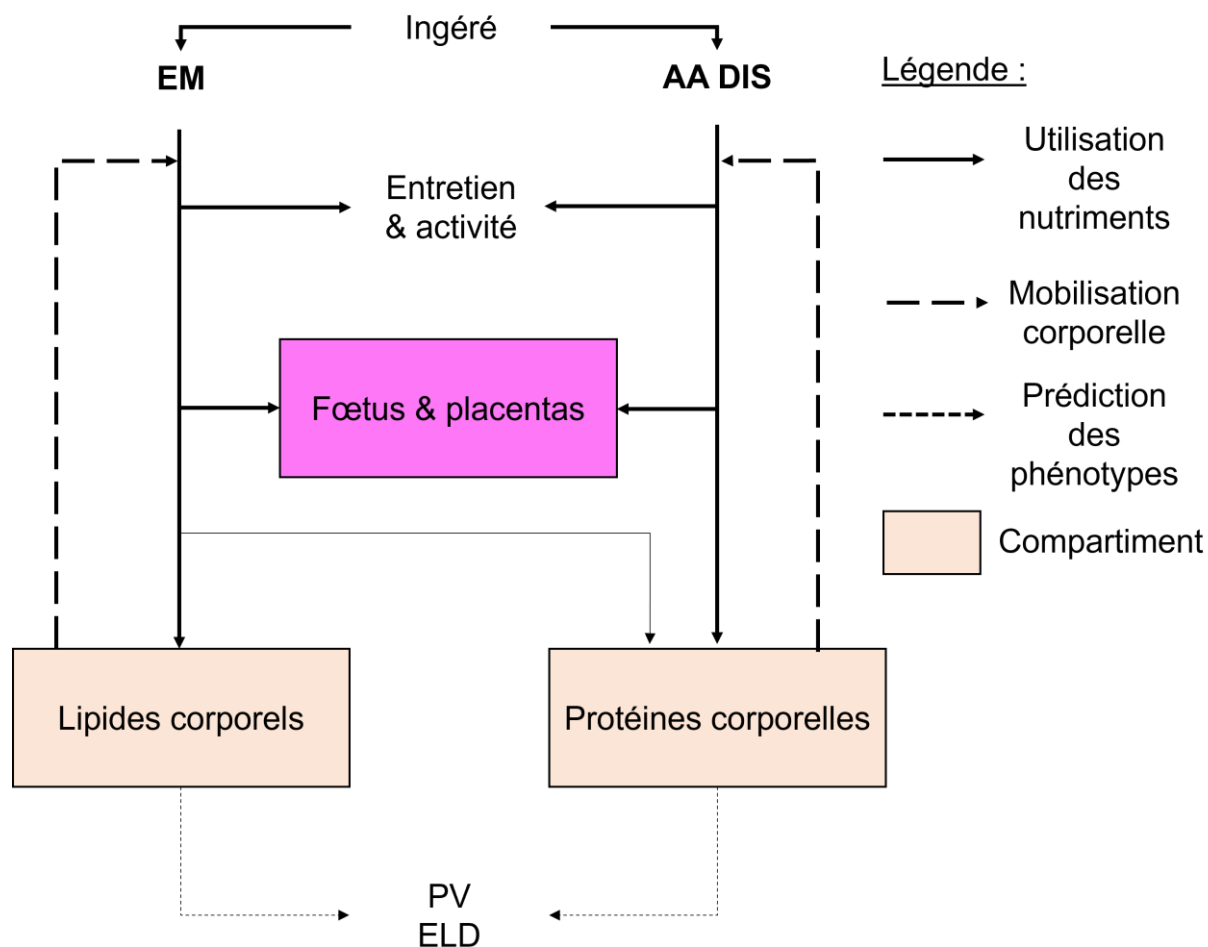
1.2. Estimation des besoins nutritionnels de la truie gestante

1.2.1. Modélisation des besoins par une approche factorielle

Plusieurs modèles ont été développés pour estimer les besoins nutritionnels de la truie gestante (Dourmad et al., 2008 ; Hansen et al., 2014 ; NRC, 2012). Ces modèles sont déterministes car un ensemble de données d'entrée produit toujours la même sortie. Ils sont communément utilisés pour estimer les besoins de manière mécaniste, *i.e.* par la représentation de la truie en compartiments et la description des mécanismes biologiques sous-jacents (Ellis et al., 2020). Les différents compartiments pris en compte sont divisés en deux catégories (Figure 1.4) :

- Entretien : il correspond aux apports de nutriments nécessaires et incompressibles pour maintenir l'animal en vie lorsqu'il est au repos, à la thermoneutralité et à un poids stable. Le besoin d'entretien en énergie et en acides aminés est exprimé en proportion du poids métabolique ($PV^{0,75}$) de la truie (Noblet et Etienne, 1987).
- Production : il correspond dans le cas de la truie gestante au développement des tissus de la gestation (foetus, placenta et glandes mammaires). Auxquels s'ajoutent la croissance de la truie tant qu'elle n'a pas atteint son gabarit à maturité, ainsi qu'à la (re)constitution des réserves corporelles selon le niveau souhaité à la mise-bas.

Il est communément admis que les besoins d'entretien et de développement de la portée sont prioritaires vis-à-vis de la constitution des réserves corporelles (Dourmad et al., 2008). Les réserves corporelles ont un rôle « tampon » : elles sont constituées pendant la gestation avec une amplitude qui dépend des apports de nutriments au-dessus de l'entretien et des autres compartiments de production et elles sont mobilisées principalement pendant la lactation avec une intensité qui dépend du déficit nutritionnel.



Abréviations : AA DIS = acides aminés digestibles iléaux standardisés ; ELD = épaisseur de lard dorsal ; EM = énergie métabolisable ; PV = poids vif.

Figure 1.4 : Les différents compartiments pris en compte dans l'estimation des besoins de la truie gestante par l'approche factorielle. Adapté de Dourmad et al. (2005)

Dans le module truie d'InraPorc® (Dourmad et al., 2008), les compartiments de la truie évoluent en fonction des apports nutritionnels. Le modèle du NRC (2012) s'appuie sur une précédente version développée par le NRC (1998) et intègre les avancées scientifiques plus récentes de Dourmad et al. (2008), et les résultats d'autres recherches sur la nutrition des truies gestantes. Le NRC décrit le dépôt protéique maternel comme une fonction du temps et de l'ingéré d'énergie, et développe un compartiment sur le placenta et les fluides. En complément des modèles précédemment cités, Feyera et Theil (2017) ont développé un modèle par approche factorielle décrivant la transition entre gestation et lactation. Ils préconisent l'ajout d'un compartiment prenant en compte la production de colostrum durant la dernière semaine de gestation car comptant pour 7 % des besoins énergétiques et 16 % des besoins protéiques à ce stade. En complément, Hansen et al. (2014) évaluent la quantité et la composition du lisier produit ainsi que la quantité de méthane émise au niveau journalier à l'aide d'un module supplémentaire.

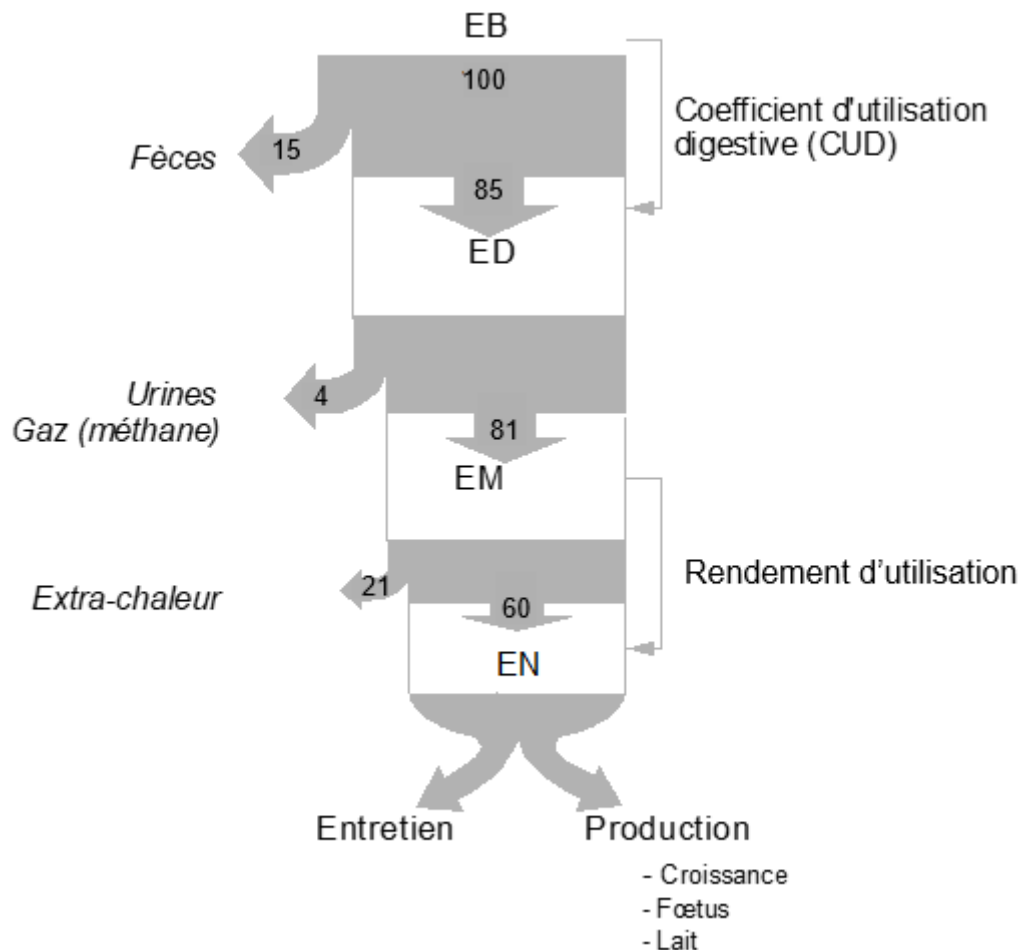
Dans l'estimation des besoins par approche factorielle, les compartiments évoluent entre l'état initial (début de gestation) et la mise-bas selon les objectifs finaux de production. C'est une utilisation statique du modèle. Il a également été développé pour une utilisation dynamique par l'estimation des besoins pour chaque jour de gestation. Contrairement aux recommandations moyennes établies de manière empirique, qui sont applicables seulement au type de truie utilisé pour les établir, une performance donnée et une période déterminée, cette approche permet de s'adapter à de nouveaux contextes et objectifs de production (Noblet et al., 2016). Dans le cas d'une utilisation de façon individu centré, le modèle utilise le PV et l'ELD à l'insémination de la truie pour initialiser les compartiments et des objectifs finaux à la mise-bas de contenu corporel qui intègrent également le poids de la portée. L'objectif de PV net de la truie à la mise-bas (*i.e.* sans sa portée *in utero*) peut être estimé en fonction de l'âge de l'animal à l'aide d'une équation (Quiniou, 2019) qui dépend de la lignée génétique et doit être ajustée à chaque élevage. Les performances historiques du troupeau sont quant à elles utilisées pour l'estimation du poids de portée à la naissance (Quiniou, 2021).

Comme le modèle s'appuie sur l'évolution des compartiments lipidiques et protéiques corporels, il est nécessaire de les estimer. Dourmad et al. (1997) ont proposé des équations pour lier la composition chimique des truies (protéines et lipides corporels) avec les phénotypes disponibles en élevage que sont le PV et l'ELD (Figure 1.4). Elles sont plus adaptées aux lignées Large White ou au croisement Large White x Landrace (lignées utilisées pour établir ces équations) qu'aux autres génotypes (Gill, 2006) et sont relativement anciennes puisqu'établies sur des données acquises dans les années 80. Ces équations pourraient être ajustées pour refléter l'évolution des performances observées ces dernières années en lien avec la sélection génétique, notamment pour mieux tenir compte de la répartition du dépôt d'énergie entre les réserves protéiques et lipidiques des truies actuelles (Dourmad et al., 2021).

1.2.2. Modélisation des besoins en énergie

Systèmes énergétiques. L'énergie est le composant le plus onéreux de la formule alimentaire (Noblet et al., 2016). L'énergie disponible, *i.e.* l'énergie brute, dans les aliments ingérés par l'animal, n'est pas intégralement exploitable. En effet, une partie n'est pas digérée et est perdue dans les fèces, il en résulte l'énergie digestible (**ED**). L'énergie métabolisable (**EM**) correspond à l'énergie digestible dont on soustrait les pertes sous formes urinaire et gazeuse (CH₄). Son utilisation métabolique entraîne des pertes par extra-chaleur spécifiques de chaque matière première utilisée et la différence correspond à l'énergie nette (**EN**). C'est l'expression de l'énergie sous la forme la plus proche de celle utilisable par la truie pour couvrir ses besoins (Figure 1.5 ; Noblet et al., 1993a). La teneur en EN des aliments a été évaluée à l'aide de mesures de production de chaleur réalisées sur des truies logées en chambres respiratoires

et l'établissement d'équations subséquentes qui prennent en compte la composition chimique de l'aliment (amidon, lipides, fibres ; Noblet et Henry, 1993) et permettent de fournir une valeur individuelle à chaque aliment ou matière première. Au vue des différences de digestion de l'énergie entre le porc en croissance et la truie, différentes valeurs d'ED sont disponibles dans les tables de valeurs des matières premières qui conduisent à différentes valeurs d'EN pour ces deux stades (Durmad et al., 2021).



Abréviations : ED = énergie digestible ; EM = énergie métabolisable ; EN = énergie nette. Note : adapté de IFIP (2013) à partir des valeurs de Noblet et al. (1994) pour la truie.

Figure 1.5 : Utilisation de l'énergie d'un aliment et expressions de la valeur énergétique en % de l'énergie brute (EB)

L'utilisation de l'EN est plus appropriée que l'EM car elle évite de surestimer la valeur énergétique des aliments riches en fibres et en protéines (Trottier et al., 2014). Toutefois, dans les modèles d'estimation des besoins par approche factorielle, les besoins sont, dans un premier temps, évalués en EM, l'EN n'étant pas encore au point lorsque les travaux de recherche ont été réalisés. Les besoins sont ensuite exprimés en EN selon le ratio EN/EM de l'aliment, souvent proche de 0,74 dans les aliments standards (Dourmad et al., 2008). Chez

la truie gestante, le rendement d'utilisation de l'EM est de 60 % et 80 % pour les dépôts maternels d'énergie sous forme, respectivement, de protéines et de lipides (Noblet et al., 1999). Pour le conceptus, compartiment comprenant les fœtus, le placenta et les fluides, il est de 50 % (Noblet et Etienne, 1987). Lorsque la truie est en déficit d'apport énergétique, l'énergie stockée dans les lipides est utilisée avec un rendement de 80 % (Noblet et al., 1990). Le besoin journalier correspond à la somme des besoins calculés par compartiment à l'échelle de la journée :

Besoin d'entretien. Dans les différents modèles précédemment cités (Dourmad et al., 2008 ; Hansen et al., 2014 ; NRC, 2012), le besoin d'entretien en énergie est évalué entre 420 et 440 kJ d'EM par kg de PV^{0,75} (Noblet et al., 1990), et est supposé être indépendant du stade de gestation (Noblet et Etienne, 1987). Une truie ayant atteint son gabarit à maturité pèse deux fois plus qu'en début de carrière. L'augmentation du poids à maturité des truies au cours de ces dernières années (Quiniou, 2019) a entraîné concomitamment une augmentation des besoins d'entretien durant la gestation (Dourmad et al., 2021). Le besoin d'entretien de la gestation, représente plus de 70 % du besoin énergétique total dans le cas illustré dans le Tableau 1.2 et représenté dans la Figure 1.6 .

Besoin pour le développement du conceptus. La croissance fœtale est faible pendant les deux premiers tiers de la gestation puis leur poids est multiplié par cinq sur les 45 derniers jours (Salmon-Legagneur, 1965). Le poids fœtal (kg) est évalué selon le stade de gestation et la taille de portée (**NP**) à la naissance par Noblet et al. (Eq.1 ; 1985) à :

$$Poids\ foetal(t) = \exp(8,72962 - 4,07466 \times \exp(-0,03318 \times (t - 45))) + 0,000154 \times EM_{ingéré} + 0,06774 \times NP \quad (Eq. 1)$$

Avec :

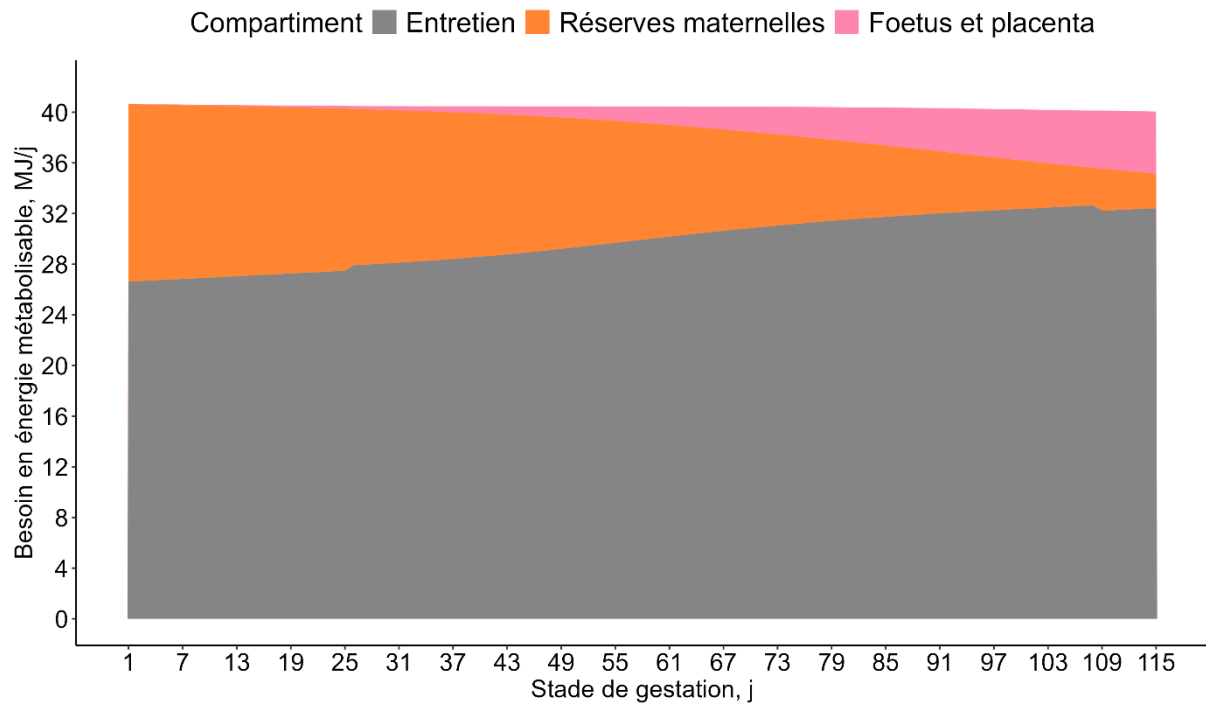
t : le stade de gestation, j

La rétention totale d'énergie (kJ) dans les contenus utérins (Eq.2), *i.e.* les fœtus, le placenta et les fluides associés, est évaluée à :

$$Rétention\ totale\ d'énergie(t) = \exp(11,72 - 8,62 \times \exp(-0,0138 \times t) + 0,0932 \times NP) \quad (Eq. 2)$$

Avec :

t : le stade de gestation, j



Note : La simulation a été effectuée avec le modèle présenté par Gaillard et al. (2019) avec un objectif d'épaisseur de lard dorsal à la mise-bas de 19 mm et une épaisseur de lard dorsal à l'insémination de 15 mm pour une truie de rang de portée 3 avec un poids de 233 kg à l'insémination et un gain net de poids de 39 kg. La portée à la mise-bas est composée de 16 porcelets pesant en moyenne 1,44 kg. La ration est constante tout au long de la gestation. L'activité physique est incluse dans le compartiment d'entretien (5 h debout de l'insémination jusqu'à 25 j de gestation et durant la dernière semaine de gestation, 6 h pour les autres jours).

Figure 1.6 : L'utilisation de l'énergie métabolisable au cours de la gestation

Besoins pour la constitution des tissus maternels. Les objectifs de PV et d'ELD sont utilisés pour estimer la composition chimique souhaitée à la mise-bas (Dourmad et al., 1997). Le même calcul réalisé à partir du PV et ELD à l'insémination permet de calculer le gain corporel à réaliser durant la gestation. La rétention énergétique dans les tissus maternels (kJ/j) dépend du rang de portée, du stade de gestation et de l'énergie disponible en plus du besoin d'entretien (Eq.3 adaptée de Dourmad et al., 1998) ainsi que des acides aminés encore disponibles une fois le besoin couvert pour l'entretien et le dépôt protéique dans les contenus utérins (Eq.4 ; voir section 1.2.3).

$$\begin{aligned}
 \text{Retention énergie dans les protéines maternelles en kJ (t)} &= 23,8 \times 6,25 \times 0,85 \times \\
 &\left((-0,4 + 45,9 \times \left(\frac{t}{100}\right) - 105,3 \times \left(\frac{t}{100}\right)^2 + 64,4 \times \left(\frac{t}{100}\right)^3 + \text{CNR} \times (EM - EM_m) + \right. \\
 &\left. \text{NRuc}(t) - \text{NRuc}(t-1) \right) - \text{NRuc}(t)
 \end{aligned}
 \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec :

t : le stade de gestation, j

CNR : le coefficient de rétention protéique dépendant du rang de portée

EM – EM_m : l'EM disponible au dessus du besoin d'entretien, MJ

NRuc : la rétention protéique dans les contenus utérins, g (Eq. 4)

L'énergie restante disponible de la ration après utilisation pour le besoin d'entretien, pour le développement du conceptus et après le dépôt protéique est déposée dans les lipides (Noblet et al., 1990). Les truies nullipares ont des besoins énergétiques supérieurs aux multipares pour le dépôt maternel car la croissance des jeunes truies demande plus d'énergie que la restauration des réserves mobilisées durant la précédente lactation (Solà-Oriol et Gasa, 2017).

Facteurs de variation intrinsèques et extrinsèques du besoin énergétique. Le niveau d'activité physique varie selon plusieurs facteurs dont le mode de logement (Weng et al., 2009) et l'individu (Durand et al., 2021). Bien que supposée au repos, le besoin d'entretien en énergie intègre 4 h debout par jour pour l'activité physique, valeur moyenne établie à partir de truies logées en stalle. Chaque minute debout supplémentaire correspond à une dépense énergétique de 0.30 kJ par kg PV^{0.75} (Noblet et al., 1993b). Les truies dépensent deux fois plus d'énergie en position debout qu'en position allongée et la mise en mouvement augmente linéairement le besoin avec l'augmentation de la vitesse de marche des truies (Labussière et al., 2022).

Les conditions d'ambiance et les comportements sociaux influent sur le besoin énergétique (Gaillard et al., 2021). En dessous de la température critique inférieure (20°C pour une truie logée seule, 14°C pour des truies logées en groupe), un besoin de thermorégulation apparaît : une partie de l'énergie est utilisée pour maintenir la température corporelle car le porc est un animal homéotherme. Le besoin est évalué entre 10 et 18 kJ par kg de PV^{0.75} par °C en dessous de la température critique inférieure (Durmad et al., 2008). Une température supérieure à la température critique supérieure (22°C pour la truie) n'augmente pas la dépense énergétique de l'individu mais entraîne une réduction de l'ingéré des animaux qui diminue la production de chaleur corporelle associée à l'utilisation métabolique (Renaudeau et al., 2012). Dans une situation de stress, le nombre d'interactions négatives augmente ainsi que l'activité des individus, ce qui augmente leur dépense énergétique (Durand et al., 2023a).

Une meilleure prise en compte de ces facteurs de variation intrinsèques et extrinsèques dans les modèles est attendue dans un future proche (Quiniou, 2021). Elle passera par la prise en compte à l'échelle individuelle et en temps réel d'informations en remplacement des valeurs moyennées pour affiner l'estimation des besoins énergétiques.

Tableau 1.2 – Besoins énergétiques moyennés de la truie (en énergie métabolisable, EM), en fonction du rang de portée et de la taille de portée pour deux stades de gestation

Nombre de porcelets, nés totaux par portée					10	13	16	19	22
Poids de la portée à la naissance, kg					15,1	22,8	23,1	26,2	29,5
Rang de portée	Stade de gestation (jour)	Poids net de la truie, kg	Besoin d'entretien, MJ/j	Besoin énergétique pour le dépôt maternel, MJ/j	Besoin pour le conceptus, MJ/j				
1	≤85	192	23,3	11,1	0,6	0,9	0,9	1,1	1,2
	>85	235	27,1	4,0	2,6	3,9	4,0	4,7	5,3
2	≤85	217	25,5	13,2	0,6	0,9	0,9	1,1	1,2
	>85	258	29,0	7,5	2,6	3,9	4,0	4,7	5,3
3	≤85	257	28,9	10,6	0,6	0,9	0,9	1,1	1,2
	>85	297	32,3	3,9	2,6	3,9	4,0	4,7	5,3
4	≤85	268	29,9	12,7	0,6	0,9	0,9	1,1	1,2
	>85	318	33,9	4,3	2,6	3,9	4,0	4,7	5,3
5+	≤85	280	30,9	12,4	0,6	0,9	0,9	1,1	1,2
	>85	327	34,6	4,8	2,6	3,9	4,0	4,7	5,3
Moyenne		255	28,7	10,1	1,8				

Note : La simulation a été effectuée avec le modèle présenté par Gaillard et al. (2019) avec un objectif d'épaisseur de lard dorsal à la mise-bas de 19 mm et une épaisseur de lard dorsal à l'insémination de 15 mm.

1.2.3. Modélisation des besoins en acides aminés

Les protéines jouent un rôle structural et assurent de nombreuses fonctions physiologiques (enzymes ou hormones). Elles sont composées d'un ensemble d'acides aminés (**AA**) dont certains peuvent être synthétisés par l'organisme (AA non-essentiels), et d'autres non, qui nécessitent d'être apportés par l'alimentation (AA essentiels).

Utilisation digestive. Les AA totaux provenant des protéines alimentaires et les apports sous forme libre ne sont pas tous disponibles pour l'individu. Seulement une partie est digérée et la mesure de la digestibilité iléale (pour l'iléon, partie la plus distale de l'intestin grêle ; Sève, 1994) permet de s'affranchir des problèmes posés par le remaniement du contenu digestif dans le gros intestin par les fermentations bactériennes. Cependant, la digestibilité iléale dite « apparente » ne prend pas en compte les sécrétions endogènes non spécifiques à l'aliment (enzymes digestives et desquamations cellulaires) qui sont collectées ce qui conduit à sous-estimer la quantité d'AA alimentaires ayant été absorbée. Ces pertes endogènes sont prises en compte dans le calcul de la digestibilité iléale dite « standardisée » (**DIS**) (Sève, 1994 ; Stein et al., 2007). Faute de valeur spécifique pour la truie, on extrapole les DIS obtenues en porc en croissance.

Protéine idéale. Le concept de protéine idéale, défini par Mitchell (1964), correspond à un apport où tous les AA essentiels sont co-limitants. La protéine a alors un profil d'AA qui correspond exactement aux différents besoins en AA de l'organisme. Le rendement de dépôt de chaque AA dans les protéines est également pris en compte. Chez le porc, 10 AA sont considérés comme essentiels (van Milgen et Dourmad, 2015) et la lysine (**Lys**) est le plus souvent le premier AA limitant. Les apports des autres AA essentiels sont donc raisonnés relativement à la Lys. Le profil de la protéine idéale et le besoin en Lys évoluent en fonction du stade physiologique de l'animal (Dourmad et al., 2008).

De même que pour l'énergie, différents compartiments sont utilisés pour évaluer les besoins en AA DIS par la modélisation : l'entretien, les contenus utérins dont les fœtus ainsi que les dépôts maternels. Il est à noter que chaque compartiment a sa propre « protéine idéale » dans le modèle NRC (2012) alors que dans le modèle InraPorc (Dourmad et al., 2008) considère un profil moyen supposé stable au cours de la gestation (Tableau 1.3 ; van Milgen et Dourmad, 2015). Pour la Lys, un rendement d'utilisation maximal de 65 % à 67 % a été évaluée pour la truie (Dourmad et Etienne, 2002). Le rendement d'utilisation maximal des autres AA est calculé en fonction du rendement d'utilisation maximal fixé pour la Lys, du ratio entre cet AA et la Lys ainsi que de la proportion de cet AA dans les différents compartiments corporels (van Milgen et Dourmad, 2015). Ces rendements sont appliqués uniquement pour les AA déposés dans les protéines des contenus utérins et maternels car le rendement pour l'entretien est supposé

de 100 %. Chaque compartiment a une cinétique d'évolution qui dépend de l'avancée de la gestation (Trottier et al., 2014).

Tableau 1.3 – Profil de la protéine idéal pour la truie gestante en fonction du compartiment considéré pour deux modèles (NRC, 2012 ; InraPorc présenté par Dourmad et al., 2008)

Modèle	NRC						InraPorc
Compartiment	Entretien	foetus	utérus	placenta + fluides	glande mammaire	Tissus maternels	global
lysine	100	100	100	100	100	100	100
arginine	49	113	103	101	84	105	-
histidine	35	36	35	42	35	47	30
isoleucine	86	50	52	52	24	54	65
leucine	104	118	116	122	123	101	100
methionine	26	32	25	25	23	29	28
methionine + cysteine	106	54	50	50	51	45	65
phenylalanine	72	60	63	68	63	55	60
phenylalanine + tyrosine	131	102	-	-	-	97	100
threonine	128	56	61	66	80	55	72
tryptophane	31	19	15	19	24	13	20
valine	109	73	75	83	88	69	75

Besoin d'entretien. Le besoin d'entretien journalier en Lys correspond au recyclage protéique présent dans l'organisme ($23,9 \text{ mg par kg de PV}^{0,75}$) ; aux pertes par desquamation intestinale ($4,5 \text{ mg par kg de PV}^{0,75}$) et aux pertes endogènes dans le tractus digestif ($313 \text{ mg par kg de matière sèche ingérée}$; van Milgen et al., 2008).

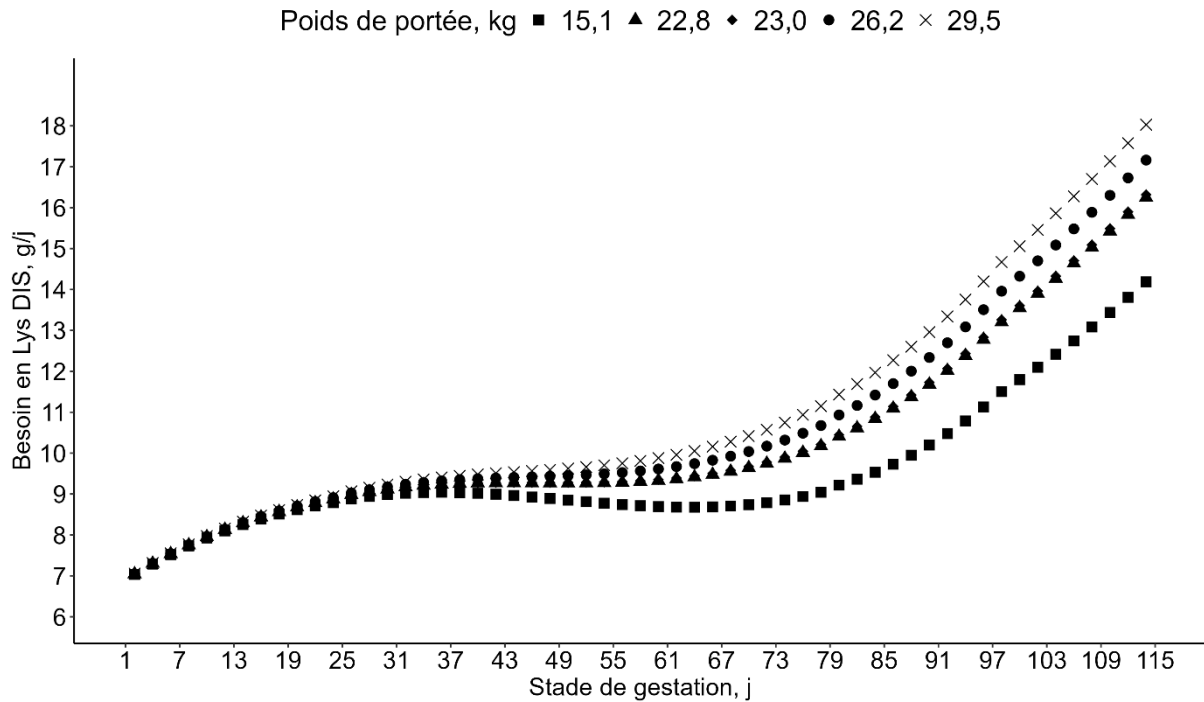
Besoin pour le développement du conceptus. La rétention protéique dans les contenus utérins par jour dépend du NP et du stade de gestation (t). L'équation (Eq.4) établie par Noblet (1990) pour exprimer cette relation est la suivante :

$$NRuc \text{ en } g(t) = \exp(8,09 - 8,71 \times \exp(-0,01494 \times t) + 0,0872 \times NP) / 6,25 \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec :

t : le stade de gestation, j

Cette équation issue de truies mettant bas des portées de 13 porcelets au maximum doit être corrigée pour prendre en compte l'évolution du poids de portée avec la sélection génétique (Figure 1.7). En effet, en comparant sur les 10 dernières années les valeurs génétiques des truies des lignées commerciales pour le besoin en Lys DIS, Knap (2025) a estimé une augmentation du besoin en Lys DIS à $0,10 \text{ g par jour de gestation et par an}$ sur la période de 2013 à 2023.



Note : La simulation a été effectuée avec le modèle présenté par Gaillard et al. (2019) avec un objectif d'épaisseur de lard dorsal à la mise-bas de 19 mm et une épaisseur de lard dorsal à l'insémination de 15 mm pour une truie de rang de portée 3 avec 233 kg à l'insémination et un gain de poids de 39 kg.

Figure 1.7 : Évolution du besoin en lysine digestible iléale standardisée (Lys DIS) au cours de la gestation selon le poids de la portée à la mise-bas

Besoins pour la constitution des tissus maternels. La rétention protéique totale de l'animal par jour est évaluée avec une relation empirique déterminée par Dourmad et al. (2008) suivant un polynôme de degré 3 du temps et dépendant du rang de portée de l'animal et de l'apport énergétique journalier :

$$NR \text{ en } g(t) = 0,85 \times (-0,4 + 45,9 \times \left(\frac{t}{100}\right) - 105,3 \times \left(\frac{t}{100}\right)^2 + 64,4 \times \left(\frac{t}{100}\right)^3 + CNR \times (EM - EM_m) + (NRuc(t) - NRuc(t-1))) \quad (\text{Eq. 5})$$

Avec :

t : le stade de gestation, j

CNR : le coefficient de rétention protéique dépendant du rang de portée

$EM - EM_m$: l'EM disponible au – dessus du besoin d'entretien, MJ

$NRuc$: la rétention protéique dans les contenus utérins, g

L'équation 5 permet de calculer la rétention protéique maternelle de la différence entre la rétention protéique totale et celles dans les contenus utérins. Le coefficient de rétention protéique (**CNR**) décroît avec l'augmentation de l'âge, marquant la plus faible possibilité de déposer des protéines. Pour le NRC (2012), les auteurs ont fait le choix de séparer l'effet du stade de gestation sur la rétention protéique totale et l'ont intégré dans une deuxième équation. Cette deuxième équation fait l'hypothèse d'une rétention protéique sur la première partie de gestation et ainsi après 56 jours de gestation, la rétention protéique selon l'effet du stade de gestation est fixée à 0.

Dans les 45 derniers jours de gestation, la masse protéique des fœtus et des tissus mammaires est multipliée, respectivement, par 18 et 27 (Ji et al., 2006 ; McPherson et al., 2004). Ces évolutions dues à une croissance exponentielle des fœtus sont associées à une augmentation non proportionnelle des besoins en énergie et AA avec un ratio AA/énergie qui augmente à la fin de gestation (Trottier et al., 2014). Ce ratio évolue différemment selon les caractéristiques individuelles des truies que ce soit par leur composition corporelle ou par leurs performances productives (Gaillard et al., 2019 ; Noblet et al., 1990). Notamment, les truies plus âgées sont déjà à maturité en termes de poids et ont un ratio plus faible que les cochettes (Thomas et al., 2021). Plus les performances productives sont élevées, plus le ratio AA/énergie sera élevé à ce stade. Avec l'augmentation de la prolificité des animaux et du poids de portée à la naissance, doubler le poids de portée correspond à doubler les besoins en Lys DIS sur le dernier mois de gestation (Tableau 1.4). Ainsi, il est important d'adapter les apports en AA en fonction des besoins individuels des truies gestantes tout en raisonnant cet apport par rapport à celui en énergie.

Tableau 1.4 – Besoins en lysine digestible iléale standardisée de la truie en fonction du rang de portée et de la taille de portée pour deux stades de gestation

Nombre de porcelets, nés totaux par portée					10	13	16	19	22
Poids de la portée à la naissance, kg					15,1	22,8	23,1	26,2	29,5
Rang de portée	Stade de gestation	Poids net de la truie, kg	Besoin d'entretien, g/j	Besoin pour le dépôt maternel, g/j	Besoin pour le conceptus, g/j				
1	≤85	192	2,2	7,0	0,8	1,3	1,3	1,5	1,6
	>85	235	2,6	7,4	3,5	5,2	5,3	6,0	6,7
2	≤85	217	2,5	6,6	0,8	1,3	1,3	1,5	1,6
	>85	258	2,8	6,9	3,5	5,2	5,3	6,0	6,7
3	≤85	257	2,7	5,1	0,8	1,3	1,3	1,5	1,6
	>85	297	3,0	5,4	3,5	5,2	5,3	6,0	6,7
4	≤85	268	2,9	5,7	0,8	1,3	1,3	1,5	1,6
	>85	318	3,1	6,0	3,5	5,2	5,3	6,0	6,7
5+	≤85	280	3,0	5,6	0,8	1,3	1,3	1,5	1,6
	>85	327	3,1	5,9	3,5	5,2	5,3	6,0	6,7
Moyenne		255	2,7	6,1	2,4				

Note : La simulation a été effectuée avec le modèle présenté par Gaillard et al. (2019) avec un objectif d'épaisseur de lard dorsal à la mise-bas de 19 mm et une épaisseur de lard dorsal à l'insémination de 15 mm.

1.2.4. Modélisation des besoins en phosphore et calcium

L'estimation des besoins des minéraux pour la truie se concentre principalement sur les macro-minéraux (incorporés à plus de 100 ppm dans l'aliment) comme le P et le calcium (**Ca**). Le P et Ca sont primordiaux pour la constitution du squelette. L'hydroxyapatite est le composant majeur de l'os, qui correspond à une liaison entre ces deux minéraux. Plus de deux tiers du P et plus de neuf dixièmes du Ca sont stockés dans l'os (Crenshaw, 2001). De plus, alors que le P est le composant principal des membranes cellulaires et de l'ATP, le Ca joue un rôle de cofacteur dans des réactions enzymatiques clés, *e.g.* dans la contraction des cellules musculaires y compris celles du cœur. Peu d'études portent sur les autres minéraux d'intérêt comme le fer qui est un composant de l'hémoglobine du sang par exemple. Présents en plus ou moins grande quantité dans les matières premières, les micro-minéraux sont apportés en supplémentation *via* le complément oligo-vitamines (ou prémix) de la ration. Le P et Ca sont intégrés dans l'aliment principalement *via* des sources minérales. Le Ca est souvent incorporé en grande quantité dans les formules car les matières premières telles que le carbonate de calcium sont peu chères, elles peuvent servir également comme support pour le prémix (Lagos et al., 2023). Or, le Ca et P sont en forte interaction, un excès d'un des minéraux au niveau alimentaire entraîne une mauvaise absorption digestive de l'autre (Létourneau-Montminy et al., 2012 ; Stein, 2024). Un apport excessif de Ca dans la ration alimentaire réduit l'absorption du P car ce dernier se lie au Ca dans les conditions de pH de l'intestin grêle (Walk, 2016).

Utilisation digestive. Le P présent dans les végétaux n'est pas digestible à 100 %, car 60 à 80 % du P est complexé sous forme de phytates qui, en l'état, n'est pas digestible par les porcs. L'incorporation de phytases dans l'aliment permet de rendre disponible une partie de ce P (Jongbloed et al., 2004). Exprimer les apports vis-à-vis des besoins en P_{dig} permet d'être plus précis que l'utilisation du P total de l'aliment (Jondreville et Dourmad, 2005). Le P_{dig} est exprimé actuellement sous deux formes dans la littérature : la teneur exprimée selon la digestibilité totale apparente du P (**ATTD-P**) ou la digestibilité totale standardisée du P (**STTD-P**). Le P est principalement digéré dans l'intestin grêle par transports actifs et diffusion passive et il n'existe pas de différence significative entre le P disponible à la fin de l'iléon et le P disponible au niveau fécal (Bohlke et al., 2005). Ainsi, l'ATTD-P est obtenue en soustrayant au P ingéré de la ration, le P excrété dans les fèces (She et al., 2017). Le STTD-P retranche quant à lui les pertes endogènes liées à la progression du digestat dans le tractus digestif aux valeurs obtenues d'ATTD-P. Le STTD-P est considéré comme additif dans la formulation des aliments (Stein, 2024). La digestibilité des truies gestantes est différente de celle des porcs en croissance et cette digestibilité évolue au cours de la gestation (Lee et al., 2021, 2019). Cependant, par manque de données spécifique pour les truies, les valeurs obtenues chez le

porc en croissance sont utilisées. Pour les pertes endogènes de P exprimées en fonction de la matière sèche ingérée, elles dépendent du poids de l'animal et de la teneur en fibres de la ration (Bikker et al., 2017) et ne devraient pas être généralisées à l'ensemble des stades physiologiques. En attendant les résultats de travaux en cours et de nouvelles valeurs de STTD-P pour les matières premières pour les truies en gestation, l'ATTD-P est encore utilisé dans les tables françaises (INRA-CIRAD-AFZ, 2017).

Le Ca est absorbable sous sa forme ionique (Ca^{2+}) à travers la muqueuse intestinale de l'intestin grêle par diffusion passive et transport actif (Fox et al., 1978). Comme pour le P, la digestibilité est évaluée à la fin du tractus digestif car il n'y a ni absorption nette ni de sécrétion significative dans le gros intestin (González-Vega et Stein, 2014). Le Ca digestible (Ca_{dig}) peut être exprimé en ATTD ou en STTD s'il est corrigé des pertes endogènes. Cependant, leurs estimations varient entre expérimentations (Stein, 2024) empêchant d'utiliser une valeur qui fait consensus. Ainsi, les apports pour la truie gestante sont exprimés en Ca total et non en Ca_{dig} par manque de valeurs de digestibilité disponibles et par une méconnaissance de la régulation de l'absorption en fonction de la couverture du besoin (Quiniou et al., 2021). Les besoins sont estimés en Ca_{dig} puis divisés par une valeur fixe de digestibilité, e.g. 30 % pour la truie gestante, afin d'exprimer les besoins en Ca total (Durmad, 2019).

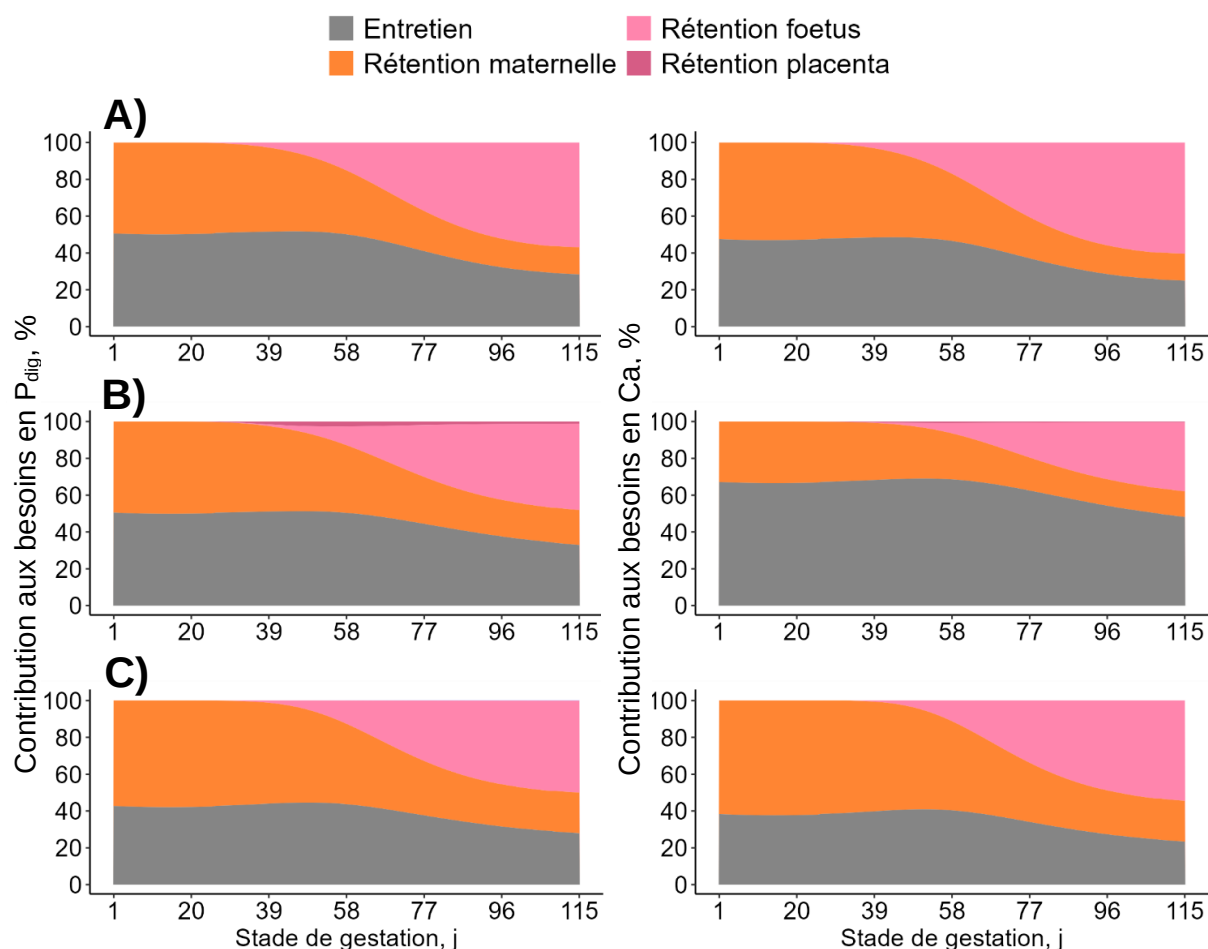
Approche factorielle. Pour la truie gestante, l'évaluation des besoins en minéraux par la modélisation mécaniste et déterministe est récente. Plusieurs modèles peuvent être utilisés actuellement pour estimer les besoins en P_{dig} et en Ca_{dig} au cours de la gestation (Bikker et Blok, 2017 ; Gaillard et al., 2019 ; NRC, 2012 ; Quiniou et al., 2021). Par analogie avec les AA, les compartiments communément pris en compte par ces modèles sont l'entretien, les contenus utérins (foetus et placenta) ainsi que la rétention maternelle. Le modèle développé par Bikker et Blok (2017) prend en compte deux compartiments supplémentaires que sont les fluides corporels et la glande mammaire. Les besoins sont estimés en STTD-P pour l'ensemble des modèles cités sauf pour le modèle établi par Quiniou et al. (2021) évalués en ATTD-P. Il n'existe pas d'équations propres au Ca pour la truie gestante, ce besoin est estimé à partir de celui estimé en P en utilisant des ratios entre Ca et P spécifiques aux différents compartiments considérés.

Besoin d'entretien. L'expression du besoin en digestibilité apparente ou en digestibilité standardisée a un impact sur la définition du besoin d'entretien. Avec l'ATTD, les pertes endogènes fécales doivent être considérées comme une composante du besoin d'entretien (Jondreville et Durmad, 2005). Avec le STTD, ces pertes sont déjà prises en compte et retranchées de l'apport. Ainsi, le modèle de Quiniou et al. (2021) présente un besoin d'entretien issu des résultats de Guéguen et Pérez (1981) estimé à 10 mg par kg de PV de la

truie légèrement supérieur à la valeur de 7 mg par kg des autres modèles car intégrant les pertes endogènes fécales. Pour le Ca, le besoin est évalué à 10 mg par kg de PV par Bikker et Block (2017) et Gaillard et al. (2019). Par la prise en compte des pertes endogènes fécales, le besoin est estimé à 35 mg par kg de PV pour Quiniou et al. (2021), d'après Guéguen et Pérez (1981).

Besoin pour le développement du conceptus. Pour estimer les besoins en minéraux digestibles liés à la croissance des fœtus, un ratio de teneur en minéraux par kg de poids de fœtus est utilisé. Pour estimer le poids des fœtus, Quiniou et al (2021) et Bikker et Block (2017) utilisent l'Eq. 1 précédemment citée (Noblet et al., 1985) tandis que Gaillard et al. (2019) utilisent une équation rapportée par Jondreville et Dourmad (2005). La teneur en P est établie à 6,20, 5,97 et 6,25 g par kg de fœtus dans les modèles de Quiniou et al. (2021), Bikker et Block (2017) et Gaillard et al. (2019), respectivement et celle en Ca à 11 g par kg de fœtus pour l'ensemble de ces modèles. Le besoin en minéraux pour le placenta est supposé dépendre du dépôt protéique dans ce tissu comme proposé par Jongbloed et al. (2003) et corrigé par le poids actuel des portées. Le besoin en Ca pour le placenta correspond à 0,8 fois le besoin en P pour le placenta selon Quiniou et al. (2021) et Bikker et Block (2017) tandis qu'il vaut 1,8 fois le besoin en P dans le modèle de Gaillard et al. (2019).

Besoins pour la constitution des tissus maternels. Le dépôt de minéraux dans les tissus maternels dépend du gain de poids dans les modèles cités. Le besoin est établi à 5,5 g de P par kg de gain selon Jongbloed et al. (2003), valeur reprise dans les modèles de Quiniou et al (2021) et Bikker et Block (2017). Dans le modèle de Gaillard et al. (2019), ce besoin varie en fonction du poids de l'animal à partir d'une équation dérivée de Jondreville et Dourmad (2005) et varie entre 3,3 et 4,4 g de P par kg de gain de PV. Le besoin en Ca correspond à 1,65 et 1,75 fois le besoin en P, respectivement pour Gaillard et al. (2019) et Quiniou et al. (2021). Bikker et Block (2017) utilisent le même ratio pour les truies multipares que Quiniou et al. (2021) mais font une distinction pour les truies nullipares avec un ratio de 1,60. Les compartiments supplémentaires présents dans le modèle de Bikker et Blok (2017) que sont les fluides corporels et le dépôt dans les glandes mammaires contribuent à moins de 1 % du besoin total en P ou Ca sur la gestation (Figure 1.8). Cela explique qu'ils ne soient pas considérés dans les autres modèles cités.

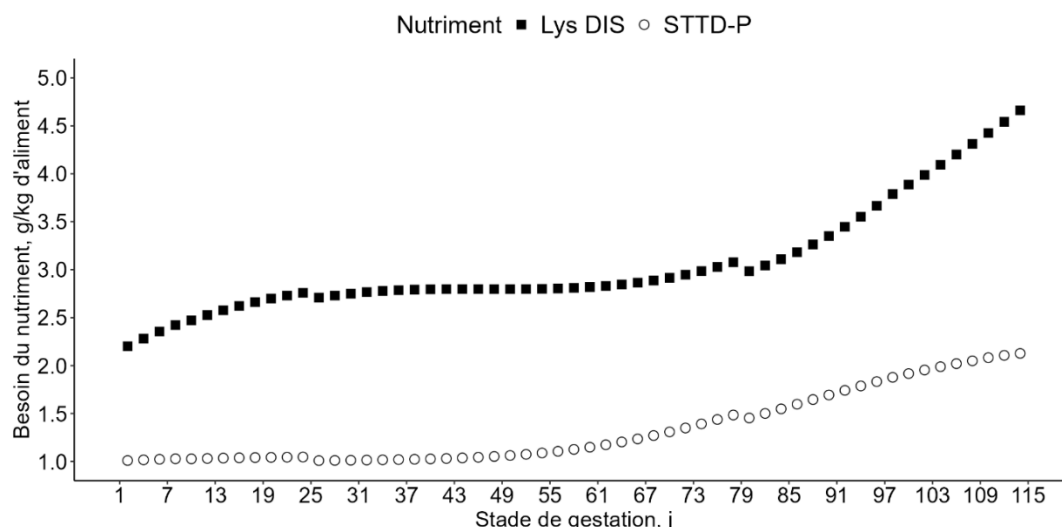


Note : La simulation a été effectuée avec le modèle présenté par Gaillard et al. (2019) avec un objectif d'épaisseur de lard dorsal à la mise-bas de 19 mm et une épaisseur de lard dorsal à l'insémination de 15 mm pour une truie de rang de portée 3 avec 233 kg à l'insémination et un gain de poids de 39 kg. La portée à la mise-bas est composée de 16 porcelets ayant un poids moyen de 1,44 kg. La digestibilité du Ca a été fixée à 30 %. Modèles utilisés : A) Gaillard et al. (2019) ; B) Quiniou et al. (2021) ; C) Bikker et Blok (2017).

Figure 1.8 : Contribution de chaque compartiment au besoin journalier en phosphore digestible (P_{dig}) et en calcium (Ca) estimé par des modèles mécanistes

Pour les truies gestantes, les recommandations de formulation de l'aliment varient de 3,5 à 5,5 concernant le ratio Ca total / ATTD-P et sont légèrement plus basses lorsqu'elles sont exprimées en Ca total / STTD-P, *i.e.* 3,0 à 3,3 (Bikker et Blok, 2017), selon l'hypothèse d'utilisation digestive du Ca. Ce ratio théorique devrait évoluer en réalité en fonction de l'évolution des besoins selon le stade de gestation, *e.g.* le dépôt de Ca est plus important que le dépôt de P au niveau des fœtus et il triple entre le début du développement fœtal et la mise-bas (Quiniou et al., 2021). La cinétique d'évolution des besoins de P_{dig} au cours de la gestation diffère de la cinétique d'évolution des besoins en AA (Figure 1.9). Avec seulement deux aliments ayant des teneurs contrastées mais fixe en nutriments, mélangés en proportions variables, il n'est pas possible de satisfaire conjointement les besoins en AA et en P_{dig} individuels des truies de l'ensemble du troupeau. Utiliser trois aliments au cours de la gestation

permettrait d'éviter les carences ou excès pour lesdits nutriments et pourrait améliorer les performances économiques et environnementales.



Note : La simulation a été effectuée avec le modèle présenté par Gaillard et al. (2019) avec une truie ayant les mêmes caractéristiques que pour la Figure 1.8. La méthode d'estimation du besoin en STTD-P est celle décrite par Gaillard et al. (2019). Le décrochage à 25 jours de gestation et 80 jours de gestation correspondent à un changement de phase alimentaire marqué par une évolution de la quantité d'aliment apportée.

Figure 1.9 : Évolution des besoins en lysine digestible iléale standardisée (Lys DIS) et en phosphore digestible standardisé total (STTD-P) par kg d'aliment au cours de la gestation



Éléments-clés : Les modèles permettent d'estimer pour chaque truie les besoins nutritionnels journaliers au cours de la gestation.

L'estimation des besoins est réalisée à partir de modèles par approche factorielle détaillant l'évolution des compartiments représentant la truie au cours de la gestation. L'estimation des besoins s'est focalisée en premier lieu sur l'énergie et les acides aminés, facteurs essentiels des performances productives, économiques et environnementales. Les besoins et les apports sont exprimés avec les systèmes nutritionnels permettant de raisonner les apports sous une forme au plus près des besoins selon les connaissances disponibles. Les modèles d'estimation des besoins en minéraux se sont développés ces dernières années avec un focus sur le phosphore et le calcium pour réduire l'impact environnemental des élevages et l'utilisation de phosphore minéral issu de ressources non renouvelables. Voyons donc maintenant, quelles stratégies d'alimentation sont adoptées pour répondre aux besoins des truies gestantes.

1.3. Les stratégies d'alimentation des truies gestantes

1.3.1. Rationner pour piloter l'état corporel à la mise-bas

L'état des réserves des truies à la mise-bas est hautement modulable par l'alimentation durant la gestation (Solà-Oriol et Gasa, 2017) d'où l'intérêt de mettre en place un plan de nutrition pour optimiser les performances (Ferreira et al., 2021).

La motivation des truies en gestation à consommer de l'aliment est très élevée alors que leurs besoins sont faibles comparativement à la lactation. Au pic de lactation, les besoins sont deux à trois fois plus élevés qu'à la fin de la gestation (Feyera et Theil, 2017). En situation d'accès *ad libitum* à l'aliment, les truies gestantes sont capables de consommer jusqu'à sept à huit kilogrammes d'aliment (Cools et al., 2014 ; Read et al., 2020). Cette conduite entraîne une augmentation du poids et d'adiposité et une plus grande variabilité des niveaux de réserves au sein du troupeau (Theil, 2014).

Les truies trop lourdes et trop grasses ont une plus grande disposition à avoir des problèmes locomoteurs et d'aplomb (Heinonen et al., 2013). Par ailleurs, Plus les truies sont grasses, plus l'ingestion pendant la lactation est réduite (Lawlor et Lynch, 2007 ; Zhou et al., 2018), entraînant une mobilisation plus importante des réserves protéiques et lipidiques (Dourmad et al., 1994), avec des problèmes de retour en œstrus après le sevrage (Koketsu et al., 1996 ; Lavery et al., 2019). Cet état augmente ainsi le risque d'une réforme précoce des truies et concomitamment une baisse de la longévité dans le troupeau (Niemi et al., 2017).

Les truies trop lourdes et trop grasses ont également un plus grand risque de développer un syndrome de dysgalactie post-partum (Göransson, 1989), marqué par une production réduite voire nulle de lait, négative pour la survie des porcelets (Quiniou, 2016). La durée de la mise-bas est prolongée, facteur d'augmentation du risque de mortinatalité (Oliviero et al., 2010). La situation inflammatoire due au syndrome de dysgalactie post-partum entraîne également une plus forte mobilisation des réserves osseuses de la truie (Karst et al., 2021).

Des truies trop maigres à la mise-bas, quant à elles, mettent bas plus de porcelets légers et de MN (Maes et al., 2004 ; Vanderhaeghe et al., 2010). Des porcelets plus légers à la naissance sont moins vigoureux et ont un plus grand risque de mourir (Langendijk et al., 2023). Les faibles réserves à disposition de ces truies ne permettent pas de compenser le déficit nutritionnel très longtemps et conduisent à une moindre production laitière (Kim et al., 2009; Thongkhuy et al., 2020). Ces truies sèvent ainsi des portées moins lourdes malgré une consommation d'aliment plus élevée durant la lactation (Amdi et al., 2014 ; Quiniou, 2016). Une variation trop importante des réserves protéiques et lipidiques au cours d'un cycle de reproduction augmente la probabilité que la truie soit réformée précocement (Dourmad et al.,

1994) avec des effets possiblement négatifs d'un apport sous-optimal en protéines en fin de gestation entraînant un catabolisme protéique (Goodband et al., 2013).

Ces résultats indiquent qu'une plage optimale de poids et de réserves adipeuses (Tableau 1.5) est à considérer à la mise-bas afin d'accroître le poids des porcelets à la naissance et au sevrage tout en limitant les risques de problèmes peri-partum (Muro et al., 2023 ; Quiniou, 2016). Cette plage dépend du type génétique de l'animal (IFIP, 2013), des équipements utilisés pour le suivi et de la conduite d'élevage. Une valeur d'ELD comprise entre 17 et 20 mm à la mise-bas (pour une lactation de 4 semaines) semble optimale pour les truies issues des différentes lignées Large White x Landrace (Tableau 1.5). L'objectif d'ELD peut être revu à la baisse pour un même type génétique lorsque le tarissement est effectué plus tôt, e.g. après 3 semaines de lactation, ou lorsque les truies consomment facilement une grande quantité d'aliment pendant la lactation (et mobilisent donc moins de réserves).

Ce n'est pas seulement la quantité d'aliment à apporter qu'il faut considérer mais également la qualité nutritionnelle de l'aliment qui permet aux truies d'atteindre la plage optimale de réserves à la fin de la gestation (Amdi et al., 2014). L'apport alimentaire des truies est donc restreint durant la gestation où la ration journalière est fractionnée en plusieurs doses (Dourmad et al., 2021).

1.3.2. Alimenter en phases

Les stratégies d'alimentation sont conçues en découpant la gestation en phases (Figure 1.10). Pour chaque phase, une ration allouée fixe d'un aliment donné est distribuée journalièrement.

Phase unique. Un plan constant consiste à distribuer la même quantité d'aliment tout au long de la gestation avec le même aliment dont la valeur nutritionnelle est fixée (Trottier et al., 2014). Cependant, comme les besoins de la truie évoluent au cours de la gestation, cette stratégie montre des limites. Il en résulte une efficacité d'utilisation faible de la ressource alimentaire (Young et al., 2004).

Pour améliorer l'efficacité de la production porcine par le levier de l'alimentation, Dourmad et al. (1994) ont suggéré de fonder les apports sur des mesures de poids et d'ELD réalisées au début de la gestation avec des objectifs pour ces deux critères à la mise-bas. Le but est de nourrir toutes les truies de même rang, poids et d'ELD au début de gestation avec la même quantité d'aliment sur la gestation. Cependant, avec l'accroissement exponentiel des besoins liés à la croissance fœtale à la fin de la gestation (Salmon-Legagneur, 1965), appliquer un aliment unique à quantité fixe durant la gestation conduit à un apport de nutriments en excès au début de la gestation et un déficit d'apport à la fin de la gestation négatives pour les performances économiques, environnementales et de production (Ball et Moehn, 2013 ; Goodband et al., 2013).

Tableau 1.5 – Plage optimale d'épaisseur de lard dorsal (ELD) à la mise-bas¹ en fonction du type génétique et de l'appareil de mesure utilisé. Adapté de Muro et al. (2023)

Référence	Nombre de truies	Type génétique	Appareil de mesure	Position de l'appareil	Durée de lactation, j	ELD, mm
Kim et al. (2015)	2875	Large White x Landrace	Lean-Meater ²	P2	18	17-21
De Rensis et al. (2005)	134	Large White x Landrace	Sonolayer SAL-32B ³	P2	21	16-24
Farmer et al. (2017)	353	Large White x Landrace	Vetkoplus ⁴	P2	21	20-26
Zhou et al. (2018)	846	Large White	Piglog 105 version 3.1 ⁵	P2	21	19-22
Maes et al. (2004)	743	Truies PIC ou croisement Dalland	Piglog 105 version 3.1 ⁵	P2	21 ou 25	16-20
Quiniou (2016)	101	Large White x Landrace	Echographe Imago ⁶	P2	21 ou 28	18-20
Clowes et al. (2003)	50	Camborough (Large White x Landrace) x Canabrid	Scanoprobe II ⁷	P2	26	16-18
Tummaruk (2013)	70	Large White x Landrace	Lean-Meater ²	P2	26	15-20
Amdi et al. (2014)	140	Large White x Landrace	Lean-Meater ²	P2	28	16-20
Cools et al. (2014)	112	Sino-européenne Naïma	Lean-Meater ²	P2	28	18-22
Superchi et al. (2019)	48	Large White x Landrace	Lean-Meater ²	P2	Non spécifié	16-22
Tarrés et al. (2006)	467	Duroc	Piglog 105 version 3.1 ⁵	P2	Non spécifié	15-19
Thongkhuy et al. (2020)	73	Large White x Landrace	Lean-Meater ²	Non spécifié	29	13-15
Tian et al. (2018)	118	Landrace	Echographe Renco ⁸	droite de la dernière côte	Non spécifié	15-19
Young et al. (2004)	684	Camborough 22 (Large White x Landrace x Duroc)	Lean-Meater ²	P2	Non spécifié	17-21

Abréviations : P2 = 6,5 cm de part et d'autre de la ligne médiane au niveau de la dernière côte (King et al., 1986 ; Whittemore et al., 1980).

¹ Les mesures ayant été prises entre 105 jours de gestation et 2 jours après mise-bas ont été considérées. Les références sont classées par durée de lactation croissante.

² Renco Corp., Minneapolis, MN, États-Unis

³ Thoshiba, Tokyo, Japon

⁴ NOVEKO Int., Lachine, QC, Canada

⁵ SFK-Technology, Soborg, Danemark

⁶ IMV Technologies, L'Aigle, France

⁷ Scano, Ithaca, NY, États-Unis

⁸ Renco electronics, Rockledge, FL, USA

Deux phases. La conception d'une alimentation en deux phases raisonnée sur la base des besoins énergétiques, a pour objectif d'améliorer la couverture des besoins pendant la période de développement intense des fœtus à la fin de la gestation. Ball et Moehn (2013) considèrent ainsi, à partir de 84 jours de gestation, un apport supplémentaire d'aliment au cours de cette deuxième phase. L'appellation « bump feeding » est souvent évoquée pour exprimer un apport plus conséquent d'aliment à la fin de la gestation. Il regroupe en réalité deux stratégies bien distinctes (Cloutier et al., 2024) :

- La première consiste en un apport supplémentaire d'aliment et donc d'énergie à la fin de la gestation. Elle entraîne une augmentation du PV et de l'ELD de la truie (Mallmann et al., 2019), une augmentation de la perte de poids durant la lactation (Liu et al., 2020), et une réduction de l'efficacité alimentaire (Araújo et al., 2020). Dans certains cas, une augmentation du poids de portée (Che et al., 2019 ; Choi et al., 2019) est observée à la mise-bas qui semblerait provenir de ce surplus énergétique pour des truies qui étaient plus maigres que l'objectif d'ELD considéré (Portal et al., 2021).
- La deuxième stratégie correspond à une redistribution de l'apport alimentaire à la fin de la gestation. L'apport total est équivalent sur la gestation entière à celui réalisé avec un plan constant (phase unique). Dans ce cas, avec la redistribution de l'aliment sur la fin de gestation, ni le poids de la truie, ni le poids des porcelets à la mise-bas ne sont influencés (Cloutier et al., 2024) mais le déroulement de la mise-bas serait facilité et la vitalité des porcelets à la naissance améliorée (Quiniou, 2005).

Au niveau de la qualité de l'aliment, Kim et al. (2009) préconisent plutôt de distinguer les phases au bout de 60 jours de gestation pour suivre l'augmentation des besoins en AA pour le développement placentaire, la croissance de la portée et des glandes mammaires (Wu et al., 2010). En deuxième phase, l'aliment présente un ratio AA/énergie plus élevé que celui de la première phase. Au sein des élevages commerciaux, la mise en place en pratique de cette stratégie biphasée ou d'un apport différencié par rang de portée peut être complexe à réaliser. Certains élevages mettent en place une stratégie dénommée « top-dressing », qui consiste à réaliser un apport supplémentaire de tourteau de soja en plus de la ration d'aliment gestante pour répondre à l'augmentation des besoins en AA à la fin de la gestation (Huber, 2025).

Comparativement à une stratégie en phase unique, la stratégie biphasée proposée par Kim et al. (2009) permet d'éviter la mobilisation des réserves protéiques des truies et de maintenir l'ELD. L'augmentation du catabolisme de la truie en fin de gestation est préjudiciable pour la croissance fœtale, l'ingestion alimentaire pendant la lactation et la production laitière (Vignola, 2009).

Trois phases. Kraeling et Webel (2015) proposent un découpage de la gestation en trois phases avec un objectif spécifique pour chacune d'entre elles. La première phase (de l'insémination à 30 jours de gestation) a pour objectif une reconstitution des réserves mobilisées durant la lactation précédente (Dourmad et al., 1996). Elle vise à favoriser également l'implantation et la survie des embryons (Hoving et al., 2011), en particulier pour les jeunes truies (Mallmann et al., 2020). La quantité optimale à apporter reste controversée car les résultats diffèrent entre études pour un même apport durant cette phase. Les études explorent un large spectre d'apport avec des rations allant de 1,8 à 3,7 kg et correspondant à un apport énergétique compris entre 17,5 et 34,2 MJ d'EN (Carrión-López et al., 2022 ; Hoving et al., 2011 ; Langendijk, 2021 ; Leal et al., 2019 ; Mallmann et al., 2020) selon l'état corporel à l'insémination et la quantité de réserves mobilisées à la lactation précédente.

La deuxième phase, entre 30 et 75 jours de gestation, a pour but de maintenir l'état corporel des truies ou de poursuivre la reconstitution des réserves si celle-ci n'est pas complète à la fin de la première phase. La ration durant cette phase est souvent la plus faible de la gestation. Les apports nutritionnels doivent cependant rester à minima supérieurs ou égaux au besoin d'entretien, au risque d'affecter le développement placentaire (Langendijk et al., 2023 ; Tan et al., 2022), de réduire la différenciation des fibres musculaires des porcelets pénalisant leur croissance (Cloutier et al., 2024 ; Ji et al., 2017) ainsi que leur poids à la naissance (Quiniou et Quesnel, 2008).

Enfin, la dernière phase correspond à la fin de la gestation, primordiale pour accompagner la croissance des fœtus et de la glande mammaire (Kraeling et Webel, 2015), la tonicité de la truie à la mise-bas (Boudon et al., 2016) et la vitalité des porcelets nouveau-nés (Langendijk et al., 2023). Elle est marquée par un accroissement des apports alimentaires. Farmer et al. (2023) ont montré qu'un apport en Lys DIS réalisé 40 % au-dessus des besoins entre 90 et 110 jours de gestation n'améliore pas le développement de la glande mammaire. Apporter au-dessus du besoin est inefficace d'un point de vue métabolique car les AA en excès vont être désaminés et utilisés comme source d'énergie (Trottier et al., 2014).

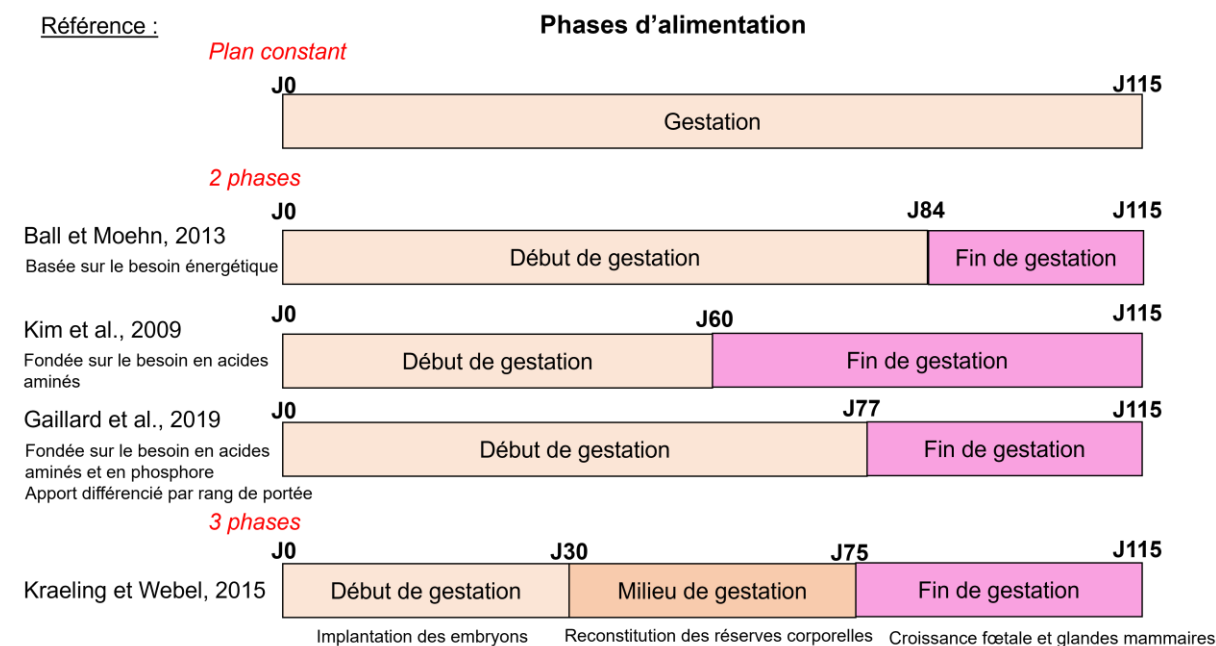


Figure 1.10 : Différentes phases considérées dans la stratégie d'alimentation de la truie gestante

La dernière semaine de gestation est souvent considérée comme une période de transition. Elle est marquée par un transfert des truies en salle de lactation, avec des systèmes d'alimentation permettant l'individualisation des apports au moment de la gestation où les besoins sont au plus haut (Theil, 2014). Plusieurs stratégies sont appliquées en élevage en fonction du matériel et des silos à disposition. Des élevages utilisent l'aliment de lactation (plus riche en AA et en énergie par kg d'aliment), d'autres poursuivent l'utilisation de l'aliment gestante et enfin certains élevages appliquent un mélange d'un aliment de gestation et de l'aliment lactation (Quiniou et al., 2018). Néanmoins, l'utilisation de l'aliment lactation uniquement accroît les rejets de N dans les urines (Pedersen et al., 2020) et il est moins riche en fibres ce qui accroît le risque de problèmes durant la mise-bas.

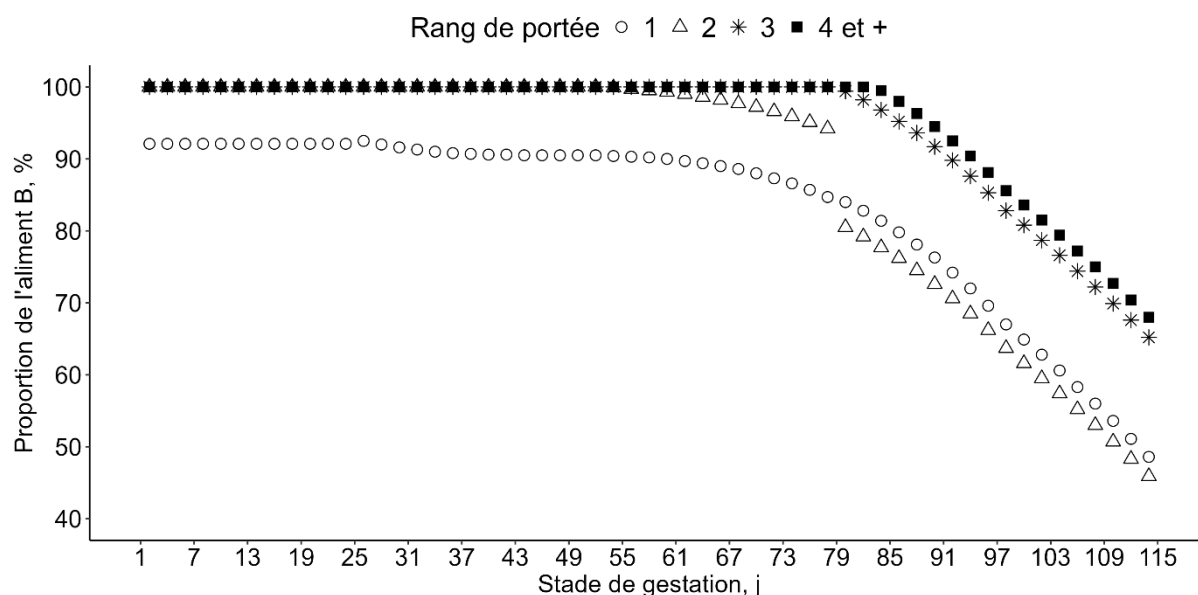
1.3.3. L'alimentation sur mesure

Le principe. L'alimentation sur mesure (également appelée « de précision ») est définie comme l'utilisation de techniques d'alimentation qui assurent, au bon moment, un apport d'aliment adéquat en quantité et en qualité nutritionnelle vis-à-vis des besoins individuels des animaux du troupeau (Pomar et al., 2009). Au niveau sémantique, l'utilisation du principe d'alimentation sur mesure (Médale, 2019) en lieu et place d'alimentation de précision est préférable. Il permet de rendre compte de la collecte d'une grande quantité d'informations pour la décision et la conduite de stratégies individualisées d'alimentation tout en sachant que l'exactitude des informations utilisées peut être encore améliorée (Faverdin et al., 2020). Selon le point de vue, l'alimentation par phase ajustée par groupe d'individus (case, rang de portée)

est déjà considérée comme une alimentation sur mesure (Pomar et Remus, 2023). D'autres auteurs pointent l'importance de l'échelle individuelle de l'ajustement pour atteindre des performances maximales à un coût alimentaire faible et une réduction maximale pour les rejets environnementaux (Gaillard et al., 2020a).

Pour des truies gestantes, l'alimentation sur mesure peut consister à ajuster dynamiquement la quantité d'aliment apportée selon les besoins énergétiques estimés pour atteindre des objectifs d'état à la mise-bas (PV, ELD) en ayant effectué des mesures de l'état corporel à l'insémination. Pour satisfaire les besoins en autres nutriments clés (AA, minéraux), il s'agit de moduler la qualité de l'aliment apportée par l'utilisation en mélange individualisé d'aliments à même teneur énergétique mais avec des teneurs contrastées de ces nutriments. En pratique, pour moduler la teneur pour un nutriment donné, deux aliments sont formulés : l'un (aliment B : bas) dont la teneur correspond au besoin le plus faible estimé pour ce nutriment sur l'ensemble de la période, et l'autre (aliment H : haut) au besoin le plus élevé. Par le mélange des aliments B et H, il est alors possible de couvrir la plage des besoins en ce nutriment pour l'ensemble des truies du troupeau durant l'intégralité de la gestation (Figure 1.11).

Les résultats. Les gains observés *via* l'application d'une alimentation sur mesure en comparaison de la stratégie de référence (**Témoin**) déjà en place dépendent des caractéristiques de cette dernière. Quand les apports nutritionnels initiaux sont excédentaires par rapport aux besoins avec l'alimentation Témoin, l'alimentation sur mesure est bénéfique en termes de conduite d'état des truies, et d'impacts environnemental et économique. Dans le cas où les apports sont carencés, une amélioration des performances *via* l'alimentation sur mesure est attendue même si la truie est capable de faire face à de gros challenges nutritionnels (Theil et al., 2023).



Note : La simulation a été effectuée avec le modèle présenté par Gaillard et al. (2019) avec un objectif d'épaisseur de lard dorsal de 20 mm et un poids de portée à la mise-bas de 22,9 kg et 26,1 kg respectivement pour les primipares et les multipares. Le poids et l'épaisseur de lard dorsal à l'insémination étaient respectivement de 148 kg et 15,2 mm ; 156 kg et 9,7 mm ; 239 kg et 13,4 mm ; 268 kg et 14,6 mm dans l'ordre croissant de rang de portée. Le décrochage à 80 jours de gestation correspond à un changement de phase alimentaire marqué par une évolution de la quantité d'aliment apportée.

Figure 1.11 : Évolution de la contribution de l'aliment à basse teneur en acides aminés (B) dans le mélange apporté aux truies selon leur rang de portée

Cas de l'ajustement individuel et journalier des apports en énergie. Avec un aliment unique, Young et al. (2004) ont effectué un ajustement individuel des quantités fondé sur le PV et l'ELD à l'insémination et un objectif d'ELD de 19 mm à la mise-bas. Ils l'ont comparé à une alimentation Témoin où les truies recevaient une quantité d'aliment en fonction d'une note d'état corporel visuelle à l'insémination. L'application de la stratégie permet de réduire la consommation en gestation et la variabilité de l'état corporel à la mise-bas avec moins de truies grasses (> 21 mm dans cette étude ; Young et al., 2004) sans différence de performances productives autres que la moindre consommation des truies grasses pendant la lactation.

Cas de l'ajustement individuel et journalier des apports en énergie et AA. Des résultats de simulations montrent qu'une alimentation sur mesure fondée sur le mélange d'aliments H et B (décrits précédemment avec des teneurs contrastées en Lys), permet de réduire l'ingestion de Lys de 30 % par rapport à un aliment unique avec un plan constant, le tout sans altérer les performances des truies. Les excréments de N seraient également réduits de 15 % avec des coûts alimentaires diminués de 3,6 % (Gaillard et al., 2020b). Ces résultats s'expliquent par une couverture pertinente des besoins tout au long de la gestation (Figure

1.12B). Des études *in vivo* mettent en évidence des réductions un peu moindres des quantités de nutriments ingérées et excrétées mais qui vont dans le même sens que les simulations avec des performances productives des animaux maintenues (Tableau 1.6). Les effets à long terme de ce type de stratégie n'ont pas encore été étudiés expérimentalement et ils pourraient ne pas être cumulatifs sur les performances productives et la longévité des truies (Dourmad et al., 1994 ; Trottier et al., 2014).

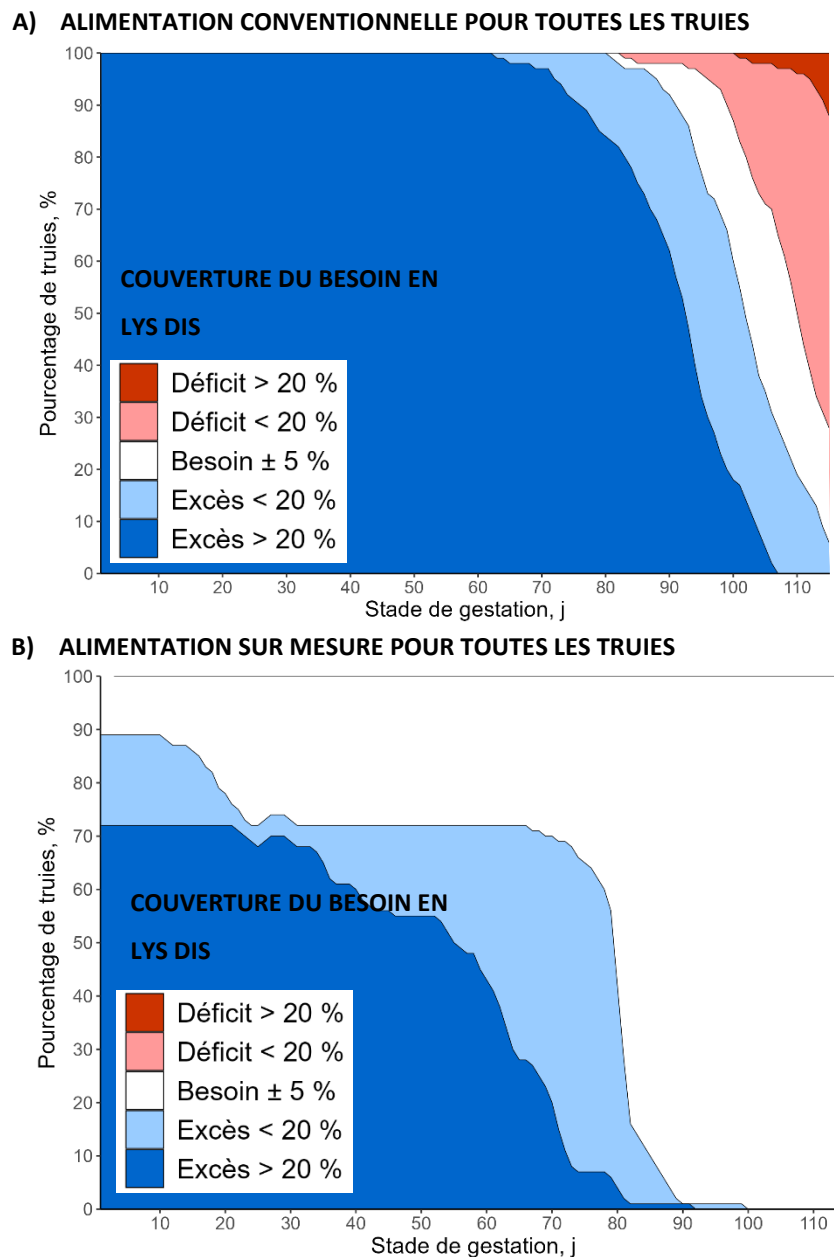
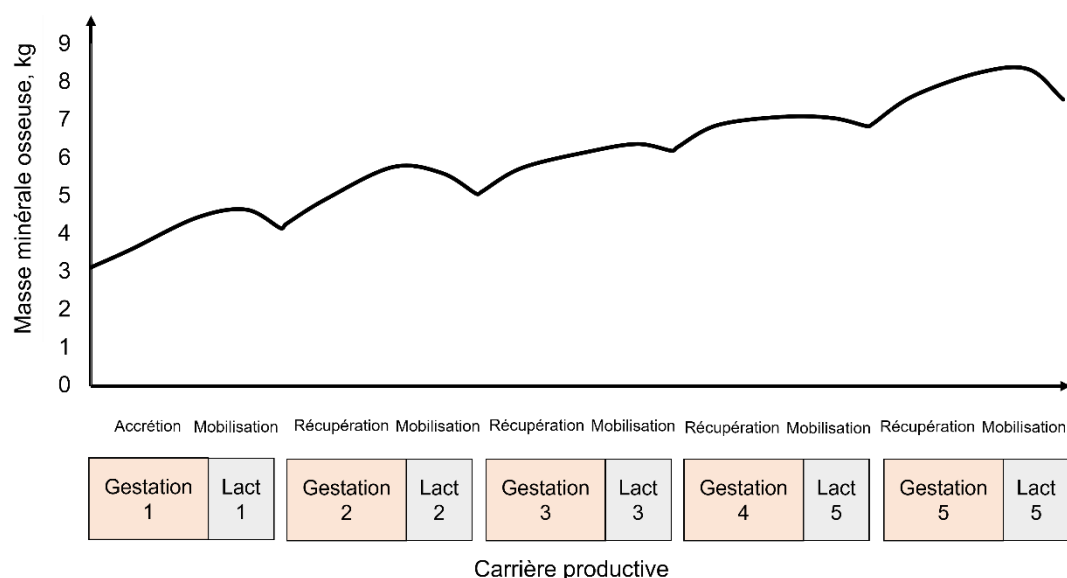


Figure 1.12 : Couverture des besoins estimés en lysine digestible iléale standardisée (Lys DIS) au cours de la gestation avec une stratégie d'alimentation conventionnelle (A) ou sur mesure (B). Adapté de Gaillard et al. (2020b).

Vers un ajustement des apports en minéraux pour une meilleure gestion des réserves osseuses de la truie ? L'ossification complète du squelette est très lente et s'achève à l'âge de 6 - 7 ans (Guintard, 2024). Ainsi, même pour les truies du cheptel ayant atteint leur poids à maturité, elles sont d'un point de vue osseux encore immatures et modulables. Les os jouent le rôle de réserves de P et Ca au sein de l'organisme et la lactation est une phase pendant laquelle la truie mobilise fortement ses réserves minérales pour la production laitière (Van Riet et al., 2016). Des apports insuffisants de P et Ca résultent en une forte mobilisation osseuse, dont l'intensité peut être telle que le degré de minéralisation des os peut conduire, dans le pire des cas, à des fractures (Van Riet et al., 2013). L'apport minéral effectué après une période de mobilisation osseuse a un impact direct sur la cinétique d'accrétion osseuse (Floradin et al., 2022). La phase de gestation peut ainsi jouer un double rôle. D'une part, permettre de restaurer les réserves osseuses mobilisées lors de la précédente lactation (Heurtault et al., 2024a). D'autre part, maximiser l'accrétion osseuse pour assurer un stock suffisant pour la lactation à venir. Ainsi à long-terme, la nutrition minérale durant la gestation est cruciale pour la truie afin de supporter la succession de forte mobilisation osseuse avec l'enchaînement des lactations (Figure 1.13 ; Gieseemann et al., 1998).



Abréviation : Lact = lactation.

Reconstitution effectuée sur une truie fictive (poids initial : 160 kg ; poids final : 265 kg) à partir de données moyennées de masse minérale osseuse issues de scanner à absorptiométrie biphotonique à rayons X de Heurtault et al. (2024a) et de données individuelles en libre accès de Heurtault et al. (2024b).

Figure 1.13 : Simulation de l'évolution de la masse minérale osseuse pendant la carrière d'une truie reproductrice (cinq cycles).

Tableau 1.6 – Effets de l'alimentation sur mesure sur l'ingestion d'AA et de P, l'excrétion de N et de P ainsi que sur les coûts alimentaires et les performances reproductives des truies gestantes

Référence	Ajustement de l'alimentation sur mesure	Stratégie d'alimentation de référence	Ingestion d'AA	Ingestion de P	Coût alimentaire, € / gestation	Excrétion N	Excrétion P	Effets sur les performances reproductives de AM
Cloutier et al. (2024)	Individuel, Énergie, AA	Aliment unique, plan constant	-16 %	-19 %	-	-	-	Baisse de la mortalité pendant la lactation (dont mortinatalité)
Domingos et al. (2024)	Individuel, Énergie, AA	Aliment unique, plan constant	-5 %	-	-	-	-	Portée plus lourde à la naissance ; meilleure production laitière
Gaillard et Dourmad (2022)	Individuel, Énergie, AA	Aliment unique, ajustement individuel sur l'énergie	-25 %	-8 %	-3,4 €/gestation ou -8 €/t	-19%	-9 %	Pas d'effets
Lemee et al. (2024)	Individuel, P	Aliment unique, Augmentation de l'apport le dernier mois de gestation	-3 %	-24 %	-	-	-16 % (30 premiers jours de gestation)	Baisse de la mortalité des porcelets pendant la lactation Porcelets AM présentent une baisse du contenu protéique sans augmentation du contenu lipidique
Stewart et al. (2021)	Individuel, Énergie, AA	Aliment unique, plan constant	-12 %	+6 %	+4 €/gestation	-6 %	+7 %	

Abréviations : AA = acides aminés ; AM = alimentation sur mesure ; N = azote ; P = phosphore

Freins économiques. Le frein principal à la mise en place de l'alimentation sur mesure est économique : coût d'achat du matériel et temps nécessaire pour amortir l'investissement. Le coût d'achat du matériel comprend les DAC (entre 6 000 et 10 000 € chacun pour 20 à 40 truies) ainsi que le réaménagement des salles pour convertir l'espace. D'autres coûts sont également associés tels que l'achat de nouveaux silos pour stocker plusieurs aliments (Ball et Moehn, 2013) ainsi que l'achat des puces électroniques individuelles pour la reconnaissance des truies par les DAC (Lachia, 2020). Durand (2023) a estimé que pour un élevage de 300 truies et une réduction de coût alimentaire de 3,4 € par gestation (Gaillard et Dourmad, 2022), le retour sur investissement était compris entre 9 et 18 ans. L'amortissement pourrait être ramené à environ 5 ans si le nouveau système d'alimentation pouvait aussi détecter précocement les problèmes sanitaires et réduire par conséquent les mises à la réforme précoces, facteur de surcoût en élevage (Niemi et al., 2017).

Vision de l'éleveur et de la société. Certains éleveurs peuvent également hésiter sur l'adoption de cette stratégie d'alimentation par la complexité de mise en œuvre et la nécessité d'apprentissage sur ces nouveaux outils au regard des faibles économies obtenues sur le coût alimentaire (Hostiou et al., 2014). Ils peuvent également avoir peur de perdre en compétences via l'utilisation des nouvelles technologies (Faverdin et al., 2020) tout comme être méfiants vis-à-vis des erreurs potentielles des automates (Casey et al., 2005 ; Thomas et al., 2018). Ils peuvent enfin craindre une qualité insuffisante des données fournies car altérées par l'environnement agressif de l'élevage pour les capteurs (Lachia, 2020). La présence de l'éleveur auprès de ses animaux peut être modifiée, avec un contact de meilleure qualité auprès des individus ayant des problèmes sanitaires relevés par des alertes mais une relation Homme-Animal dégradée pour les individus qui ne présentent pas de problèmes spécifiques (Mougenot et al., 2020). La performance de ces derniers ne demande pas une attention supplémentaire de l'éleveur et ils correspondent aux animaux dénommés « invisibles » (Hostiou et al., 2017). Hostiou et al. (2014) considèrent que la mise en place de l'alimentation sur mesure induit une réorganisation du travail avec la nécessité d'un contrôle régulier des équipements et des mesures effectuées, des compétences pour analyser et valoriser la grande quantité de données disponibles et un stress psychologique supplémentaire résultant d'un nombre croissant d'alertes automatiques. Du point de vue de la société, pour des personnes non initiées aux pratiques d'élevage, la mise en place de l'alimentation sur mesure peut accentuer la perception d'une industrialisation démesurée des systèmes de productions animales (Veissier et al., 2019).

La question de la propriété des données. La propriété des données, leur stockage et leur accessibilité est également à considérer dans l'utilisation de ces nouvelles technologies. Les données ont une valeur économique non négligeable et elles sont souvent la propriété des

développeurs de logiciel ou d'automates lors de la contractualisation de la vente. Ces entreprises utilisent un grand nombre de données pour améliorer leurs algorithmes et la revente de données à des tiers, à des fins commerciales pour mieux cibler la vente de sociétés partenaires. Pour mieux valoriser l'ensemble des informations fournies au sein de l'élevage par les différents capteurs, il faudra veiller à améliorer l'interopérabilité des outils pour une meilleure précision dans l'aide à la décision (Faverdin et al., 2020).



Éléments-clés : l'alimentation sur mesure de la truie pendant la gestation, avec des apports en quantité et qualité nutritionnelle au plus proche des besoins individuels journaliers, a pour but de maximiser les différentes composantes de la performance d'une truie.

La truie gestante reçoit une quantité d'aliment modulée sur la base des apports énergétiques afin de piloter l'état de ses réserves corporelles à la mise-bas. En effet, il s'agit d'éviter des truies trop maigres parce qu'insuffisamment nourries, ou trop grasses parce que nourries en excès, qui affecte négativement les performances productives et reproductives subséquentes. Distribuer un même aliment à tous les animaux quel que soit le stade n'est pas adéquat compte tenu de la variabilité des besoins et de leur évolution. Dans le cas d'une alimentation sur mesure, la qualité de l'aliment distribuée est individualisée journalièrement en mélangeant plusieurs aliments en proportions adaptées selon les besoins nutritionnels de chaque truie au cours de la gestation. Bien que nécessitant des investissements importants et une modification des habitudes de travail de l'éleveur, l'alimentation sur mesure apparaît comme un levier permettant de maximiser l'efficacité d'utilisation des ressources et la réduction de l'impact environnemental de la production tout en réduisant les coûts alimentaires. La mise en place de capteurs connectés au sein des élevages ouvre de nouvelles perspectives pour affiner l'estimation des besoins, suivre de nouveaux phénotypes d'intérêt et automatiser la mise en œuvre des stratégies d'alimentation. C'est l'objet de la section 1.4.

1.4. Vers un outil d'aide à la décision : automatisation et intégration des données en temps réel pour un élevage sur mesure

Un outil d'aide à la décision (**OAD**) est un système technologique qui fournit des informations clés pour appuyer l'éleveur dans sa prise de décision et le pilotage de son élevage. Des alertes, selon un seuil préalablement établi peuvent avertir l'éleveur, par exemple pour détecter rapidement les individus ayant un problème au sein du troupeau car ne consommant pas l'intégralité de leur ration allouée (Gaillard et al., 2021). Un OAD s'inscrit pleinement dans le concept d'élevage sur mesure qui s'intéresse à la gestion pour des systèmes plus durables et plus performants de production animale via l'utilisation de nouvelles technologies connectées (Wathes et al., 2008).

Pour concevoir un OAD, il est nécessaire de collecter des données, traiter ces données via des modèles, et utiliser les données traitées pour prendre des décisions (Figure 1.14).

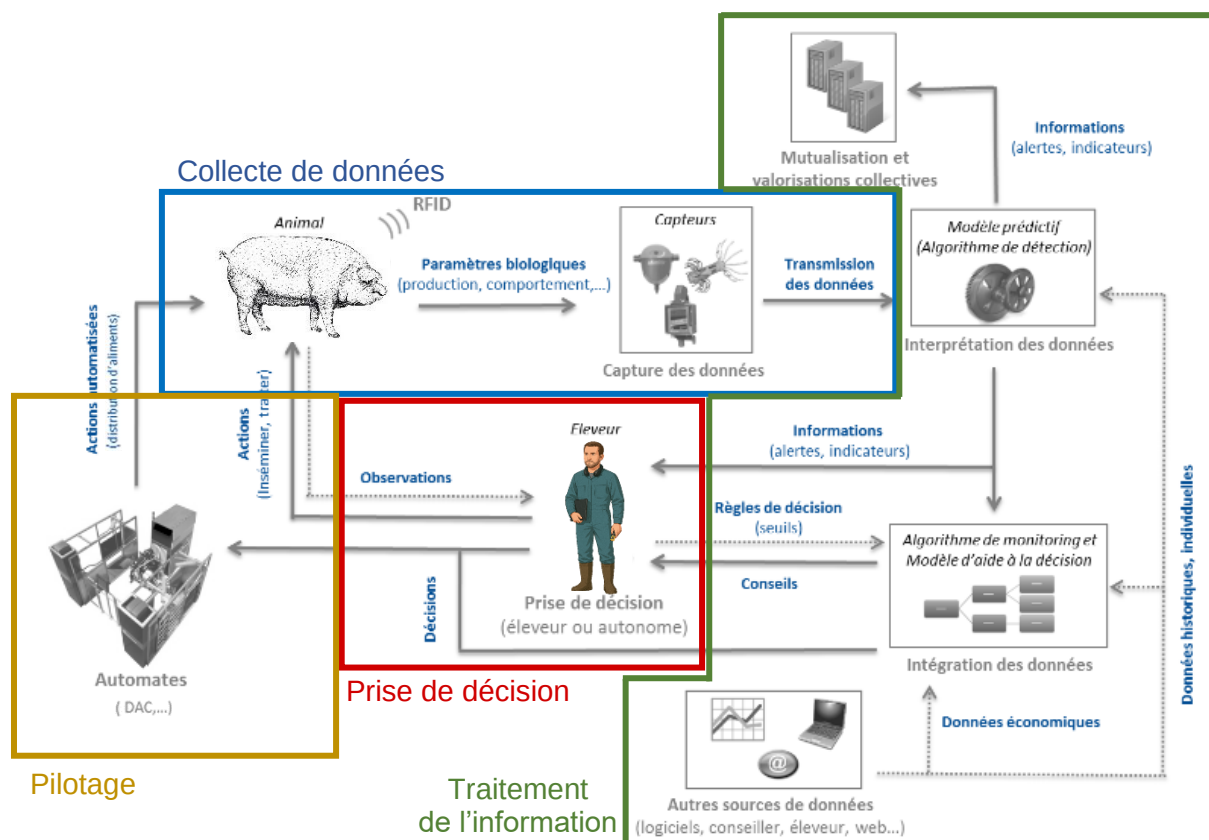


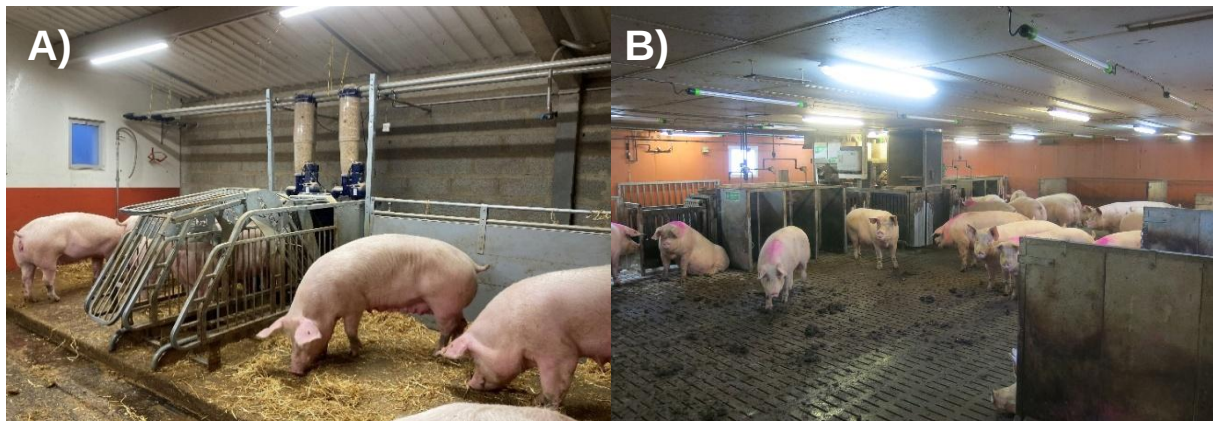
Figure 1.14 : Schématisation du concept d'élevage sur mesure. Adapté de Allain et al. (2014).

1.4.1. Collecter automatiquement des données en élevage

En élevage porcin, les capteurs permettent d'acquérir des informations en continu à l'échelle de l'individu et/ou du groupe pour un nombre toujours plus croissant d'animaux logés en groupe. Sans ceux-ci, il serait difficile pour l'éleveur de suivre individuellement et régulièrement ses animaux afin de prendre des décisions spécifiques à chacun, chaque jour. Le but n'est pas de collecter une masse importante de données pour avoir de la donnée mais d'avoir une donnée utile pour la décision (Faverdin et al., 2020). Cette mesure doit être précise et répétable dans le temps. L'utilisation des puces RFID individuelles (généralement positionnées sur les oreilles des truies) permettent l'interaction des animaux avec les automates, e.g. abreuvoir, DAC, balance, et facilitent la collecte automatique de données individuelles (Cornou et Kristensen, 2013).

Distributeurs automatiques d'aliments (DAC). Outre la distribution de rations individuelles, la gestion des doses d'aliment distribuées et leur fréquence, le DAC (Figure 1.15) permet de collecter les données individuelles d'alimentation au sein du groupe. Ces données permettent ensuite de calculer des phénotypes de comportement alimentaire tels que la vitesse d'ingestion, la consommation journalière, le nombre de visites alimentaires ou non alimentaires. Les truies gestantes étant rationnées, elles consomment généralement toute leur ration en un repas puis font entre 5 et 10 visites non alimentaires. Le temps passé à consommer la ration et le nombre de visites dépendent de l'individu et du réglage des paramètres de fonctionnement du DAC (e.g., temps disponible pour consommer la ration, quantité distribuée par dose ; Olsson et al., 2011).

Plusieurs types de DAC existent : à une voie (la truie entre, mange puis recule) ou à deux voies (la truie entre, mange et avance entre l'entrée et la sortie). Les DAC à une voie sont adaptés pour des groupes de 15 à 20 truies et les deux voies pour des groupes de 40 à 45 truies (Thomas et al., 2018). Le nombre de DAC dans la case dépend ensuite de la taille du groupe et du modèle choisi. Les DAC une voie permettent de minimiser la surface utilisée pour la zone d'alimentation mais sont pénalisants pour ce qui est de l'occupation de l'alimentateur car l'entrée d'une truie dépend du bon vouloir de la truie présente à sortir du système. Au contraire avec un DAC deux voies (par l'ouverture automatique de la porte d'entrée), le système de marche en avant favorise l'entrée d'une nouvelle truie dès lors que la truie présente a consommé l'intégralité de sa ration. Un DAC deux voies permet également de mettre en place une voie supplémentaire pour trier automatiquement et individuellement les animaux.



Crédit photo : A) UE3P, INRAE, Saint-Gilles, France ; B) CIRI, IFIP, Romillé, France.

Figure 1.15 : Distributeurs automatiques d'aliments à une voie (A) ou deux voies (B).

Abreuvoirs. Tout comme les données alimentaires, les données d'abreuvement des animaux peuvent être collectées automatiquement à l'aide d'abreuvoirs connectés qui identifient les truies par leur puce RFID. Le comportement d'abreuvement (quantité d'eau bue, fréquence et durée des visites) est caractérisé par une haute variabilité inter-individuelle et inter-journalière (Rousselière et al., 2017). La mesure de la quantité d'eau bue dépend du type d'aliment (liquide ou solide) ainsi que du type d'abreuvoir disponible. Les abreuvoirs de type bol sont plus propices à une perte par gaspillage (Junge et al., 2012). En moyenne chaque jour, une truie consomme $33,2 \pm 16,5$ mL d'eau par kg de PV (Rousselière et al., 2017).

Les balances. Les truies sont rarement pesées en routine et quand elles le sont c'est avec des balances manuelles lors des transferts entre les salles de l'élevage. Par cycle reproductif, une pesée est alors effectuée proche de l'insémination, *i.e.* au sevrage de la précédente mise-bas ou après insémination, et à l'entrée en maternité, *i.e.* lors du transfert de la salle de gestation à la salle de lactation. Le poids de la truie est variable pour des individus du même âge (Quiniou, 2019). Des balances connectées installées dans les cases de gestation (*e.g.* plateforme intégrée à l'abreuvoir, à l'UE3P St-Gilles), permettent d'augmenter les fréquences et d'automatiser la mesure.

Mesure d'état corporel. Les réserves adipeuses peuvent être estimées *via* une note d'état corporel (de 1 – maigre à 5 – grasse) attribuée visuellement par l'éleveur. Ces observations sont modérément corrélées entre elles et sont moins fiables que des mesures effectuées avec un outil (Carnevale et al., 2024 ; Maes et al., 2004). L'ELD peut être mesurée à l'aide d'une sonde à ultrason et présente des valeurs observables entre 4 et 37 mm chez la truie adulte (Quiniou, 2016). La mesure doit être effectuée à 6,5 cm de part et d'autre de la ligne médiane au niveau de la dernière côte, zone également appelée P2. Cette zone de référence permet une meilleure précision et répétabilité de la mesure ainsi que la possibilité de comparer les

valeurs entre opérateurs et entre élevages. Ce site de mesure est le plus représentatif de l'état corporel entier des truies Large White x Landrace en élevage (King et al., 1986 ; Whittemore et al., 1980). Il est cependant moins adapté pour des lignées sino-européennes déposant plus de gras péri-rénal et face à des outils permettant la mesure du corps entier de la truie tels que le scanner à absorptiométrie biphotonique à rayons X (**DXA**) ou la tomodensitométrie. Dans un élevage donné, il est recommandé d'utiliser le même appareil pour suivre l'évolution de l'ELD au cours du temps ou dans le cas contraire de connaître les écarts de valeurs entre appareils afin de pouvoir les corriger.

Les capteurs d'ambiance. De nombreux capteurs peuvent être utilisés pour caractériser les conditions environnementales des salles dans lesquelles sont logés les animaux. Le thermomètre est un équipement de base au sein des élevages. Il permet de s'assurer du fonctionnement des systèmes de régulation de l'ambiance, à savoir la ventilation réglée habituellement pour des conditions de confort thermique, *i.e.* de 14 à 22°C pour des truies logées en groupe (Geuyen et al., 1984 ; Noblet et al., 1989). Ainsi les ventilateurs de la salle s'actionnent automatiquement en fonction de la valeur de consigne de température et la plage de valeurs choisies. D'autres capteurs permettent de mesurer les teneurs en gaz (ammoniac, méthane) présents dans la salle, le niveau sonore, la luminosité ou encore l'humidité relative.

Les capteurs d'activité. L'activité physique des animaux, représentée par le temps passé debout ou en mouvement, peut être suivie à l'échelle du groupe grâce à des radars à ondes utilisant l'effet Doppler pour suivre la vitesse des truies (Ferreira et al., 2016). Pour obtenir un degré plus fin de mesure et avoir une échelle individuelle d'activité physique, des accéléromètres sont utilisés (Bertin et Ramonet, 2015). Ils mesurent l'accélération sur trois axes orthogonaux et transforment ces mesures, grâce à un algorithme intégré aux capteurs, en temps passé couché, debout ou en mouvement. Les accéléromètres fixés à l'oreille des truies permettent d'obtenir des données fiables lorsqu'ils sont comparés aux observations humaines mais sont peu robustes chez les truies (Busnel et Quiniou, 2019). L'émergence des caméras et l'analyse automatique d'images semblent être prometteuse pour suivre l'activité physique individuelle des animaux. Cette technique a pour avantage de ne pas ajouter de capteur sur l'animal et pourrait permettre également de détecter et classifier les interactions sociales entre les animaux du groupe (Blanc et al., 2025).

1.4.2. Traitement pour fiabiliser les données

Les données brutes obtenues *via* les automates et capteurs doivent être stockées de façon pérenne, sans risque de les perdre (Banhazi et al., 2012). Les données sont ensuite nettoyées ou corrigées pour éliminer les valeurs erronées dues à des dysfonctionnements ou à des

valeurs considérées comme aberrantes (e.g. supérieures à la moyenne plus ou moins trois écarts types), afin d'extraire et synthétiser les indicateurs d'intérêt à suivre (Friggens et Robert, 2016). Une étape supplémentaire de traitement peut être effectuée pour que la donnée soit utilisable dans les modèles prédictifs, comme par exemple moyenner les valeurs du capteur sur une période de durée définie selon l'utilisation du résultat (Pomar et Remus, 2023).

Pour les DAC par exemple, il est possible de suivre la consommation journalière et s'assurer que la truie a bien consommé toute sa ration journalière. Plusieurs facteurs peuvent entraîner qu'une truie ne consomme pas toute sa ration : une visite non mesurée au DAC, la perte de la puce RFID individuelle ou un problème de santé de l'animal. A l'inverse, si une truie laisse de l'aliment dans l'auge, la quantité restante doit être réattribuée à la truie suivante. Cette étape est primordiale pour s'assurer de la fiabilité de la donnée intégrée notamment dans les modèles nutritionnels. Des difficultés demeurent quant au protocole standard à appliquer pour traiter les données de manière automatique (Thomas et al., 2018). A terme, le traitement devra être automatisé si ces indicateurs ont pour but d'être utilisés en temps réel.

1.4.3. Incorporation du modèle nutritionnel dans une chaîne de décision automatisée

Les modèles nutritionnels de la truie gestante (Dourmad et al., 2008 ; Hansen et al., 2014 ; NRC, 2012) sont principalement utilisés à des fins de recherche et ont été peu disséminés au niveau des élevages de production. En effet, la faible proportion de DAC ainsi que le manque de communication et d'automatisation entre données collectées, modèles nutritionnels et automates alimentaires sont peu propices à leur utilisation dans les élevages commerciaux où un grand nombre d'individus sont présents.

Le logiciel InraPorc® a été l'un des premiers OAD développé pour l'alimentation des truies reproductrices. Il intègre le modèle nutritionnel de Dourmad et al. (2008) et a pour utilisateurs cibles les professionnels de l'alimentation animale et les enseignants. Il permet l'établissement d'un profil type d'animal de l'élevage à partir des performances observées pour estimer sur plusieurs cycles reproductifs successifs les effets de séquences alimentaires et des aliments définis par l'utilisateur sur les performances et les rejets environnementaux. Il permet de comparer les effets de différentes stratégies alimentaires sur les contenus d'états corporels des truies ainsi que d'évaluer les excréments et le taux de rétention des différents nutriments.

Cependant, ce logiciel est peu propice à l'estimation des besoins individuels et pour intégrer les nouvelles connaissances disponibles. Ainsi, un nouveau modèle dérivé du modèle de Dourmad et al. (2008) pour la truie gestante, et codé en langage de programmation Python version 3.6, a été développé (Gaillard et al., 2019). Il permet une plus grande flexibilité dans

la prise en compte de données individuelles et l'ajout de modules spécifiques prenant en compte les dernières recherches pour la truie gestante ainsi que la possibilité d'intégrer automatiquement le flux croissant de données disponibles au niveau de la ferme (Dourmad et al., 2017). De nombreuses étapes de transmission de l'information sont encore effectuées manuellement (Figure 1.16). Leurs automatisations et l'ajout d'une interface utilisateur pourraient favoriser sa prise en main par un public plus large.

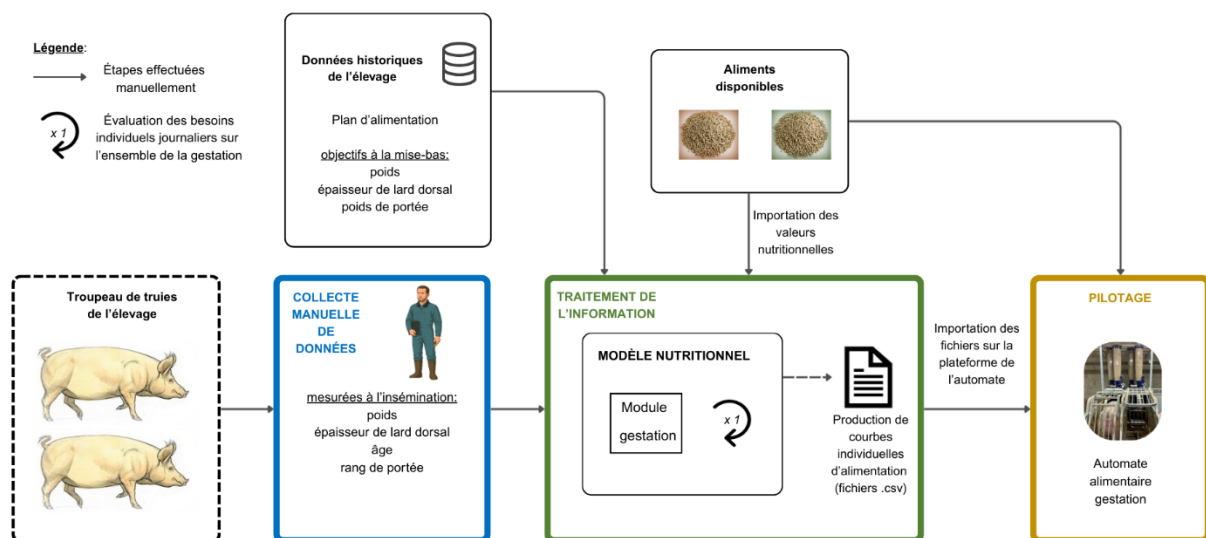


Figure 1.16 : Schématisation de l'utilisation actuelle du modèle nutritionnel pour truies gestantes

À terme, avec le déploiement encore plus important des capteurs connectés, l'obtention de données en temps réel et l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique (Chen et al., 2023), il est probable que les modèles par approche factorielle incorporés dans les OAD évoluent vers des modèles hybrides intégrant ces informations générées de façon continue à haut débit (Durand et al., 2023b ; Ellis et al., 2020 ; Jacobs et al., 2022). Ils pourraient également se transformer, au moins en partie, en modèle stochastique par la prise en compte de variabilité dans les réponses, e.g. le dépôt protéique, avec des truies ayant les mêmes caractéristiques d'un point de vue des données d'entrée dans le modèle (Remus et Pomar, 2022).

1.4.4. Intégration de données en temps réel dans les OAD

Prendre en compte les données en temps réel dans l'OAD pourrait permettre une meilleure prise en compte des réponses individuelles au sein du troupeau.

Affiner l'estimation du besoin énergétique individuel. Dans les modèles nutritionnels, une valeur moyennée de 4 h passée en position debout par jour, est utilisée pour l'ensemble des truies pour prendre en compte l'activité physique (Dourmad et al., 2008). Cette valeur a été

établie à partir de truies logées en stalle. Or, une truie logée individuellement en stalle a une activité restreinte (debout/couchée) alors qu'elle est plus variée pour des truies logées en groupe (court/marche/debout/couchée/interactions sociales avec les congénères). Avec des cases plus grandes lorsqu'elles sont logées en groupe, l'activité physique augmente du fait des distances parcourues plus grandes, ce qui accroît le besoin énergétique (Bertin et Ramonet, 2015). En élevage, un surplus d'aliment (0,3 à 0,5 kg/j) est apporté pour l'ensemble du troupeau pour compenser la hausse d'activité liée à ce mode de logement, mais ces quantités sont fixées de façon empirique à partir de l'observation de l'état des truies à la mise-bas (Theil et al., 2023). Comme décrit précédemment, des capteurs d'activité ou des logiciels d'analyse vidéo se développent afin d'évaluer le temps passé debout et en mouvement pour chaque truie chaque jour. En utilisant les coûts énergétiques établis pour chaque activité par Labussiere et al. (2022), il est possible d'estimer les besoins énergétiques liés à l'activité physique individuelle journalière, et non plus se référer à une valeur unique pour tout le troupeau durant l'entièreté de la gestation.

Pour affiner l'estimation du besoin énergétique individuel, l'intégration du poids journalier et individuel des truies pourrait permettre de réduire les écarts d'état observés à la mise-bas. En effet, les besoins individuels de la truie pour l'ensemble de la gestation sont estimés à priori à partir de son état corporel à l'insémination et des objectifs d'état à la mise-bas (PV, ELD, poids de la portée). Pour ce faire, l'évolution du poids de la truie est simulée dans le modèle à partir de l'évolution des compartiments qui la composent (Voir section 1.2.1) et le besoin d'entretien est calculé à priori. Les balances connectées présentes en salle de gestation permettent d'avoir accès en temps réel au poids journalier de la truie et de corriger le poids modélisé.

Suivre le comportement, le bien-être, et la santé. Les comportements alimentaires peuvent être caractérisés à l'aide des DAC en continu et individuellement durant la gestation. Une alimentation adéquate tout au long de la vie de l'animal est considérée comme essentielle pour favoriser la longévité (Dourmad et al., 1994 ; Muro et al., 2023).

Favoriser la longévité des truies permettrait :

- D'éviter la réforme précoce des jeunes truies n'ayant pas encore atteint leur plein potentiel pour améliorer les performances économiques de l'élevage.
- De garder plus longtemps les truies du troupeau en bonne santé afin d'améliorer le bien-être animal (Veissier et al., 2019) et le point de vue de la société.

Le suivi du comportement social à l'aide de caméras permettrait de détecter des modifications de comportement du groupe ou au niveau individuel qui peuvent servir d'indicateur en temps réel de l'état de santé et de bien-être du troupeau (Veissier et al., 2019). Ces changements peuvent intervenir en amont de signes cliniques visibles « à l'œil nu » et leur prise en charge précoce, par des interventions adaptées, permet d'éviter des complications (Durand et al., 2021). La combinaison des informations collectées par plusieurs capteurs peut également être utile pour identifier des problèmes de santé/bien-être. Par exemple, une truie qui ne consomme pas l'entièreté de sa ration allouée en gestation est une truie qui a potentiellement un problème (Gaillard et al., 2021) ou également renvoyer à un problème matériel. Durand et al. (2023a) ont simulé le dysfonctionnement d'un des deux alimentateurs (fermé quelques jours) équipant la case de gestation, et montrent une augmentation du nombre d'interactions négatives ainsi que l'activité des individus et donc concomitamment de leur besoin énergétique. L'augmentation du nombre de visites non alimentaires est un exemple d'indicateur d'altération du bien-être au sein du groupe. Ces changements de comportement pourraient être signalés à l'éleveur par un système d'alertes afin qu'il mette en place les actions adéquates (e.g. mettre une truie malade à l'infirmerie).



Éléments-clés : L'outil d'aide à la décision permet de valoriser les données de phénotypage individuel obtenues à l'aide des capteurs connectés pour améliorer les différentes facettes de la performance d'un élevage.

La démocratisation et le développement de nouveaux capteurs permettent de collecter un grand nombre de données individuelles en temps réel grâce à des puces par radio-identification. De nouveaux phénotypes tels que le comportement alimentaire individuel sont obtenus grâce aux distributeurs automatiques d'aliments. Les outils d'aide à la décision intègrent des modèles qui peuvent utiliser une grande quantité de données pour fournir des informations clés pour le pilotage de l'élevage et aider l'éleveur dans sa prise de décision. Des améliorations sont encore attendues pour mieux automatiser la transmission d'informations entre les capteurs, les modèles nutritionnels et les automates alimentaires. Valoriser en temps réel les données collectées au niveau individuel pourrait permettre d'affiner l'estimation des besoins nutritionnels des truies gestantes.

1.5. Références bibliographiques

- Agriness, 2023. Annual report of pig performance production 16th Edition. Agriness, Florianópolis, Brésil.
- Allain, C., Chanvallon, A.A., Clement, P., Guatteo, R.R., Bareille, N., 2014. Élevage de précision : périmètre, applications et perspectives en élevage bovin. *Rencontres Recherches Ruminants* (3R) 21, 3-10.
- Amdi, C., Giblin, L., Ryan, T., Stickland, N.C., Lawlor, P.G., 2014. Maternal backfat depth in gestating sows has a greater influence on offspring growth and carcass lean yield than maternal feed allocation during gestation. *Animal* 8, 236–244. <https://doi.org/10.1017/S1751731113002073>
- ANVOL, 2025. La volaille devient la viande la plus consommée du pays ! Consulté le 28/02/2025 à <https://interpro-anvol.fr/la-volaille-devient-la-viande-la-plus-consommee-du-pays/>
- Araújo, V. de O., de Oliveira, R.A., Vieira, M. de F.A., Silveira, H., Fonseca, L. da S., Alves, L.K.S., Guimarães, E.B.B., Schinckel, A.P., Garbosa, C.A.P., 2020. Bump feed for gestating sows is really necessary? *Livestock Science* 240, 104184. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104184>
- Arey, D.S., Edwards, S.A., 1998. Factors influencing aggression between sows after mixing and the consequences for welfare and production. *Livestock Production Science* 56, 61–70. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(98\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(98)00144-4)
- Badouard, B., 2015. GTTT-GTE : des progrès techniques mais des résultats économiques qui ne décollent pas. *Tech Porc* 25, 6–8.
- Ball, R.O., Moehn, S., 2013. Feeding pregnant sows for optimum productivity: past, present and future perspectives. *Biennial Conference of the Australasian Pig Science Association* 14, 151–169.
- Banhazi, T.M., Lehr, H., Black, J.L., Crabtree, H., Schofield, P., Tschärke, M., Berckmans, D., 2012. Precision Livestock Farming: an international review of scientific and commercial aspects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 5, 1–9. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20120503.001>
- Bertin, C., Ramonet, Y., 2015. Utilisation d'accéléromètres pour mesurer l'activité physique des truies logées en groupes : Développement de la méthode et utilisation dans six élevages. *Journées Recherche Porcine* 47, 229–234.
- Bidanel, J.-P., Silalahi, P., Tribout, T., Canario, L., Ducos, A., Garreau, H., Gilbert, H., Larzul, C., Milan, D., Riquet, J., Schwob, S., Mercat, M.-J., Hassenfratz, C., Bouquet, A., Bazin, C., Bidanel, J., 2020. Cinquante années d'amélioration génétique du porc en France : bilan et perspectives. *INRAE Productions Animales* 33, 1-16. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.1.3092>
- Bikker, P., Blok, M.C., 2017. Phosphorus and calcium requirements of growing pigs and sows, CVB documentation report 59, 72 p. Wageningen Livestock Research, Wageningen, The Netherlands. <https://doi.org/10.18174/424780>
- Bikker, P., Van Der Peet-Schwering, C.M.C., Gerrits, W.J.J., Sips, V., Walvoort, C., Van Laar, H., 2017. Endogenous phosphorus losses in growing-finishing pigs and gestating sows. *Journal of Animal Science* 95, 1637–1643. <https://doi.org/10.2527/jas.2016.1041>
- Blanc, A., Poissonnet, A., Thomas, J., Courboulay, V., Simon, M., Gaillard, C., 2025. Towards the automatic detection of social interactions in gestating sows using image analysis data. *Journal of Animal Science* 103, skaf249. <https://doi.org/10.1093/jas/skaf249>
- Bohlke, R.A., Thaler, R.C., Stein, H.H., 2005. Calcium, phosphorus, and amino acid digestibility in low-phytate corn, normal corn, and soybean meal by growing pigs. *Journal of Animal Science* 83, 2396–2403. <https://doi.org/10.2527/2005.83102396x>
- Boudon, A., Quesnel, H., Dourmad, J. Y., Duhamel, J., Quemeneur, B., Planchenault, D., Narcy, A., 2016. Effet de l'abaissement du bilan électrolytique de l'aliment distribué en fin de gestation sur le déroulement de la mise-bas, la survie des porcelets et la dynamique de mobilisation osseuse des truies. *Journées Recherche Porcine* 48, 115–120.
- Boulot, S., Courboulay, V., Badouard, B., Pellois, H., Ramonet, Y., 2011. La conduite des truies en groupes augmente-t-elle les risques de troubles de reproduction dans les élevages français ? *Journées Recherche Porcine* 43, 171–178.
- Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, 2022. Ferkelerzeugung und Ferkelaufzucht – Ein Überblick. Consulté le 21/04/2025 à <https://www.nutztierhaltung.de/schwein/sau-ferkel/>
- Busnel, F., Quiniou, N., 2019. Précision de l'information collectée chaque heure par un accéléromètre fixé à l'oreille de la truie gestante pour la caractérisation de son activité physique. *Journées Recherche Porcine* 51, 19–24.

- Canario, L., Rydhmer, L., Gogu  , J., Tribout, T., Bidanel, J.P., 2007. Estimation of genetic trends from 1977 to 1998 for farrowing characteristics in the French Large White breed using frozen semen. *Animal* 1, 929–938. <https://doi.org/10.1017/S1751731107000511>
- Carnevale, R., Segers, K., Nollet, N., Cools, A., Janssens, G., Millet, S., 2024. Interobserver reliability of different methods to evaluate sows' body condition. *Annual Meeting of the European Association for Animal Production* 75, 236.
- Carrión-López, M.J., Madrid, J., Martínez, S., Hernández, F., Orengo, J., 2022. Effects of the feeding level in early gestation on body reserves and the productive and reproductive performance of primiparous and multiparous sows. *Research in Veterinary Science* 148, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2022.05.002>
- Casey, D.S., Stern, H.S., Dekkers, J.C.M., 2005. Identification of errors and factors associated with errors in data from electronic swine feeders. *Journal of Animal Science* 83, 969–982. <https://doi.org/10.2527/2005.835969x>
- Che, L., Hu, L., Wu, C., Xu, Q., Zhou, Q., Peng, X., Fang, Z., Lin, Y., Xu, S., Feng, B., Li, J., Tang, J., Zhang, R., Li, H., Theil, P.K., Wu, D., 2019. Effects of increased energy and amino acid intake in late gestation on reproductive performance, milk composition, metabolic, and redox status of sows. *Journal of Animal Science* 97, 2914–2926. <https://doi.org/10.1093/jas/skz149>
- Chen, C., Liu, X., Liu, C., Pan, Q., 2023. Development of the precision feeding system for sows via a rule-based expert system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 16, 187–198. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231602.7427>
- Choi, Y.H., Hosseindoust, A., Kim, M.J., Kim, K.Y., Lee, J.H., Kim, Y.H., Kim, J.S., Chae, B.J., 2019. Additional feeding during late gestation improves initial litter weight of lactating sows exposed to high ambient temperature. *Revista Brasileira de Zootecnia* 48, e20180028. <https://doi.org/10.1590/rbz4820180028>
- Cloutier, L., Galiot, L., Sauvé, B., Pierre, C., Guay, F., Dumas, G., Gagnon, P., Létourneau Montminy, M.-P., 2024. Impact of precision feeding during gestation on the performance of sows over three cycles. *Animals* 14, 1–20. <https://doi.org/10.3390/ani14233513>
- Clowes, E.J., Kirkwood, R., Cegielski, A., Aherne, F.X., 2003. Phase-feeding protein to gestating sows over three parities reduced nitrogen excretion without affecting sow performance. *Livestock Production Science* 81, 235–246. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(02\)00275-0](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00275-0)
- Cools, A., Maes, D., Decaluw  , R., Buyse, J., van Kempen, T.A.T.G., Liesegang, A., Janssens, G.P.J., 2014. Ad libitum feeding during the peripartur period affects body condition, reproduction results and metabolism of sows. *Animal Reproduction Science* 145, 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.01.008>
- Cordell, D., Drangert, J.-O., White, S., 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change, Traditional Peoples and Climate Change* 19, 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Cornou, C., Kristensen, A.R., 2013. Use of information from monitoring and decision support systems in pig production: Collection, applications and expected benefits. *Livestock Science* 157, 552–567. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.07.016>
- Couanon, N., Thorel, D., 1984. La gestion technique des troupeaux de truies (G.T.T.T.) : Son développement - ses résultats. *Journées Recherche Porcine* 16, 105–114.
- Council of the European Union, 2008. Directive 2008/120/EC: laying down minimum standards for the protection of pigs. Consulté le 30/04/2025 à <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/120/2019-12-14>
- Courboulay, V., Boulot, S., Badouard, B., 2010. Etat des lieux des systèmes de logement en groupe des truies en France et résultats techniques. *Congrès Annuel de l'Association Française de Médecine Vétérinaire Porcine*, 1–7.
- Crenshaw, T.D., 2001. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. A. J. Lewis and L. L. Southern (Eds), *Swine Nutrition*, 187-212. Crc press, Boca Raton, Florida, USA.
- de Andrés, M.A., Occ  n, A., Aparicio, M., Piñeiro, C., 2022.   Qu  n tiene mejores datos productivos, España o Estados Unidos? Consult   le 15/04/2025    <https://www.3tres3.com/articulos/%C2%BFquien-tiene-mejores-datos-productivos-en-porcino-espana-o-ee-uu> 47197/%20https://www.3tres3.com/articulos/compacion-de-datos-productivos-de-produccion-porcina-espana-y-ee-uu 47688/
- De Rensis, F., Gherpelli, M., Superchi, P., Kirkwood, R.N., 2005. Relationships between backfat depth and plasma leptin during lactation and sow reproductive performance after weaning. *Animal Reproduction Science* 90, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2005.01.017>
- Devillers, N., Farmer, C., Le Dividich, J., Prunier, A., 2007. Variability of colostrum yield and colostrum intake in pigs. *Animal* 1, 1033–1041. <https://doi.org/10.1017/S175173110700016X>

- Domingos, R.L., Silva, B.A.N., Gil Rueda, F., Luna, A.M., Htoo, J.K., Brand, H.G., Rebordões, F.I.G., Gonçalves, M.F., Brito, S.K., Martins, L.T.S., Pereira, G.T.S., Abreu, M.L.T., 2024. Use of a precision feeding program during gestation improves the performance of high-producing sows. *Animal Feed Science and Technology* 311, 115969. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2024.115969>
- Dourmad, J. Y., 2019. Evolution of the feeding approach in sows during the last decades. A. P. Yagüe (Eds), *Nutrition of Hyperprolific Sows*, 107-132. Novus International, Chesterfield, Missouri, USA.
- Dourmad, J. Y., Brossard, L., Pomar, C., Pomar, J., Gagnon, P., Cloutier, L., 2017. Development of a decision support tool for precision feeding of pregnant sows. *European Conference on Precision Livestock Farming* 8, 584–592.
- Dourmad, J.Y., Canario, L., Gilbert, H., Merlot, E., Quesnel, H., Prunier, A., 2010. Évolution des performances et de la robustesse des animaux en élevage porcin. *INRAE Productions Animales* 23, 53–64. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2010.23.1.3287>
- Dourmad, J.Y., Etienne, M., 2002. Dietary lysine and threonine requirements of the pregnant sow estimated by nitrogen balance. *Journal of Animal Science* 80, 2144-2150. <https://doi.org/10.1093/ansci/80.8.2144>
- Dourmad, J.Y., Etienne, M., Noblet, J., 1996. Reconstitution of body reserves in multiparous sows during pregnancy: effect of energy intake during pregnancy and mobilization during the previous lactation. *Journal of Animal Science* 74, 2211–2219. <https://doi.org/10.2527/1996.7492211x>
- Dourmad, J.Y., Étienne, M., Noblet, J., Causeur, D., 1997. Prédiction de la composition chimique des truies reproductrices à partir du poids vif et de l'épaisseur de lard dorsal. *Journées Recherche Porcine* 29, 255-262.
- Dourmad, J.Y., Étienne, M., Noblet, J., Valancogne, A., Dubois, S., Milgen, J.V., 2005. InraPorc : un outil d'aide à la décision pour l'alimentation des truies reproductrices. *Journées Recherche Porcine* 37, 299–306.
- Dourmad, J.Y., Etienne, M., Prunier, A., Noblet, J., 1994. The effect of energy and protein intake of sows on their longevity: a review. *Livestock Production Science* 40, 87–97. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0301-6226(94)90039-6)
- Dourmad, J. Y., Étienne, M., Valancogne, A., Dubois, S., van Milgen, J., Noblet, J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of sows. *Animal Feed Science and Technology* 143, 372–386. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.05.019>
- Dourmad, J. Y., Gauthier, R., Gaillard, C., 2021. Évolution des concepts nutritionnels et des méthodes d'alimentation des truies reproductrices : historique et perspectives. *INRAE Productions Animales* 34, 111–126. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.2.4861>
- Dourmad, J. Y., Noblet, J., Père, M.-C., Etienne, M., 1998. Mating, pregnancy and pre-natal growth, I. Kyriazakis (Eds), *A Quantitative Biology of the Pig*, 129-154. CABI Publishing, Wallingford, Oxfordshire, UK.
- Durand, M., 2023. Alimentation sur mesure et estimation du bien-être des truies gestantes à partir de données hétérogènes. Thèse de doctorat. Agrocampus Ouest, Rennes, France, 245 p.
- Durand, M., Dourmad, J. Y., Julienne, A., Couasnon, M., Gaillard, C., 2023a. Effects of a competitive feeding situation on the behaviour and energy requirements of gestating sows. *Applied Animal Behaviour Science* 261, 105884. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2023.105884>
- Durand, M., Dourmad, J. Y., Largouët, C., Tallet, C., Gaillard, C., 2021. Alimentation de précision des truies gestantes : prise en compte de la santé, du comportement et de l'environnement. *INRAE Productions Animales* 34, 293–304. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.4.5369>
- Durand, M., Largouët, C., de Beaufort, L.B., Dourmad, J.Y., Gaillard, C., 2023b. Prediction of the daily nutrient requirements of gestating sows based on sensor data and machine-learning algorithms. *J Anim Sci* 101, skad337. <https://doi.org/10.1093/jas/skad337>
- Eckberg, B., 2024. U.S. sow farm production update. Consulté le 15/04/2025 à <https://www.nationalhogfarmer.com/livestock-management/u-s-sow-farm-production-update>
- Ellis, J.L., Jacobs, M., Dijkstra, J., Laar, H. van, Cant, J.P., Tulpan, D., Ferguson, N., 2020. Review: Synergy between mechanistic modelling and data-driven models for modern animal production systems in the era of big data. *Animal* 14, s223–s237. <https://doi.org/10.1017/S1751731120000312>
- Farmer, C., Gillies, C., Johannsen, J.C., Hovey, R.C., Huber, L.-A., 2023. Dietary supplementation with lysine (protein) in late pregnancy does not enhance mammary development in multiparous sows. *Journal of Animal Science* 101, skad385. <https://doi.org/10.1093/jas/skad385>

- Farmer, C., Martineau, J.-P., Méthot, S., Bussi res, D., 2017. Comparative study on the relations between backfat thickness in late-pregnant gilts, mammary development and piglet growth. *Translational Animal Science* 1, 154–159. <https://doi.org/10.2527/tas2017.0018>
- Faverdin, P., Allain, C., Guatteo, R., Hostiou, N., Veissier, I., 2020.  levage de précision : de nouvelles informations utiles pour la décision ? *INRAE Productions Animales* 33, 223–234. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.4.4585>
- Ferreira, A.-L., Ramonet, Y., Enault, F., Alanic, J.-L., 2016. Un radar Doppler pour mesurer l'activité de groupes de truies. *Journées Recherche Porcine* 48, 243–244.
- Ferreira, S.V., Rodrigues, L.A., Ferreira, M.A., Alkmin, D.V., Dementshuk, J.M., Almeida, F.R.C.L., Fontes, D.O., 2021. Plane of nutrition during gestation affects reproductive performance and retention rate of hyperprolific sows under commercial conditions. *Animal* 15, 100153. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100153>
- Feyera, T., Theil, P.K., 2017. Energy and lysine requirements and balances of sows during transition and lactation: a factorial approach. *Livestock Science* 201, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.05.001>
- Floradin, P., Létourneau-Montminy, M.P., Pomar, C., Schlegel, P., 2022. Development of bone mineralization and body composition of replacement gilts fed a calcium and phosphorus depletion and repletion strategy. *Animal* 16, 100512. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100512>
- Fox, J., Pickard, D.W., Care, A.D., Murray, T.M., 1978. Effect of low phosphorus diets on intestinal calcium absorption and the concentration of calcium-binding protein in intact and parathyroidectomized pigs. *Journal of Endocrinology* 78, 379–387. <https://doi.org/10.1677/joe.0.0780379>
- Friggens, N.N.C., Robert, P.-E., 2016. Faire émerger les informations clés des données de l'élevage de précision. S. Chastant-Maillard, M. Saint-Dizier (Eds), élevage de Précision, 12–28. Editions France Agricole, Saint-Ouen-sur-Seine,  le-de-France, France.
- Gaillard, C., Brossard, L., Dourmad, J. Y., 2020a. Improvement of feed and nutrient efficiency in pig production through precision feeding. *Animal Feed Science and Technology* 268, 114611. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114611>
- Gaillard, C., Dourmad, J. Y., 2022. Application of a precision feeding strategy for gestating sows. *Animal Feed Science and Technology* 287, 115280. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115280>
- Gaillard, C., Durand, M., Largou t, C., Dourmad, J. Y., Tallet, C., 2021. 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. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115034>
- Gaillard, C., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J. Y., 2019. Exploration of individual variability to better predict the nutrient requirements of gestating sows. *Journal of Animal Science* 97, 4934–4945. <https://doi.org/10.1093/jas/skz320>
- Gaillard, C., Quiniou, N., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J. Y., 2020b. Evaluation of a decision support system for precision feeding of gestating sows. *Journal of Animal Science* 98, skaa255. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa255>
- Gauthier, R., 2021. Système d'alimentation de précision des truies en lactation par modélisation et machine learning. Thèse de doctorat. Agrocampus Ouest, Rennes, France, 257 p.
- Geuyen, T.P.A., Verhagen, J.M.F., Verstegen, M.W.A., 1984. Effect of housing and temperature on metabolic rate of pregnant sows. *Animal Science* 38, 477–485. <https://doi.org/10.1017/S0003356100041684>
- Giesemann, M.A., Lewis, A.J., Miller, P.S., Akhter, M.P., 1998. Effects of the reproductive cycle and age on calcium and phosphorus metabolism and bone integrity of sows. *Journal of Animal Science* 76, 796–807. <https://doi.org/10.2527/1998.763796x>
- Gill, B.P., 2006. Body composition of breeding gilts in response to dietary protein and energy balance from thirty kilograms of body weight to completion of first parity. *Journal of Animal Science* 84, 1926–1934. <https://doi.org/10.2527/jas.2005-203>
- González-Vega, J.C., Stein, H.H., 2014. - Invited Review - calcium digestibility and metabolism in pigs. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences* 27, 1–9. <https://doi.org/10.5713/ajas.2014.r.01>
- Goodband, R.D., Tokach, M.D., Goncalves, M.A.D., Woodworth, J.C., Dritz, S.S., DeRouchey, J.M., 2013. Nutritional enhancement during pregnancy and its effects on reproduction in swine. *Animal Frontiers* 3, 68–75. <https://doi.org/10.2527/af.2013-0036>

- Göransson, L., 1989. The effect of feed allowance in late pregnancy on the occurrence of agalactia post partum in the sow. *Journal of Veterinary Medicine Series A* 36, 505–513. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0442.1989.tb00760.x>
- Gueguen, L., Perez, J.M., 1981. A re-evaluation of recommended dietary allowances of calcium and phosphorus for pigs. *Proceedings of the Nutrition Society* 40, 273–278. <https://doi.org/10.1079/PNS19810043>
- Guintard, C., 2024. Ossification et santé osseuse chez le Porc : de la croissance à la pathologie ostéoarticulaire. Congrès Annuel de l'Association Française de Médecine Vétérinaire Porcine, présentation 1.
- Hansen, A.V., Strathe, A.B., Theil, P.K., Kebreab, E., 2014. Energy and nutrient deposition and excretion in the reproducing sow: Model development and evaluation. *Journal of Animal Science* 92, 2458–2472. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6540>
- Heinonen, M., Peltoniemi, O., Valros, A., 2013. Impact of lameness and claw lesions in sows on welfare, health and production. *Livestock Science* 156, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.06.002>
- Herpin, P., Le Dividich, J., 1998. Conséquences de l'augmentation de la prolificité des truies sur la survie et la croissance du porcelet. *INRAE Productions Animales* 11, 253–255. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.1998.11.3.3952>
- Heurtault, J., Hiscocks, S., Létourneau-Montminy, M.P., Schlegel, P., 2024a. Dynamics of bone mineralization in primiparous sows as a function of dietary phosphorus and calcium during lactation. *Animal* 18, 101130. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101130>
- Heurtault, J., Maïkoff, G., Létourneau-Montminy, M.P., Schlegel, P., 2024b. Method: Body composition assessment of sows using dual-energy X-ray absorptiometry. *Animal - Open Space* 3, 100079. <https://doi.org/10.1016/j.anopes.2024.100079>
- Hostiou, N., Allain, C., Chauvat, S., Turlot, A., Pineau, C., Fagon, J., 2014. L'élevage de précision : quelles conséquences pour le travail des éleveurs ? *INRAE Productions Animales* 27, 113–122. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2014.27.2.3059>
- Hostiou, N., Kling-Eveillard, F., Ganis, E., 2017. The effects of PLF on human-animal relationships on farms. *European Conference on Precision Livestock Farming* 8, 9 p.
- Hoving, L.L., Soede, N.M., van der Peet-Schwering, C.M.C., Graat, E.A.M., Feitsma, H., Kemp, B., 2011. An increased feed intake during early pregnancy improves sow body weight recovery and increases litter size in young sows. *Journal of Animal Science* 89, 3542–3550. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-3954>
- Huber, L., 2025. Review: Feeding strategies to meet the dynamic lysine and energy requirements of gestating and lactating sows. *Animal* 19, 101574. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101574>
- IFIP, 2024. Le porc par les chiffres : la filière porcine en France, dans l'UE et le monde. IFIP, Paris, France, 35 p.
- IFIP, 2018. Le porc par les chiffres 2017-2018. IFIP, Paris, France, 44 p.
- IFIP, 2013. Mémento de l'éleveur de porc, 7th Edition. IFIP-Institut du Porc, Paris, Île-de-France, France.
- IFIP, 2008. L'alimentation de la truie. IFIP, Paris, France, 44 p.
- INRA-CIRAD-AFZ, 2017. Tables INRA-CIRAD-AFZ. Consulté le 13/02/2025 à <https://feedtables.com/fr>
- Jacobs, M., Remus, A., Gaillard, C., Menendez, H.M., Tedeschi, L.O., Neethirajan, S., Ellis, J.L., 2022. ASAS-NANP Symposium: mathematical modeling in animal nutrition: limitations and potential next steps for modeling and modelers in the animal sciences. *Journal of Animal Science* 100, skac132. <https://doi.org/10.1093/jas/skac132>
- Jang, J.C., Hong, J.S., Jin, S.S., Kim, Y.Y., 2017. Comparing gestating sows housing between electronic sow feeding system and a conventional stall over three consecutive parities. *Livestock Science* 199, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.02.023>
- Ji, F., Hurley, W.L., Kim, S.W., 2006. Characterization of mammary gland development in pregnant gilts. *Journal of Animal Science* 84, 579–587. <https://doi.org/10.2527/2006.843579x>
- Ji, Y., Wu, Z., Dai, Z., Wang, X., Li, J., Wang, B., Wu, G., 2017. Fetal and neonatal programming of postnatal growth and feed efficiency in swine. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 8, 42. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0173-5>
- Jondreville, C.C., Dourmad, J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Productions Animales* 18, 183–192. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2005.18.3.3523>
- Jongbloed, A.W., 2008. Environmental pollution control in pigs by using nutrition tools. *Revista Brasileira de Zootecnia* 37, 215–229. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008001300026>
- Jongbloed, A.W., van Diepen, J.Th.M., Kemme, P.A., 2003. Fosfornormen voor varkens: herziening 2003, CVB documentation report 30, 66 p. Wageningen Livestock Research, Wageningen, The Netherlands.

- Jongbloed, A.W., van Diepen, J.Th.M., Kemme, P.A., Broz, J., 2004. Efficacy of microbial phytase on mineral digestibility in diets for gestating and lactating sows. *Livestock Production Science* 91, 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.07.017>
- Junge, M., Herd, D., Jezierny, D., Gallmann, E., Jungbluth, T., 2012. Water intake and drinking behavior of pregnant sows. *International Livestock Environment Symposium* 9, 6 p.
- Karst, N.A., Sidler, X., Liesegang, A., 2021. Influence of mastitis metritis agalactia (MMA) on bone and fat metabolism. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 105, 138–146. <https://doi.org/10.1111/jpn.13201>
- Kim, J.S., Yang, X., Pangen, D., Baidoo, S.K., 2015. Relationship between backfat thickness of sows during late gestation and reproductive efficiency at different parities. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science* 65, 1–8. <https://doi.org/10.1080/09064702.2015.1045932>
- Kim, S.W., Gormley, A., Jang, K.B., Duarte, M.E., 2023. Current status of global pig production: an overview and research trends. *Animal Bioscience* 37, 719–729. <https://doi.org/10.5713/ab.23.0367>
- Kim, S.W., Hurley, W.L., Wu, G., Ji, F., 2009. Ideal amino acid balance for sows during gestation and lactation. *Journal of Animal Science* 87, E123–E132. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1452>
- King, R.H., Speirs, E., Eckerman, P., 1986. A note on the estimation of the chemical body composition of sows. *Animal Science* 43, 167–170. <https://doi.org/10.1017/S0003356100018456>
- Knap, P.W., 2025. Estimated genetic trends in the lysine requirements of growing-finishing pigs and reproductive sows due to genetic trends in production traits. *Frontiers in Animal Science* 5, 1401514. <https://doi.org/10.3389/fanim.2024.1401514>
- Koketsu, Y., Dial, G.D., Pettigrew, J.E., King, V.L., 1996. Feed intake pattern during lactation and subsequent reproductive performance of sows. *Journal of Animal Science* 74, 2875–2884. <https://doi.org/10.2527/1996.74122875x>
- Kongsted, A.G., 2006. Relation between reproduction performance and indicators of feed intake, fear and social stress in commercial herds with group-housed non-lactating sows. *Livestock Science* 101, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2005.09.011>
- Kraeling, R.R., Webel, S.K., 2015. Current strategies for reproductive management of gilts and sows in North America. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 6, 3. <https://doi.org/10.1186/2049-1891-6-3>
- Krogh, U., Oksbjerg, N., Ramaekers, P., Theil, P.K., 2016. Long-term effects of maternal arginine supplementation and colostrum intake on pre- and postweaning growth in pigs. *Journal of Animal Science* 94, 117–120. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9492>
- Labussière, E., Dubois, S., Esnault, J., van Milgen, J., 2022. Energy cost of physical activity (standing and walking) in finishing pigs and sows. *Animal - science proceedings* 13, 325–326. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.07.076>
- Lachia, N., 2020. Usage du numérique en élevage porcin. Chaire AgroTic - Observatoire des usages de l'agriculture numérique, Montpellier, France. <https://agrotic.org/observatoire/wp-content/uploads/2019/10/DossierElevPorcin.pdf>
- Lagos, L.V., Woodworth, J.C., Woo Kim, S., Stein, H.H., 2023. Short communication: commercial diets for pigs in the United States contain more calcium than formulated. *Journal of Animal Science* 101, skad102. <https://doi.org/10.1093/jas/skad102>
- Langendijk, P., 2021. Latest advances in sow nutrition during early gestation. *Animals* 11, 1720. <https://doi.org/10.3390/ani11061720>
- Langendijk, P., 2015. Early gestation feeding and management for optimal reproductive performance. C. Farmer (Eds), *The gestating and lactating sow*, 27-45. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands. https://doi.org/10.3920/9789086868032_003
- Langendijk, P., Fleuren, M., Page, G., 2023. Review: Targeted nutrition in gestating sows: opportunities to enhance sow performance and piglet vitality. *Animal* 17, 100756. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100756>
- Lavery, A., Lawlor, P.G., Magowan, E., Miller, H.M., O'Driscoll, K., Berry, D.P., 2019. An association analysis of sow parity, live-weight and back-fat depth as indicators of sow productivity. *Animal* 13, 622–630. <https://doi.org/10.1017/S1751731118001799>
- Lawlor, P.G., Lynch, P.B., 2007. A review of factors influencing litter size in Irish sows. *Irish Veterinary Journal* 60, 359. <https://doi.org/10.1186/2046-0481-60-6-359>
- Le Cozler, Y., Pichodo, X., Roy, H., Guyomarc'H, C., Pellois, H., Quiniou, N., Louveau, I., Lebreton, B., Lefaucheur, L., Gondret, F., 2004. Influence du poids individuel et de la taille de la portée à la

- naissance sur la survie du porcelet, ses performances de croissance et d'abattage et la qualité de la viande. *Journées Recherche Porcine* 36, 443-450.
- Leal, D.F., Muro, B.B.D., Nichi, M., Almond, G.W., Viana, C.H.C., Vioti, G., Carnevale, R.F., Garbossa, C.A.P., 2019. Effects of post-insemination energy content of feed on embryonic survival in pigs: A systematic review. *Animal Reproduction Science* 205, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2019.04.005>
- Lee, S.A., Bedford, M.R., Stein, H.H., 2021. Comparative digestibility and retention of calcium and phosphorus in normal- and high-phytate diets fed to gestating sows and growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 280, 115084. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115084>
- Lee, S.A., Lagos, L.V., Walk, C.L., Stein, H.H., 2019. Basal endogenous loss, standardized total tract digestibility of calcium in calcium carbonate, and retention of calcium in gestating sows change during gestation, but microbial phytase reduces basal endogenous loss of calcium. *Journal of Animal Science* 97, 1712–1721. <https://doi.org/10.1093/jas/skz048>
- Legault, C., Gauthier, M., Caritez, J., Lagant, H., 1996. Analyse expérimentale de l'influence de l'âge à la première mise bas et du type génétique sur la productivité de la truie. *Annales de zootechnie* 45, 63–73.
- Legault, C., Molenat, M., Steier, C., Texier, C., Zickler, G., 1971. Principe et illustration d'un programme d'interprétation mécanographique des performances d'élevage des truies. *Journées Recherche Porcine* 3, 11–17.
- Lemee, T., Heurtault, J., Galiot, L., Schlegel, P., Cloutier, L., Létourneau-Montminy, M.P., 2024. Effets d'une alimentation de précision en phosphore et calcium sur le statut phosphocalcique de la truie durant deux cycles de gestation. *Journées Recherche Porcine* 56, 145–150.
- Létourneau-Montminy, M.P., Jondreville, C., Sauvart, D., Narcy, A., 2012. Meta-analysis of phosphorus utilization by growing pigs: effect of dietary phosphorus, calcium and exogenous phytase. *Animal* 6, 1590–1600. <https://doi.org/10.1017/S175173112000560>
- Liu, Z.H., Zhang, X.M., Zhou, Y.F., Wang, C., Xiong, J., Guo, L.L., Wang, L., Jiang, S.W., Peng, J., 2020. Effect of increasing feed intake during late gestation on piglet performance at parturition in commercial production enterprises. *Animal Reproduction Science* 218, 106477. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2020.106477>
- Maes, D.G.D., Janssens, G.P.J., Delputte, P., Lammertyn, A., de Kruif, A., 2004. Back fat measurements in sows from three commercial pig herds: relationship with reproductive efficiency and correlation with visual body condition scores. *Livestock Production Science* 91, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.06.015>
- Mallmann, A.L., Camilotti, E., Fagundes, D.P., Vier, C.E., Mellagi, A.P.G., Ulguim, R.R., Bernardi, M.L., Orlando, U.A.D., Gonçalves, M.A.D., Kummer, R., Bortolozzo, F.P., 2019. Impact of feed intake during late gestation on piglet birth weight and reproductive performance: a dose-response study performed in gilts. *Journal of Animal Science* 97, 1262–1272. <https://doi.org/10.1093/jas/skz017>
- Mallmann, A.L., Oliveira, G.S., Ulguim, R.R., Mellagi, A.P.G., Bernardi, M.L., Orlando, U.A.D., Gonçalves, M.A.D., Cogo, R.J., Bortolozzo, F.P., 2020. Impact of feed intake in early gestation on maternal growth and litter size according to body reserves at weaning of young parity sows. *Journal of Animal Science* 98, skaa075. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa075>
- Mariotti, F., Barreau, F., Beaudart, C., Bennetau-Pelissero, C., Benzi-Schmid, C., Boutron-Ruault, M.C., De Lauzon-Guillain, B., Divaret-Chauveau, A., Feillet-Coudray, C., Gautier-Stein, A., Grober, J., Huneau, J.-F., Kesse-Guyot, E., Malpuech Brugère, C., Morand, C., Morio, B., Rousseau, A.-S., Walrand, S., Morise, A., Nadaud, P., Wetzler, S., Margaritis, I., 2021. Les références nutritionnelles en vitamines et minéraux. Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort, France, 278 p.
- Martel, G., 2008. Pratiques d'élevage, productivité des troupeaux de truies et rythmes de travail des éleveurs en production porcine : une approche par modélisation. Thèse de doctorat. AgroParisTech, Paris, France, 328 p.
- McPherson, R.L., Ji, F., Wu, G., Blanton, J.R., Jr., Kim, S.W., 2004. Growth and compositional changes of fetal tissues in pigs. *Journal of Animal Science* 82, 2534–2540. <https://doi.org/10.2527/2004.8292534x>
- Médale, F., 2019. Elevage sur mesure, des innovations au service de l'animal, de l'éleveur et du consommateur. INRA, Paris, France. <https://innovherbe.bu.uca.fr/img/et-demain/plaquette-domaine-d-innovation-elevage-sur-mesure-1.pdf>

- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2023. El sector de la carne de cerdo en cifras: Principales indicadores económicos. Consulté le 15/04/2025 à [indicadoressectorporcino2023.pdf](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-395551-7.50019-2)
- Mitchell, H.H., 1964. Comparative nutrition of man and domestic animals. Academic Press, New York, USA. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-395551-7.50019-2>
- Mougenot, C., Petit, S., Gaillard, C., 2020. Le « coup d'œil » de l'éleveur est-il menacé par l'élevage de précision ? Activités 17, 2. <https://doi.org/10.4000/activites.5693>
- Muro, B.B., Carnevale, R.F., Leal, D.F., Almond, G.W., Monteiro, M.S., Poor, A.P., Schinckel, A.P., Garbossa, C.A., 2023. The importance of optimal body condition to maximise reproductive health and perinatal outcomes in pigs. Nutrition Research Reviews 36, 351–371. <https://doi.org/10.1017/S0954422422000129>
- Niemi, J.K., Bergman, P., Ovaska, S., Sevón-Aimonen, M.-L., Heinonen, M., 2017. Modeling the costs of postpartum dysgalactia syndrome and locomotory disorders on sow productivity and replacement. Frontiers in Veterinary Science 4, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fvets.2017.00181>
- Noblet, J., 1990. Bases d'estimation du besoin énergétique de la truie au cours du cycle de reproduction Thèse de doctorat. Paris 6, Paris, France, 277 p.
- Noblet, J., Close, W.H., Heavens, R.P., Brown, D., 1985. Studies on the energy metabolism of the pregnant sow: 1. Uterus and mammary tissue development. British Journal of Nutrition 53, 251–265. <https://doi.org/10.1079/BJN19850033>
- Noblet, J., Dourmad, J.Y., Etienne, M., 1990. Energy utilization in pregnant and lactating sows: modeling of energy requirements. Journal of Animal Science 68, 562–572. <https://doi.org/10.2527/1990.682562x>
- Noblet, J., Dourmad, J.Y., Le Dividich, J., Dubois, S., 1989. Effect of ambient temperature and addition of straw or alfalfa in the diet on energy metabolism in pregnant sows. Livestock Production Science 21, 309–324. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(89\)90091-2](https://doi.org/10.1016/0301-6226(89)90091-2)
- Noblet, J., Dourmad, J. Y., Milgen, J., 2016. Etat des lieux et perspectives sur la nutrition du porc. Journées Recherche Porcine 48, 85–96.
- Noblet, J., Etienne, M., 1987. Metabolic utilization of energy and maintenance requirements in pregnant sows. Livestock Production Science 16, 243–257. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(87\)90042-X](https://doi.org/10.1016/0301-6226(87)90042-X)
- Noblet, J., Henry, Y., 1993. Energy evaluation systems for pig diets: a review. Livestock Production Science 36, 121–141. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(93\)90147-A](https://doi.org/10.1016/0301-6226(93)90147-A)
- Noblet, J., Karege, C., Dubois, S., van Milgen, J., 1999. Metabolic utilization of energy and maintenance requirements in growing pigs: effects of sex and genotype. Journal of Animal Science 77, 1208–1216. <https://doi.org/10.2527/1999.7751208x>
- Noblet, J., Shi, X.S., Dubois, S., 1993a. Metabolic utilization of dietary energy and nutrients for maintenance energy requirements in sows: basis for a net energy system. British Journal of Nutrition 70, 407–419. <https://doi.org/10.1079/BJN19930135>
- Noblet, J., Shi, X.S., Dubois, S., 1993b. Energy cost of standing activity in sows. Livestock Production Science 34, 127–136. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(93\)90041-F](https://doi.org/10.1016/0301-6226(93)90041-F)
- Noblet, J., Shi, X.S., Fortune, H., Dubois, S., Lechevestrier, Y., Corniaux, C., Sauvant, D., Henry, Y., 1994. Teneur en énergie nette des aliments chez le porc. Mesure, prédiction et validation aux différents stades de sa vie. Journées Recherche Porcine 26, 235–250.
- NRC, 2012. Nutrient Requirements of Swine. 11th Revised Edition. National Academies Press, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.17226/13298>
- NRC, 1998. Nutrient Requirements of Swine: 10th Revised Edition. National Academies Press, Washington, D.C., USA. <https://doi.org/10.17226/6016>
- OECD/FAO, 2024. OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033. OECD Publishing, Paris and Rome. <https://doi.org/10.1787/4c5d2cfb-en>
- Oliviero, C., Heinonen, M., Valros, A., Peltoniemi, O., 2010. Environmental and sow-related factors affecting the duration of farrowing. Animal Reproduction Science 119, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2009.12.009>
- Olsson, A.-Ch., Andersson, M., Botermans, J., Rantzer, D., Svendsen, J., 2011. Animal interaction and response to electronic sow feeding (ESF) in 3 different herds and effects of function settings to increase capacity. Livestock Science 137, 268–272. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.10.014>
- Pedersen, T.F., van Vliet, S., Bruun, T.S., Theil, P.K., 2020. Feeding sows during the transition period— is a gestation diet, a simple transition diet, or a lactation diet the best choice? Translational Animal Science 4, 34–48. <https://doi.org/10.1093/tas/txz155>

- Pellicer-Rubio, M.-T., Fréret, S., Ferchaud, S., Boulot, S., Bidan, F., Crémoux, R.D., Barthélémy, D., Rouzeyrol, L., Experton, C., Goudet, G., 2024. Gestion de la reproduction sans hormones chez les mammifères d'élevage en AB en France. *INRAE Productions Animales* 37, 7445–7445. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2024.37.2.7445>
- Phillips, P.A., Fraser, D., 1994. Housing for sows and litters: New and old alternatives. *Banff Pork Seminar on Advances in Pork Production* 5, 37–48.
- Pomar, C., Hauschild, L., Zhang, G.-H., Pomar, J., Lovatto, P.A., 2009. Applying precision feeding techniques in growing-finishing pig operations. *Revista Brasileira de Zootecnia* 38, 226–237. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300023>
- Pomar, C., Remus, A., 2023. Review: fundamentals, limitations and pitfalls on the development and application of precision nutrition techniques for precision livestock farming. *Animal* 17, 100763. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100763>
- Portal, X.A.P., Rosero, D., Carter, S.D., 2021. Impact of elevating feed amounts in late gestation on sow and litter performance. *Journal of Animal Science* 99, 54–55. <https://doi.org/10.1093/jas/skab054.091>
- Poulsen, H.D., Jongbloed, A.W., Latimier, P., Fernández, J.A., 1999. Phosphorus consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands and Denmark. *Livestock Production Science* 58, 251–259. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00013-5](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00013-5)
- Quesnel, H., Brossard, L., Valancogne, A., Quiniou, N., 2008. Influence of some sow characteristics on within-litter variation of piglet birth weight. *Animal* 2, 1842–1849. <https://doi.org/10.1017/S175173110800308X>
- Quiniou, N., 2021. Results of 15 years of precision feeding of hyper prolific gestating sows. *Animals* 11, 1–13. <https://doi.org/10.3390/ani11102908>
- Quiniou, N., 2019. Modélisation de l'évolution moyenne du poids vif après la mise bas selon l'âge chez des truies croisées Large White x Landrace. *Journées Recherche Porcine* 51, 123–128.
- 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 Recherche Porcine* 48, 207–212.
- Quiniou, N., 2005. Influence de la quantité d'aliment allouée à la truie en fin de gestation sur le déroulement de la mise bas, la vitalité des porcelets et les performances de lactation. *Journées Recherche Porcine* 37, 187–194.
- Quiniou, N., Boudon, A., Dourmad, J. Y., Moinecourt, M., Priymenko, N., Narcy, A., 2021. Modélisation du besoin en calcium de la truie reproductrice et variation du rapport phosphocalcique des aliments selon le niveau de performance. *INRAE Productions Animales* 34, 61–78. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.1.4723>
- Quiniou, N., Dagorn, J., Gaudré, D., 2002. Variation of piglets' birth weight and consequences on subsequent performance. *Livestock Production Science* 78, 63–70. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(02\)00181-1](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00181-1)
- Quiniou, N., Guillou, A.-L., Danilo, S., Boulot, S., Quesnel, H., 2018. Conséquences sur la truie et sa portée de la distribution d'aliment de gestation ou de lactation de l'entrée en maternité à la mise bas. *Journées Recherche Porcine* 50, 107–112.
- Quiniou, N., Quesnel, H., 2008. Effet de la quantité d'aliment allouée aux truies pendant le premier mois de gestation sur la reconstitution des réserves et les caractéristiques de la portée à la naissance : premiers résultats. *Journées Recherche Porcine* 40, 227–232.
- Read, E., Baxter, E.M., Farish, M., D'Eath, R.B., 2020. Trough half empty: Pregnant sows are fed under half of their ad libitum intake. *Animal Welfare* 29, 151–162. <https://doi.org/10.7120/09627286.29.2.151>
- Remus, A., Pomar, C., 2022. One size does not fit all: opportunities and challenges in models applied to sustainable pig precision nutrition. *Animal - Science Proceedings* 13, 524–525. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.07.404>
- Renaudeau, D., Collin, A., Yahav, S., Basilio, V. de, Gourdine, J.L., Collier, R.J., 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal* 6, 707–728. <https://doi.org/10.1017/S1751731111002448>
- Rousselière, Y., Hémonic, A., Marcon, M., 2017. Monitoring of the individual drinking behavior of healthy weaned piglets and pregnant sows. *European Conference on Precision Livestock Farming* 8, 8 p.
- Salaün, C., Roux, N.L., Vieuille, C., Meunier-Salaün, M.-C., Ramonet, Y., 2004. Effet du mode de logement et du niveau de liberté de la truie allaitante sur son comportement, celui de ses porcelets et conséquences au niveau zootechnique. *Journées Recherche Porcine* 36, 371–378.

- Salmon-Legagneur, E., 1965. Quelques aspects des relations nutritionnelles entre la gestation et la lactation chez la truie. *Annales de Zootechnie* 14, 3–137. <https://doi.org/10.1051/animres:19650501>
- Schoumans, O.F., Chardon, W.J., Bechmann, M.E., Gascuel-Odoux, C., Hofman, G., Kronvang, B., Rubæk, G.H., Ulén, B., Dorioz, J.-M., 2014. Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: a review. *Science of The Total Environment* 468–469, 1255–1266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.061>
- Sève, B., 1994. Alimentation du porc en croissance : intégration des concepts de protéine idéale, de disponibilité digestive des acides aminés et d'énergie nette. *INRA Productions Animales* 7, 275–291. <https://hal.science/hal-00896092v1>
- She, Y., Li, D., Zhang, S., 2017. Methodological aspects of determining phosphorus digestibility in swine: a review. *Animal Nutrition* 3, 97–102. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2017.02.003>
- Solà-Oriol, D., Gasa, J., 2017. Feeding strategies in pig production: sows and their piglets. *Animal Feed Science and Technology* 233, 34–52. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.07.018>
- Spooler, H.A.M., Geudeke, M.J., Van der Peet-Schwering, C.M.C., Soede, N.M., 2009. Group housing of sows in early pregnancy: a review of success and risk factors. *Livestock Science* 125, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.03.009>
- Stalder, K., Lacy, C., Cross, T., Conaster, G., 2003. Financial impact of average parity of culled females in a breed-to-wean swine operation using replacement gilt net present value analysis. *Journal of Swine Health and Production* 11, 69–74. <https://www.aasv.org/shap/issues/v11n2/v11n2p69.pdf>
- Stein, H.H., 2024. Review: aspects of digestibility and requirements for minerals and vitamin D by growing pigs and sows. *Animal* 18 (suppl.1), 101125. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101125>
- Stein, H.H., Sève, B., Fuller, M.F., Moughan, P.J., de Lange, C.F.M., 2007. Invited review: amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: terminology and application. *Journal of Animal Science* 85, 172–180. <https://doi.org/10.2527/jas.2005-742>
- Stewart, V., Buis, R.Q., Christensen, B., Hansen, L.L., De Lange, C.F.M., Mandell, I.B., Huber, L.-A., 2021. The effects of precisely meeting estimated daily energy and lysine requirements for gestating sows over three consecutive pregnancies on sow reproductive and lactation performance. *Translational Animal Science* 5, txab226. <https://doi.org/10.1093/tas/txab226>
- Superchi, P., Saleri, R., Menčík, S., Dander, S., Cavalli, V., Izzi, C., Ablondi, M., Sabbioni, A., 2019. Relationships among maternal backfat depth, plasma adipokines and the birthweight of piglets. *Livestock Science* 223, 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.03.012>
- Tan, C., Huang, Z., Xiong, W., Ye, H., Deng, J., Yin, Y., 2022. A review of the amino acid metabolism in placental function response to fetal loss and low birth weight in pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 13, 28. <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00676-5>
- Tarrés, J., Tibau, J., Piedrafita, J., Fàbrega, E., Reixach, J., 2006. Factors affecting longevity in maternal Duroc swine lines. *Livestock Science* 100, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2005.08.007>
- Theil, P.K., 2014. Transition feeding of sows. C. Farmer (Eds), *The gestating and lactating sow*, 147–172. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands. https://doi.org/10.3920/9789086868032_008
- Theil, P.K., Krogh, U., Bruun, T.S., Feyera, T., 2023. Feeding the modern sow to sustain high productivity. *Molecular Reproduction and Development* 90, 517–532. <https://doi.org/10.1002/mrd.23571>
- Thomas, L.L., Gonçalves, M.A., Vier, C.M., Goodband, R.D., Tokach, M.D., Woodworth, J.C., DeRouchey, J.M., 2018. Lessons learned from managing electronic sow feeders and collecting weights of gestating sows housed on a large commercial farm. *Journal of Swine Health and Production* 26, 270–275. <https://doi.org/10.54846/jshap/1072>
- Thomas, L.L., Goodband, R.D., Tokach, M.D., Woodworth, J.C., DeRouchey, J.M., Dritz, S.S., Gebhardt, J.T., 2021. Modeling standardized ileal digestible lysine requirements during gestation on gilts and sows. *Livestock Science* 248, 104500. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104500>
- Thongkhuy, S., Chuaychu, S.H.B., Burarnrak, P., Ruangjoy, P., Juthamane, P., Nuntapaitoon, M., Tummaruk, P., 2020. Effect of backfat thickness during late gestation on farrowing duration, piglet birth weight, colostrum yield, milk yield and reproductive performance of sows. *Livestock Science* 234, 103983. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.103983>

- Tian, L., Dong, S.S., Hu, J., Yao, J.J., Yan, P.S., 2018. The effect of maternal obesity on fatty acid transporter expression and lipid metabolism in the full-term placenta of lean breed swine. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 102, e242–e253. <https://doi.org/10.1111/jpn.12735>
- Tokach, M.D., Menegat, M.B., Gourley, K.M., Goodband, R.D., 2019. Review: nutrient requirements of the modern high-producing lactating sow, with an emphasis on amino acid requirements. *Animal* 13, 2967–2977. <https://doi.org/10.1017/S1751731119001253>
- Trottier, N. I., Johnston, L. J., de Lange, C. F. M., 2014. Applied amino acid and energy feeding of sows. C. Farmer (Eds), *The gestating and lactating sow*, 117–146. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands. https://doi.org/10.3920/9789086868032_007
- Tummaruk, P., 2013. Post-parturient disorders and backfat loss in tropical sows in relation to backfat thickness before farrowing and postpartum intravenous supportive treatment. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 26, 171–177. <https://doi.org/10.5713/ajas.2012.12478>
- Turcotte, S., 2018. Systèmes d'alimentation des truies et leurs impacts sur le bâtiment. *Porc Québec* 29, 22-29. <https://www.leseleveursdeporcsduquebec.com/wp-content/uploads/2023/11/60.pdf>
- Turcotte, S., Ricard, M.A., 2015. Transition vers les truies gestantes en groupe : ce qu'il faut savoir ! Consulté le 17/04/2025 à <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2463635>
- van Milgen, J., Dourmad, J. Y., 2015. Concept and application of ideal protein for pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 6, 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40104-015-0016-1>
- van Milgen, J., Valancogne, A., Dubois, S., Dourmad, J. Y., Sève, B., Noblet, J., 2008. InraPorc: a model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 143, 387–405. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.05.020>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.06.005>
- Van Riet, M.M.J., Millet, S., Liesegang, A., Nalon, E., Ampe, B., Tuytens, F. a. M., Maes, D., Janssens, G.P.J., 2016. Impact of parity on bone metabolism throughout the reproductive cycle in sows. *Animal* 10, 1714–1721. <https://doi.org/10.1017/S1751731116000471>
- Vanderhaeghe, C., Dewulf, J., De Vlieghe, S., Papadopoulos, G.A., de Kruif, A., Maes, D., 2010. Longitudinal field study to assess sow level risk factors associated with stillborn piglets. *Animal Reproduction Science* 120, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2010.02.010>
- Veissier, I., Kling-Eveillard, F., Mialon, M.-M., Silberberg, M., De Boyer Des Roches, A., Terlouw, C., Ledoux, D., Meunier, B., Hostiou, N., 2019. Élevage de précision et bien-être en élevage : la révolution numérique de l'agriculture permettra-t-elle de prendre en compte les besoins des animaux et des éleveurs ? *INRAE Productions Animales* 32, 281–290. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2478>
- Vignola, M., 2009. Sow Feeding Management During Lactation. London Swine Conference - Tools of the Trade, 107–117.
- Wainsten, J.-P., Bourrillon, A., Cabanis, A., Chapuis, Y., 2022. *Le Larousse médical*, Éditions Larousse, Paris, France.
- Walk, C.L., 2016. The influence of calcium on phytase efficacy in non-ruminant animals. *Animal Production Science* 56, 1345–1349. <https://doi.org/10.1071/AN15341>
- Wathes, C.M., Kristensen, H.H., Aerts, J.-M., Berckmans, D., 2008. Is precision livestock farming an engineer's daydream or nightmare, an animal's friend or foe, and a farmer's panacea or pitfall? *Computers and Electronics in Agriculture* 64, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.05.005>
- Weng, R.C., Edwards, S.A., Hsia, L.C., 2009. Effect of individual, group or ESF housing in pregnancy and individual or group housing in lactation on sow behavior. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 22, 1574–1580. <https://doi.org/10.5713/ajas.2009.80254>
- Whittemore, C.T., Franklin, M.F., Pearce, B.S., 1980. Fat changes in breeding sows. *Animal Science* 31, 183–190. <https://doi.org/10.1017/S0003356100024430>
- Wu, G., Bazer, F.W., Burghardt, R.C., Johnson, G.A., Kim, S.W., Li, X.L., Satterfield, M.C., Spencer, T.E., 2010. Impacts of amino acid nutrition on pregnancy outcome in pigs: mechanisms and implications for swine production. *Journal of Animal Science* 88, E195–E204. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2446>
- Young, M.G., Tokach, M.D., Aherne, F.X., Main, R.G., Dritz, S.S., Goodband, R.D., Nelssen, J.L., 2004. Comparison of three methods of feeding sows in gestation and the subsequent effects on lactation performance. *Journal of Animal Science* 82, 3058–3070. <https://doi.org/10.2527/2004.82103058x>

Zhou, Y., Xu, T., Cai, A., Wu, Y., Wei, H., Jiang, S., Peng, J., 2018. Excessive backfat of sows at 109 d of gestation induces lipotoxic placental environment and is associated with declining reproductive performance. *Journal of Animal Science* 96, 250–257.
<https://doi.org/10.1093/jas/skx041>

2. Question de recherche et démarche scientifique

2.1. Questionnement de la thèse

Le modèle nutritionnel de Gaillard et al. (2019) utilise les caractéristiques individuelles à l'insémination (âge, poids, ELD) et les objectifs à la mise-bas de production (poids de portée) et de contenu corporel (objectifs d'état), pour estimer les besoins nutritionnels de la truie sur l'ensemble de la gestation. Des écarts persistent entre les prédictions de ces performances et les valeurs observées. Cela pourrait être dû à des entrées du modèle encore évaluées au niveau du troupeau et non à celui de l'individu (e.g. l'activité physique) ou au manque de prise en compte de l'évolution de certains critères en temps réel (e.g. le poids). Intégrer ces caractéristiques à l'échelle individuelle pourrait être un levier pour affiner la précision de l'estimation des besoins énergétiques individuels.

L'alimentation sur mesure ajustée sur la base de besoins en énergie et AA pour les truies gestantes a fait l'objet de travaux qui ont démontré un potentiel pour réduire légèrement les coûts alimentaires et fortement les rejets environnementaux en comparaison avec une alimentation conventionnelle utilisant un aliment unique durant toute la gestation (Gaillard et Dourmad, 2022). Les effets de ce type de stratégie ont été évalués sur une seule gestation *in vivo* mais ses effets à plus long-terme (*i.e.*, sur plusieurs cycles consécutifs) sur les performances restent à clarifier.

Les stratégies d'alimentation sur mesure pour les truies gestantes se sont focalisées jusqu'alors sur l'énergie et les AA, composants les plus coûteux de l'aliment. Cependant, ne pas prendre en compte les besoins individuels en P dans l'ajustement des apports nutritionnels entraîne des réponses variables, positives ou négatives, sur les rejets de P dans l'environnement (Gaillard et Dourmad, 2022 ; Stewart et al., 2021). Ainsi, appliquer une stratégie d'alimentation sur mesure prenant en compte les besoins individuels en P pourrait permettre d'atteindre une marge de gain non négligeable et maîtrisable sur les rejets de P dans l'environnement en complément des progrès déjà observés sur N.

Ainsi la question de recherche que s'attache à répondre cette thèse est la suivante :

Comment améliorer sur le long-terme les différentes composantes de la performance d'une truie (production, reproduction, coût alimentaire et rejets environnementaux) par l'application de stratégies d'alimentation sur mesure ?

Elle s'articule autour de trois objectifs :

- 1) *ÉNERGIE* : évaluer l'intérêt d'améliorer le modèle d'estimation des besoins en énergie avec l'utilisation de données d'entrées complémentaires

Des données historiques (performances productives, poids des truies) ou moyennées (activité physique) sont encore utilisées dans l'estimation des besoins nutritionnels individuels des truies gestantes. Prendre en compte ces données à l'échelle individuelle et journalière pourrait permettre d'affiner l'estimation des besoins énergétiques. Les capteurs présents en salle de gestation (balances connectées, accéléromètres) permettent de collecter à l'échelle individuelle et/ou en temps réel des données. Nous nous focaliserons sur l'utilisation des données individuelles et journalières d'activité physique et de poids en temps réel. Sur la base de ces informations et avec les prédictions préalablement établies, l'estimation des besoins nutritionnels et la mise en œuvre des apports via les DAC pourraient être affinés.

- 2) *LONGÉVITÉ* : évaluer expérimentalement et via des simulations, l'effet de stratégies d'alimentation sur mesure sur la longévité des truies.

Les effets d'une alimentation sur mesure fondée sur un ajustement des apports en énergie et AA ont été évalués par simulation (Gaillard et al., 2020) et expérimentalement (Gaillard et Dourmad, 2022) sur un cycle de gestation. Cette stratégie n'a pas encore été évaluée sur plusieurs cycles consécutifs. Les effets des stratégies alimentaires pourraient ne pas être forcément cumulatifs car la truie est capable de faire face à de gros challenges nutritionnels sur le court terme (Theil et al., 2023). A plus long-terme, la succession de ces challenges pourraient influencer sur les différentes composantes de la performance de truies.

- 3) *MINÉRAUX* : définir et évaluer une stratégie d'alimentation sur mesure ajustée sur les besoins en énergie, acides aminés et minéraux conjointement

Les stratégies d'alimentation sur mesure se sont focalisées jusqu'alors sur les besoins en énergie et AA. Cependant, les besoins en minéraux sont tout aussi essentiels (structure osseuse, réactions enzymatiques) et variables entre truies et au cours du temps. Les besoins en minéraux évoluent au cours de la gestation selon une dynamique temporelle différente de celle des AA. Les prendre en compte pourrait permettre de raisonner l'apport, notamment du P issu de minerais dont la ressource est non renouvelable, et réduire son rejet dans l'environnement. D'autres composantes de la performance, telles que le statut osseux, pourraient être impactées par la stratégie alimentaire et la santé des truies pourrait en être améliorée.

2.2. Démarche entreprise durant la thèse

La démarche de la thèse est récapitulée dans la Figure 2.1. Deux expérimentations sont réalisées. Une première s'est déroulée antérieurement à la thèse, de juin 2021 à septembre 2022 à l'élevage expérimental INRAE de l'UE3P (DOI : 10.15454/1.5573932732039927E12) à Saint-Gilles (35). Elle a permis la collecte de données utilisées pendant la thèse pour comparer, sur trois cycles de gestation consécutifs, les performances des truies suivant un plan d'alimentation sur mesure (**PF**) ajustée en énergie et AA vis-à-vis de la stratégie d'alimentation conventionnelle (**CF**) de l'élevage. Une deuxième expérimentation, menée pendant la thèse, a eu lieu à la station expérimentale « CIRI by IFIP » de Romillé (35) de février 2023 à avril 2024. Les performances des truies PF ayant une alimentation ajustée en énergie, AA et P ont été suivies sur trois cycles de gestation consécutifs et comparées à celles de truies ayant une alimentation conventionnelle, *i.e.* un seul aliment durant toute la gestation, ajustée en énergie (**SF**) grâce au modèle nutritionnel.

Le chapitre 3 présente les trois échelles explorées au cours de la thèse :

In silico. Des modifications ont été effectuées sur le modèle nutritionnel des truies gestantes en ayant pour situation initiale le modèle décrit par Gaillard et al. (2019). Il prend en compte les dernières avancées sur l'estimation des besoins en minéraux (P et Ca) des truies gestantes. Le script a été remodelé pour qu'il soit syntaxiquement dans les normes informatiques de Python (Pep8) et qu'il puisse incorporer des fichiers de données en temps réel. Les différentes méthodes d'optimisation y sont renseignées.

In vivo. Les principes généraux appliqués durant les deux expérimentations au cours de cette thèse.

In laboratorio. Les méthodes mises en place pour les analyses laboratoires des minéraux et biomarqueurs de minéralisation osseuse avec différentes matrices non invasives.

Ce chapitre est un préalable à la réalisation des trois objectifs de thèse réalisés à travers les chapitres 4 à 8 introduits sous la forme de publications scientifiques.

Le chapitre 4 s'intéresse à la prise en compte de données complémentaires en temps réel dans l'estimation des besoins énergétiques des truies gestantes (premier objectif : ÉNERGIE). Il est constitué de deux sous-parties la première sur la prise en compte du poids réel mesuré avec les balances connectées et la deuxième sur la prise en compte de l'activité physique obtenue à l'aide d'accéléromètres. Les données sont collectées durant les deux expérimentations menées dans cette thèse.

Les chapitres 5 et 6 présentent les résultats des deux essais expérimentaux obtenus par la mise en place d'alimentations sur mesure, respectivement ajustées en énergie et AA (première expérimentation, INRAE ; deuxième objectif : LONGÉVITÉ), et en énergie, AA et minéraux (deuxième expérimentation, IFIP ; deuxième : LONGÉVITÉ et troisième objectif : MINÉRAUX) sur les performances des truies PF sur le long-terme.

Le chapitre 7 récapitule et organise sous la forme d'une base de données MySQL, l'ensemble des données obtenues lors des deux expérimentations de cette thèse. Elles sont accessibles publiquement sur l'entrepôt de données institutionnel Data INRAE de la plateforme Recherche Data Gouv.

En début de deuxième année de thèse, un séjour doctoral de 4 mois a été réalisé chez Topigs Norsvin aux Pays-Bas permettant la construction d'une importante base de données de performances de truies (plus de 3000 gestations de 1100 truies). Ces données sont utilisées pour simuler sur le long-terme des stratégies d'alimentation sur mesure et les résultats sont présentés dans le chapitre 8 (deuxième objectif : LONGÉVITÉ).

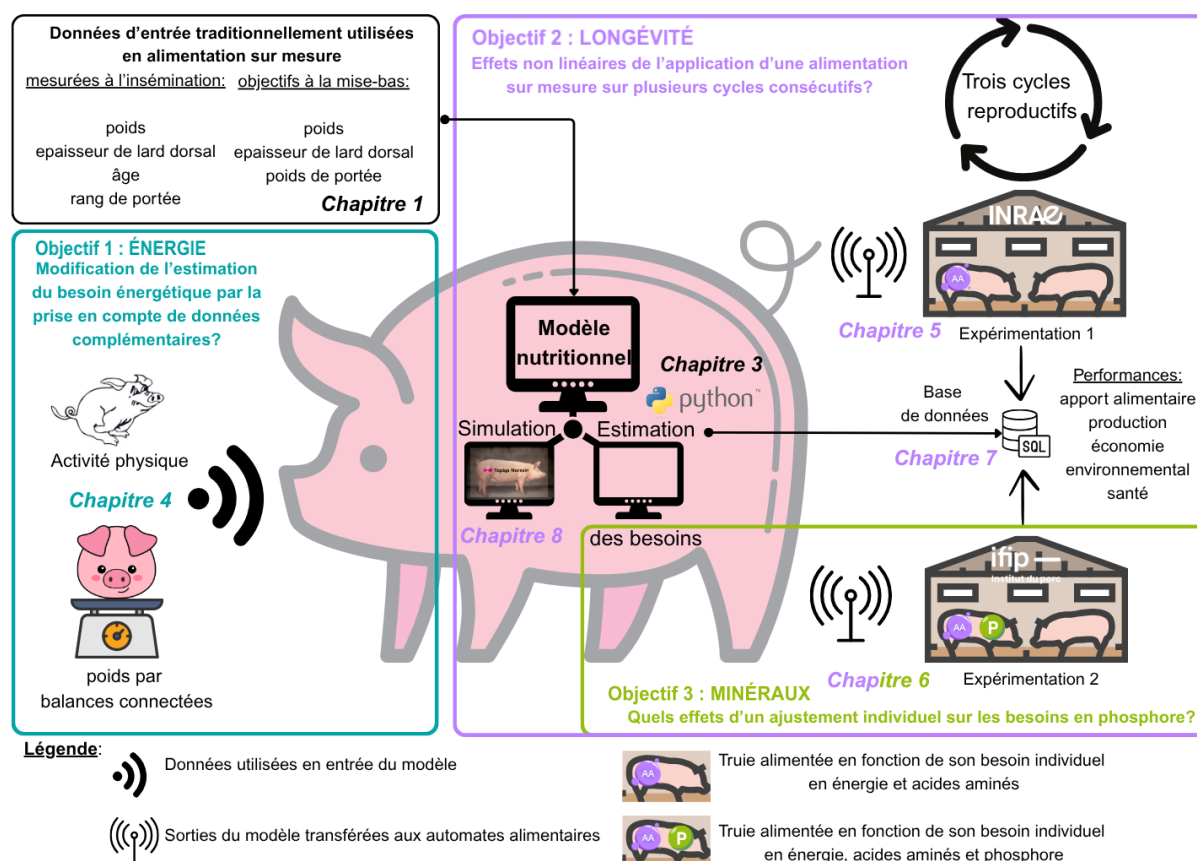


Figure 2.1 : Schéma de la démarche scientifique adoptée au cours de la thèse (Chapitre 2)

2.3. Références bibliographiques

- Gaillard, C., Dourmad, J.Y., 2022. Application of a precision feeding strategy for gestating sows. *Animal Feed Science and Technology* 287, 115280. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115280>
- Gaillard, C., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J. Y., 2019. Exploration of individual variability to better predict the nutrient requirements of gestating sows. *Journal of Animal Science* 97, 4934–4945. <https://doi.org/10.1093/jas/skz320>
- Gaillard, C., Quiniou, N., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J. Y., 2020. Evaluation of a decision support system for precision feeding of gestating sows. *Journal of Animal Science* 98, skaa255. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa255>
- Stewart, V., Buis, R.Q., Christensen, B., Hansen, L.L., De Lange, C.F.M., Mandell, I.B., Huber, L.-A., 2021. The effects of precisely meeting estimated daily energy and lysine requirements for gestating sows over three consecutive pregnancies on sow reproductive and lactation performance. *Translational Animal Science* 5, txab226. <https://doi.org/10.1093/tas/txab226>
- Theil, P.K., Krogh, U., Bruun, T.S., Feyera, T., 2023. Feeding the modern sow to sustain high productivity. *Molecular Reproduction and Development* 90, 517–532. <https://doi.org/10.1002/mrd.23571>

3. Matériel et méthodes général

3.1. *In silico* : modification du modèle nutritionnel et méthode d'optimisation par simulation

Le modèle nutritionnel pour truies gestantes utilisé pour la présente thèse est le modèle décrit par Gaillard et al. (2019) et évalué par simulation (Gaillard et al., 2020). Il est issu et adapté du modèle développé par Dourmad et al. (2008) présenté dans la section 1.2.1. Le modèle a été développé sous le langage de programmation Python (Python Software Foundation, 2020) version 3.7 qui est en source ouverte et distribué sous licence libre. D'après l'index TIOBE, Python est le langage de programmation le plus utilisé actuellement à travers le monde grâce à sa facilité de lecture de syntaxe et par ses nombreuses applications en science des données et du domaine de l'apprentissage automatique (Jansen, 2025). Aucun problème n'a été détecté sur le modèle avec une version actualisée du langage (version 3.9) et utilisé actuellement. Au cours de cette thèse, le modèle a été restructuré et modifié syntaxiquement pour répondre aux conventions de programmation établies par la PEP 8 (van Rossum et al., 2001). Notamment un focus a été réalisé pour documenter l'ensemble des classes et des fonctions intégrées dans le modèle suivant le style de la librairie de méthodes numpy (Figure 3.1 ; Harris et al., 2020). Ces informations permettent de connaître le type de données de chaque variable ainsi que l'origine des équations utilisées.

Python est un langage de programmation orienté objet, c'est-à-dire que chaque élément est représenté par un objet qui a des relations informatiques avec les autres objets. Chaque objet a des attributs qui correspondent *via* des variables aux caractéristiques propres de l'objet et *via* des fonctions, nommées méthodes, aux actions, relations associées à l'objet. Les classes permettent de définir un type d'objet possédant des attributs similaires. Chaque objet défini à partir de la classe correspond à une instance de la classe. Les librairies de méthode développées par d'autres utilisateurs sont facilement importables et utilisables. Dans le modèle nutritionnel, plusieurs classes sont utilisées et ont été en partie modifiées ou restructurées :

Classe Truie. Chaque truie de l'élevage appartient à cette classe avec ses attributs à l'insémination (identifiant, âge, rang de portée, PV et ELD à l'insémination) et les performances à la mise-bas (PV et ELD à la mise-bas, taille de portée, poids de portée). Celles-ci peuvent être soit observées dans le cadre d'une analyse post-gestation ou prédites dans le cas d'une estimation des besoins. La méthode principale de cette classe est la fonction *data_gestation*. Elle permet à partir des données à l'insémination, des objectifs à la mise-bas et de la série d'équations insérées dans le modèle, de calculer l'évolution des compartiments corporels et

par conséquent les besoins nutritionnels individuels journaliers. La classe Truie n'est plus en héritage des classes Aliment et Environnement. Elle est programmée en composition, c'est-à-dire que les truies n'héritent plus des attributs de ces autres classes mais est en relation avec des instances de ces classes. Une modification importante du modèle a été la création d'une méthode d'estimation des besoins en minéraux. En supplément de la méthode interne déjà disponible (Gaillard et al., 2019), elle intègre deux autres méthodes publiées dans la littérature (Bikker et Blok, 2017 ; Quiniou et al., 2021). Les équations des besoins en P et Ca de chaque compartiment de la truie, selon la méthode utilisée, sont disponibles respectivement dans le Tableau 3.1 et le Tableau 3.2.

Pour permettre les simulations de besoin sur plusieurs cycles consécutifs, un nouvel attribut : *statut_physiologique* prenant en compte trois états différents possibles (gestante, allaitante, non-productive) et d'autres variables de durée associée (durée de lactation, ISSF) ont été intégrées comme données d'entrée nécessaires pour la création d'objet de la classe Truie. Les méthodes *lactation* et *sevrage* ont été créées pour faciliter l'incorporation détaillée de ces périodes du cycle dans un futur proche dans le modèle. Elles utilisent pour le moment des valeurs moyennées pour chaque période permettant l'estimation sur plusieurs cycles consécutifs.

Classe Aliment. La classe Aliment a été restructurée en profondeur. Elle prend toujours en compte le contenu en EM, en Lys DIS, en P_{dig} et la matière sèche de l'aliment comme attributs obligatoires. Cependant, elle accepte de nouvelles variables en fonction de la connaissance nutritionnelle de l'aliment à notre disposition telles que les contenus des autres AA essentiels. Il est également possible d'ajouter le prix associé à cet aliment. Cette variable est primordiale pour l'utilisation de la nouvelle méthode *proportion_aliment* implémentée. Cette fonction prend en compte l'ensemble des objets aliments disponibles. En fonction des nutriments clés définis dans la stratégie d'alimentation sur mesure sélectionnée, la fonction permet de donner le pourcentage de chaque aliment pour satisfaire les besoins individuels journaliers en minimisant le coût. Elle utilise une optimisation linéaire sous contraintes pour obtenir ces pourcentages à l'aide des méthodes de la librairie PuLP (Mitchell et al., 2011). La stratégie par défaut dans la méthode est l'ajustement sur l'énergie et la Lys DIS. Une autre méthode est prédéfinie : l'ajustement sur l'énergie, la Lys DIS et le P_{dig} . Mais il est possible également de définir sa propre stratégie en fonction des nutriments cibles pour l'ajustement. Une autre fonction appelée *stratégie_nutritionnelle* a été créée. Elle permet de structurer la gestation en fonction du nombre de phases alimentaires voulues et notamment de déterminer les quantités d'aliment allouées à chaque phase avec ou sans application d'un surplus alimentaire (« bump feeding »). La structure par défaut intègre le découpage de la gestation en deux phases : l'une

de 0 à 85 jours de gestation et l'autre de 86 à la mise-bas avec un surplus alimentaire de 500 g par jour durant cette deuxième phase.

```
def proportion_aliment (aliment_list, daily_needs, method = "energy_lysine_price",
confidence_interval = 0, priority = None):
    """
    give the aliment proportion following the priority on each value
    Parameters
    -----
    aliment_list : a list of object from the class Aliment
        The different possible feed to give to the sow
    daily_needs : dict
        Daily needs for the day jour integrated in a dictionary; key = the name of nutritional element,
        value in g per kg of aliment
    method : str
        The priority in selected feed
        Available:
            energy_lysine_price (default): give feed to minimize price and have the good amount of
            energy and lysine
            energy_lysine_phosphorus_price: give feed to minimize price and have the good amount
            of energy, lysine and phosphorus
            custom: give feed to minimize price and have the good amount of nutritional that you
            want to take into account
    confidence_interval: int
        Give an integer (less than 30) to be the maximum available confidence interval for
        acceptable need [estimated need by the model - confidence_interval/100 ,estimated need
        by the model + confidence_interval/100]
    priority : list
        List of element to be taken into account ordered by priority (element have to be an attribut of
        Aliment class), don't put the price in this list
    default: None
    ADP: str
        YES (default): we are applying a precision feeding
        NO: we are not applying the precision feeding

    Returns
    -----
    aliment_proportion: list
        Feed proportion in the same order as given in aliment_list
    confidence_interval_index: int
        Give the value for which we satisfied all the constraints with a given confidence_interval

    Raises
    -----
    TypeError: you don't select an available method
    ValueError: the model can't save the problem
    """
```

Abréviations : dict = dictionnaire ; int = entier ; str = chaîne de caractères. Note : La documentation est divisée en trois catégories : « Parameters », « Returns » et « Raises ». Les « Parameters » sont les variables d'entrée de la fonction. Les « Returns » sont les variables de sortie de la fonction. Les « Raises » sont les lignes de code qui font remonter des erreurs spécifiques.

Figure 3.1 : Documentation de la fonction *proportion_aliment* suivant le style numpy créée dans la classe Aliment du modèle nutritionnel

Tableau 3.1 – Equation¹ d'estimation du besoin en P de la truie gestante en fonction du compartiment, de la méthode utilisée et du stade de gestation

Compartiment	Méthode		
	Gaillard et al. (2019)	Quiniou et al. (2021)	Bikker et Blok (2017) ²
P_{dig} , g/j			
Entretien	$7\text{E-}03 \times (PV_T + PV_C)(t)$	$0,96 \times (10\text{E-}03 \times (PV_T + PV_C)(t))$	$7\text{E-}03 \times (PV_T + PV_C)(t)$
Réserves maternelles	$(PV_T(t) - PV_T(t-1))/1000 \times 0,96 \times (5,42 - 2 \times 2,86\text{E-}03 \times (PV_T + PV_C)(t))/0,98$	$(PV_T(t) - PV_T(t-1))/1000 \times 5,5$	$(PV_T(t) - PV_T(t-1))/1000 \times 5,5$
Fœtus	$(PV_{\text{fœtus}}(t) - PV_{\text{fœtus}}(t-1))/0,98$	Pour $t \geq 14$: $(PV_{\text{fœtus}2}(t) \times TP_{\text{fœtus}}(t) - PV_{\text{fœtus}2}(t-1) \times TP_{\text{fœtus}}(t-1)) \times 6,2$ sinon 0	Pour $t \geq 14$: $(PV_{\text{fœtus}2}(t) \times TP_{\text{fœtus}}(t) - PV_{\text{fœtus}2}(t-1) \times TP_{\text{fœtus}}(t-1)) \times 5,97$ sinon 0
Placenta	$(\text{Placenta}(t) - \text{Placenta}(t-1))/0,98$	$(\text{Placenta}(t) - \text{Placenta}(t-1)) \times 1,6\text{E-}02$	$((\text{Placenta}(t) - \text{Placenta}(t-1))/(6,25 \times 1000)) \times 100 \times (PV_{\text{fœtus}2}(t)/(\exp(8,72962 - 4,07466 \times \exp(-0,03318 \times (t - 45))) + 0,000154 \times 30 \times t + 0,06774 \times NP))$
Fluides corporels	0	0	$((\text{Fluide}(t) - \text{Fluide}(t-1))/(6,25 \times 1000)) \times 20 \times (PV_{\text{fœtus}2}(t)/(\exp(8,72962 - 4,07466 \times \exp(-0,03318 \times (t - 45))) + 0,000154 \times 30 \times t + 0,06774 \times NP))$
Glandes mammaires	0	0	$(\text{Mamelle}(t) - \text{Mamelle}(t-1))/(6,25 \times 1000)) \times 60$

Abréviations : DG = durée de gestation, j ; Emd = énergie métabolisable ingérée, MJ/j ; exp = exponentiel ; P_{dig} = phosphore digestible ; PM = poids moyen d'un porcelet à la naissance, g ; PV_T = Poids vif truie seule, kg ; PV_C = Poids vif conceptus, kg ; t = stade de gestation, j ; NP = taille de la portée à la naissance

¹ Les coefficients ont été arrondis à trois chiffres significatifs par soucis de lisibilité.

² La valeur de Emd est fixé à 30 MJ/j pour la méthode de Bikker et Blok, 2017.

Avec :

$$PV_{\text{fœtus}}(t) = \exp(4,591 - 6,389 \times \exp(-0,02398 \times (t - 45))) + 0,0897 \times NP \times (6,25 \times NP \times PM / 1000) / \exp(4,591 - 6,389 \times \exp(-0,02398 \times (DG - 45))) + 0,0897 \times NP$$

$$PV_{\text{fœtus}2}(t) = (NP \times PM / 1000) \times \exp(8,72962 - 4,07466 \times \exp(-0,03318 \times (t - 45))) + 0,000154 \times Emd \times t + 0,06774 \times NP / \exp(8,72962 - 4,07466 \times \exp(-0,03318 \times (DG - 45))) + 0,000154 \times Emd \times DG + 0,06774 \times NP$$

$$TP_{\text{fœtus}}(t) = (0,0565 \times t - 0,736) / (0,0565 \times (DG - 0,736))$$

$$\text{Placenta}(t) = \exp(7,34264 - 1,40598 \times \exp(-0,0625 \times (t - 45))) + 0,000253 \times Emd \times t + 0,06339 \times NP / 23,8$$

$$\text{Fluide}(t) = \exp(2,3954 + 0,09807 \times t - 0,000541 \times t^2 + 0,08734 \times NP) / 23,8$$

$$\text{Mamelle}(t) = (\exp(8,4827 - 7,1786 \times \exp(-0,0153 \times (t - 29,18)))) / 23,8$$

Tableau 3.2 – Equation¹ d'estimation du besoin en Ca de la truie gestante en fonction du compartiment, de la méthode utilisée et du stade de gestation

Compartiment	Méthode		
	Gaillard et al. (2019)	Quiniou et al. (2021)	Bikker et Blok (2017) ²
Ca, g/j			
Entretien	$10E-03 \times (PV_T + PV_C)(t)$	$0,96 \times (35E-03 \times (PV_T + PV_C)(t))$	$(10E-03 \times (PV_T + PV_C)(t))/0,98$
Réserves maternelles	$P_{dig} \text{ Réserves maternelle (t) } \times 1,65/0,98$	$P_{dig} \text{ Réserves maternelle (t) } \times 1,75$	Si primipares : $P_{dig} \text{ Réserves maternelles (t) } \times 1,6$ Sinon : $P_{dig} \text{ Réserves maternelles (t) } \times 1,75$
Fœtus	$(P_{dig} \text{ Fœtus (t) } - P_{dig} \text{ Fœtus (t-1)}) \times 1,76/0,98$	Pour $t \geq 33$: $(PV \text{ fœtus2 (t) } \times TCa \text{ fœtus (t) } - PV \text{ fœtus2(t-1) } \times TCa \text{ fœtus (t-1)}) \times 11$ sinon 0	Pour $t \geq 33$: $(PV \text{ fœtus2 (t) } \times TCa \text{ fœtus (t) } - PV \text{ fœtus2(t-1) } \times TCa \text{ fœtus (t-1)}) \times 10,5$ sinon 0
Placenta	$P_{dig} \text{ Placenta (t) } \times 1,76/0,98$	$P_{dig} \text{ Placenta (t) } \times 0,8$	$P_{dig} \text{ Placenta (t) } \times 0,8$
Fluides corporels	0	0	$P_{dig} \text{ Fluides corporels(t) } \times 5$
Glandes mammaires	0	0	$(Mamelle (t) - Mamelle (t-1))/(6,25 \times 1000)) \times 4$

Abréviations : Ca = calcium ; DG = durée de gestation, j ; Emd = énergie métabolisable ingérée, MJ/j ; exp = exponentiel ; P_{dig} = phosphore digestible ; PM = poids moyen d'un porcelet à la naissance, g ; PV_T = Poids vif truie seule, kg ; PV_C = Poids vif conceptus, kg ; t = stade de gestation, j ; NP = taille de la portée à la naissance

¹ Les coefficients ont été arrondis à trois chiffres significatifs par soucis de lisibilité.

² La valeur de Emd est fixé à 30 MJ/j pour la méthode de Bikker et Blok, 2017.

Avec :

$PV \text{ fœtus (t)} = \exp(4,591 - 6,389 \times \exp(-0,02398 \times (t - 45))) + 0,0897 \times NP) \times (6,25 \times NP \times PM / 1000) / \exp(4,591 - 6,389 \times \exp(-0,02398 \times (DG - 45))) + 0,0897 \times NP$

$PV \text{ fœtus2 (t)} = (NP \times PM / 1000) \times \exp(8,72962 - 4,07466 \times \exp(-0,03318 \times (t - 45))) + 0,000154 \times Emd \times t + 0,06774 \times NP) / \exp(8,72962 - 4,07466 \times \exp(-0,03318 \times (DG - 45))) + 0,000154 \times Emd \times DG + 0,06774 \times NP$

$TCa \text{ fœtus (t)} = (0,1244 \times t - 4,039) / (0,1244 \times (DG - 4,039))$

$Placenta(t) = \exp(7,34264 - 1,40598 \times \exp(-0,0625 \times (t - 45))) + 0,000253 \times Emd \times t + 0,06339 \times NP) / 23,8$

$Fluide (t) = \exp(2,3954 + 0,09807 \times t - 0,000541 \times t^2 + 0,08734 \times NP) / 23,8$

$Mamelle (t) = (\exp(8,4827 - 7,1786 \times \exp(-0,0153 \times (t - 29,18)))) / 23,8$

Classe Environnement. La classe Environnement n'a pas été modifiée et les objets de cette classe prennent toujours en compte les conditions de logement (en groupe ou en case individuelle) ainsi que la température moyenne associée dans la salle.

Classe Élevage. Une nouvelle classe nommée Élevage a été créée pour prendre en compte les spécificités inter-élevages qui joueraient dans l'estimation des besoins nutritionnels. Un focus a été effectué sur la recalibration des coefficients pour mieux correspondre aux performances observées de l'élevage. Le modèle utilise une équation de Weibull pour caractériser le poids de l'animal en fonction de son âge (Quiniou, 2019) qui est variable en fonction de chaque élevage (Gaillard et al., 2020). Ainsi, une méthode *calibration_Weibull* a été mise en place pour ajuster les trois paramètres de cette équation lorsque des données de poids et d'âge sont disponibles. Ces paramètres réajustés sont ensuite utilisés dans la fonction *data_gestation* des truies associées à cet élevage. Dans la même idée, la méthode de *calibration_chimique* permet de recalibrer les neuf paramètres associés à la composition chimique énergétique, protéique et lipidique des truies en fonction de leur PV et ELD. Cette méthode nécessite plus de données pour calibrer un nombre plus important de paramètres. Ces deux méthodes utilisent la fonction *curve_fit* de la librairie SciPy (Virtanen et al., 2020) avec comme méthode d'optimisation, l'algorithme de Levenberg-Marquardt pour *calibration_Weibull* et la méthode d'optimisation de l'algorithme à région de confiance pour *calibration_chimique*. Si les données disponibles ne sont pas assez conséquentes ou qu'il n'est pas nécessaire de calibrer, les méthodes par défaut utilisent les coefficients établis par Gaillard et al. (2020) et par Dourmad et al. (1997) respectivement. Si les coefficients ont été calibrés hors du modèle, il est possible de les intégrer en tant que données d'entrée.

Données en temps réel. Les données en temps réel de poids *via* les balances connectées ou celles d'activité physique (temps passé debout, en mouvement) *via* les accéléromètres sont intégrées à partir de documents de type .CSV. Pour faciliter leur manipulation et leur lecture au sein du modèle, la librairie Panda et les méthodes associées sont utilisées (The pandas development team, 2020).

3.2. *In vivo* : deux expérimentations animales sur trois cycles de gestation consécutifs

Deux expérimentations animales pour évaluer l'effet à long-terme de différentes stratégies d'alimentation sur mesure ont été mises en place. La première s'est déroulée en amont du démarrage de la thèse à la ferme expérimentale UE3P d'INRAE. Une alimentation sur mesure ajustée sur les besoins en énergie et AA a été comparée à l'alimentation conventionnelle de la ferme. La deuxième expérimentation s'est déroulée à la ferme « CIRI by IFIP ». Une alimentation sur mesure ajustée sur les besoins en énergie, AA et P_{dig} a été comparée à

l'alimentation conventionnelle de la ferme, *i.e.* ajustée sur l'énergie. Les éléments suivants récapitulent les différences entre les deux fermes expérimentales et les principes généraux appliqués lors de ces expérimentations.

Conduite technique des truies gestantes. Dans les deux fermes, une conduite technique en sept bandes avec sevrage à 28 jours a été utilisée. Une bande est composée de 20 truies pour l'expérimentation 1 et 28 truies pour l'expérimentation 2. Dans chaque expérimentation, deux bandes ont été suivies sur trois cycles de gestation consécutifs. Dans l'expérimentation 1, les truies sont entrées en gestation groupée 3 jours après insémination et ont conservé ce groupe jusqu'au transfert en salle de lactation, environ une semaine avant la mise-bas. Pour l'expérimentation 2, les truies sont logées seules jusqu'à 25 jours après l'insémination puis ont intégré une salle de gestation avec un groupe dynamique où trois bandes étaient présentes. Une nouvelle bande a intégré ou quitté la salle toutes les trois à six semaines. Les truies sont restées dans cette salle jusqu'au transfert en salle de lactation, environ une semaine avant la mise-bas. Les détails sur les salles de gestation et les équipements utilisés sont disponibles dans la section 7.

Aliments et stratégies d'alimentation. Dans chaque expérimentation, les aliments ont été formulés pour être à même teneur en énergie (iso EN) mais avec des teneurs en nutriments (AA, P_{dig}) différents. Deux modèles de DAC, deux Gestal 3G (JYGA Technologies Inc, Québec, Canada) équipés chacun de deux trémies (expérimentation 1) et deux Selfimat (Asserva, Lamballe, France) équipés de quatre trémies (expérimentation 2), ont été utilisés dans les salles de gestation en groupe. Pour l'expérimentation 2, des truies non suivies durant l'essai étaient présentes dans la salle et ont mobilisé une trémie contenant l'aliment standard pour être nourries.

Les truies ont été réparties en bloc de deux animaux sur la base de leur rang de portée, leur PV et ELD à l'insémination au début de l'essai. Chacune des truies de ce bloc était affectée à l'une des stratégies d'alimentation pendant la gestation (PF vs. Témoin) et elle la conservait tout au long de l'expérimentation. Les truies qui ont intégré la bande au cours de l'essai (entrée au deuxième ou troisième cycle de suivi) ont été affectées à l'une des stratégies suivant le même protocole et leurs résultats ont été conservés même si elles n'ont pas réalisé l'ensemble des trois cycles de suivi. Un plan d'alimentation en trois phases a été appliqué pendant la gestation. Pour chaque phase, une quantité fixe d'aliments était allouée pour chaque truie pour répondre à ses besoins énergétiques. Dans l'expérimentation 1, les séparations entre les phases correspondent au 35^{ème} et 85^{ème} jours de gestation. Les truies ont reçu un mélange journalier des deux aliments disponibles (Bas vs. Haut en Lys DIS) pour répondre à leurs besoins individuels en AA. Pour l'expérimentation 2, toutes les truies ont reçu l'aliment standard durant la première phase qui s'est terminée à l'entrée en gestation groupée à 25 jours de gestation. Ensuite, et ce jusqu'à 80 jours de gestation, les truies en alimentation

Témoin ont reçu l'aliment standard tandis que les truies en alimentation PF ont reçu un mélange de deux aliments (Bas vs. Haut en Lys DIS) en fonction de leur besoin en AA. Enfin, de 80 jours de gestation à la mise-bas, un troisième aliment plus riche en P_{dig} et haut en Lys DIS a été utilisé pour le mélange journalier afin ajuster les besoins individuels en P_{dig} de chaque truie. En lactation pour les deux expérimentations, toutes les truies ont reçu le même aliment avec un plan de rationnement progressif pour atteindre un niveau d'alimentation *ad libitum* au cours de la lactation.

Lecture du plan d'alimentation. Le modèle nutritionnel permet d'estimer les besoins pour chaque truie, chaque jour, au début de la gestation. Pour faciliter l'automatisation et le lien entre modèle et automate d'alimentation, un script R a été créé. Il permet de transformer les sorties du modèle en fichier de type .CSV correspondant aux données d'entrée de l'automate. Dans le cadre de l'expérimentation 1, chaque truie est associée à un fichier avec 115 lignes correspondant au pourcentage d'incorporation de chaque aliment pour chaque jour de gestation. Ces documents étaient chargés manuellement dans le système de l'automate en début de gestation. Pour l'expérimentation 2, un fichier .CSV pour chaque jour de gestation contient le pourcentage d'incorporation de chaque aliment pour chaque truie du troupeau. Il a automatiquement été chargé journalièrement au sein de l'automate avec une macro qui envoie un email lorsque la tâche était réalisée avec succès.

Suivi santé au cours de l'essai. Au minimum une fois par semaine durant leur gestation en groupe, les truies ont été observées individuellement au sein du groupe pour évaluer des indicateurs d'état de santé (démarche pour l'évaluation de boiteries, occurrence de bursites sur les quatre membres, état de saleté).

3.3. *In laboratorio* : des matrices non invasives pour le suivi des minéraux et des biomarqueurs de la minéralisation osseuse

L'urine et la salive ont été sélectionnées pour le caractère non-invasif du prélèvement. Ces matrices ont été utilisées dans l'expérimentation 2 pour suivre l'excrétion de P et Ca ainsi qu'un biomarqueur de résorption osseuse (Télopeptide C-terminal du collagène de type I : **CTX**). Les matrices ont été collectées à deux stades distincts : au jour 80 de gestation (avant l'ajustement de l'alimentation sur les minéraux) et au jour 108 de gestation (une semaine avant la mise-bas). La collecte était effectuée le matin entre 8h00 et 10h00 à jeun (dernière ration distribuée à 16h00 la veille). La miction spontanée était collectée dans un pot et la salive à l'aide de 3 cotons (Salivette Cortisol, Sarstedt, Allemagne) maintenus à l'extrémité d'une pince à pansement. Les échantillons étaient centrifugés (2500 tours et 3000 tours pour l'urine et la salive respectivement) pendant 10 min à 4°C, aliquotés dans des cupules puis congelés (-20°C pour l'analyse des minéraux ; -80°C pour l'analyse du biomarqueur) avant analyses.

L'ensemble des analyses de laboratoire ont été effectuées en duplicat à l'UMR PEGASE à Saint-Gilles (35590). Plusieurs protocoles préliminaires ont été mis en place pour valider le protocole final utilisé et la qualité des données obtenues :

Collecte urinaire à l'aide de tampons vaginaux. La collecte de miction spontanée des truies peut être longue et couteuse en main-d'œuvre. Nous avons évalué différents tampons vaginaux (taille et structure) pour prélever l'urine des truies et déterminer si leur composition avait un effet sur les teneurs en minéraux et sur l'analyse des biomarqueurs de la minéralisation osseuse. Un des tampons utilisés avait de valeurs semblables au témoin (*i.e.* collection dans un pot). Ce tampon a été retenu et les résultats de cet essai préliminaire sont disponibles en Annexe D.

Protocole analyse P et Ca d'urine non acidifiée. L'analyse du P urinaire représente une variable de réponse sensible à l'adéquation des apports alimentaires en P et l'utilisation post-absorption du P (Grez-Capdeville et Crenshaw, 2022). D'un point de vue pratique, le ratio Ca/P urinaire obtenu *via* une collecte ponctuelle a une forte corrélation (0,93) avec le ratio obtenu après une collecte urinaire totale sur 24h (Grez-Capdeville et Crenshaw, 2021). Dans cette étude, un ratio urinaire inférieur à 0,5 était considéré comme révélateur d'une alimentation excédentaire en P tandis qu'un ratio supérieur à 1,5 correspondait à un déficit d'apport alimentaire de P. Ces études utilisaient de l'urine acidifiée et analysée par analyse colorimétrique. Nous avons voulu analyser les échantillons d'urine non acidifiée avec un spectromètre à plasma par couplage inductif (5110 ICP-OES, Agilent, USA ; ICP) pour doser le P total et le Ca dans les mêmes conditions. Une procédure a été mise en place pour valider la méthode d'analyse. Les méthodes suivantes ont été utilisées sur les échantillons : minéralisation au four, minéralisation sur banc de sable, ajout d'acide faible, ajout d'acide fort et filtration. La méthode utilisant de l'acide fort a été retenue car minimisant le coefficient de variation du résultat des duplicats. L'ensemble des résultats obtenus et le protocole final retenu et utilisé pour l'analyse dans l'expérimentation 2 sont disponibles en Annexe E.

Corrélation P et Ca urinaire et salivaire en fonction de l'appareil de mesure. Les rejets de P et Ca sont évalués à partir de prélèvements urinaires (Grez-Capdeville et Crenshaw, 2021). La salive est une matrice facilement accessible et échantillonnable rapidement sur un grand nombre d'individus. Nous avons voulu évaluer si les teneurs en minéraux dans la salive étaient corrélées à celle de l'urine et si l'appareil de mesure (ICP vs. Gallery (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)) avait un impact sur les valeurs analysées. Le P et Ca salivaire ne sont pas corrélés à leur teneur dans les urines quel que soit l'appareil de mesure utilisé. Les résultats obtenus sont disponibles en Annexe E.

Contrôle de qualité du CTX urinaire de truie gestante. Une technique non destructive pour prédire la composition corporelle et osseuse de la truie est l'utilisation du DXA (Heurtault et al., 2024). En l'absence de tel appareil, une méthode qualitative de suivi, pour estimer la dynamique osseuse des individus, utilise des biomarqueurs osseux (obtenus dans l'urine ou le sang) quantifiant la dynamique de minéralisation ou de résorption des os. Le CTX est le marqueur de référence pour la résorption osseuse (Shetty et al., 2016). Des kits par méthode immuno-enzymatique ELISA (Urine CrossLaps® CTX-I EIA, Immunodiagnostic Systems Ltd., Bolton, Royaume-Uni) ont été utilisés pour l'analyse. Ces kits ont été développés pour de l'urine humaine. Pour valider son utilisation sur de l'urine de truie, un contrôle qualité a été mis en place. La procédure consistait en un test de dilution pour contrôler la linéarité des résultats dans l'intervalle du kit et un test de récupération pour contrôler l'effet de la matrice en surchargeant avec une quantité variable d'antigènes du kit. Le contrôle qualité a été validé avec succès. Les résultats obtenus sont disponibles dans la section 6.

3.4. Références bibliographiques

- Bikker, P., Blok, M.C., 2017. Phosphorus and calcium requirements of growing pigs and sows, CVB documentation report 59, 72 p. Wageningen Livestock Research, Wageningen, The Netherlands. <https://doi.org/10.18174/424780>
- Dourmad, J.Y., Étienne, M., Noblet, J., Causeur, D., 1997. Prédiction de la composition chimique des truies reproductrices à partir du poids vif et de l'épaisseur de lard dorsal. Journées Recherche Porcine 29, 255-262.
- Dourmad, J.Y., Étienne, M., Valancogne, A., Dubois, S., van Milgen, J., Noblet, J., 2008. InraPorc: a model and decision support tool for the nutrition of sows. Animal Feed Science and Technology 143, 372–386. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.05.019>
- Gaillard, C., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J.Y., 2019. Exploration of individual variability to better predict the nutrient requirements of gestating sows. Journal of Animal Science 97, 4934–4945. <https://doi.org/10.1093/jas/skz320>
- Gaillard, C., Quiniou, N., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J.Y., 2020. Evaluation of a decision support system for precision feeding of gestating sows. Journal of Animal Science 98, skaa255. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa255>
- Greze-Capdeville, M., Crenshaw, T.D., 2022. Estimation of phosphorus requirements of sows based on 24-h urinary phosphorus excretion during gestation and lactation. British Journal of Nutrition 128, 377–388. <https://doi.org/10.1017/S0007114521003421>
- Greze-Capdeville, M., Crenshaw, T.D., 2021. Evaluation of calcium to phosphorus ratio in spot urine samples as a practical method to monitor phosphorus intake adequacy in sows. Journal of Animal Science 99, 1–7. <https://doi.org/10.1093/jas/skab335>
- Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N.J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M.H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J.F., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., Sheppard, K., Reddy, T., Weckesser, W., Abbasi, H., Gohlke, C., Oliphant, T.E., 2020. Array programming with NumPy. Nature 585, 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Heurtault, J., Maïkoff, G., Létourneau-Montminy, M.P., Schlegel, P., 2024. Method: body composition assessment of sows using dual-energy X-ray absorptiometry. Animal - Open Space 3, 100079. <https://doi.org/10.1016/j.anopes.2024.100079>
- Jansen, P., 2025. TIOBE Index. Consulté le 22/04/2025 à <https://www.tiobe.com/tiobe-index/>
- Mitchell, S., O'Sullivan, M., Dunning, I., 2011. PuLP: a linear programming toolkit for python. Department of Engineering Science, the University of Auckland, New Zealand.
- Python Software, 2020. Python, version 3.9. Python Software Foundation, Wilmington, Delaware, USA.
- Quiniou, N., 2019. Modélisation de l'évolution moyenne du poids vif après la mise bas selon l'âge chez des truies croisées Large White x Landrace. Journées Recherche Porcine 51, 123–128.
- Quiniou, N., Boudon, A., Dourmad, J. Y., Moinecourt, M., Priymenko, N., Narcy, A., 2021. Modélisation du besoin en calcium de la truie reproductrice et variation du rapport phosphocalcique des aliments selon le niveau de performance. INRAE Productions Animales 34, 61–78. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.1.4723>
- Shetty, S., Kapoor, N., Bondu, J.D., Thomas, N., Paul, T.V., 2016. Bone turnover markers: emerging tool in the management of osteoporosis. Indian Journal of Endocrinology and Metabolism 20, 846–852. <https://doi.org/10.4103/2230-8210.192914>
- The pandas development team, 2020. Pandas a library providing high-performance, easy-to-use data structures and data analysis tools for the Python programming language. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>
- van Rossum, G., Warsaw, B., Coghlan, A., 2001. PEP 8 – style guide for Python code. Consulté le 22/04/2025 à <https://peps.python.org/pep-0008/>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S.J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K.J., Mayorov, N., Nelson, A.R.J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C.J., Polat, İ., Feng, Y., Moore, E.W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E.A., Harris, C.R., Archibald, A.M., Ribeiro, A.H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., 2020. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. Nature Methods 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

4. Prise en compte de données complémentaires pour améliorer l'estimation des besoins énergétiques individuels

4.1. Poids journalier

Les résultats de cette partie sont issus d'un article de six pages associé à une présentation orale aux 57^{ème} Journées de la Recherche Porcine en février 2025 (Ribas, C., Gaillard, C., Quiniou, N., 2025. Prendre en compte le poids en temps réel des truies gestantes pour l'estimation des besoins énergétiques dans le cadre d'une alimentation sur mesure. 57^{ème} Journées de la Recherche Porcine, Saint-Malo, France, 173-178). Les données des expérimentations 1 et 2 obtenues avec les balances connectées ont été utilisées pour cette section.

Résumé :

Pendant la gestation, la ration apportée aux truies est modulée afin d'atteindre des objectifs de poids et d'épaisseur de lard dorsal (**ELD**) à la mise-bas. Dans le cadre d'une alimentation sur mesure individualisée journalièrement, les modèles nutritionnels intègrent ces objectifs, des mesures individuelles de poids et d'ELD à l'insémination, ainsi que des projections dynamiques du poids jusqu'à la mise-bas. Des balances connectées permettent de peser individuellement et automatiquement les truies tous les jours. L'objectif de cette étude est de comparer le poids mesuré en temps réel (P_R) aux valeurs modélisées (P_M) et d'évaluer l'intérêt de prendre en compte P_R dans l'estimation des besoins énergétiques des truies gestantes. Un jeu de 138 288 P_R est établi à partir de 242 gestations issues de deux troupeaux conduits avec des plans d'alimentation individualisés. Le P_R moyen journalier individuel est calculé après exclusion des données erronées, les P_R manquant certains jours sont estimés par la méthode de Holt-Winters. Ces valeurs sont ensuite utilisées en entrées journalières dans le modèle nutritionnel. Le P_R est plus élevé pendant les deux premiers mois de gestation et plus faible que P_M pendant le dernier mois ($P < 0,05$). Avec des objectifs théoriques identiques à la mise-bas, les besoins énergétiques estimés sont plus faibles ($P < 0,05$) quand P_R est pris en compte, l'écart représente moins de 1 kg d'aliment sur la gestation. Quand l'alimentation sur mesure est déjà mise en œuvre sur la base de P_M , le gain de précision apporté par le P_R pour piloter les rations apparaît relativement limité. Les perspectives sont plus nombreuses dans le cas d'un réajustement des objectifs au cours de la gestation à partir du P_R avec l'ajout d'un ELD_R pour une réévaluation périodique des besoins dans le but d'atteindre un troupeau plus homogène à la mise-bas.

Introduction

Avec la mise en place du logement en groupe des truies pendant la gestation, de nouveaux systèmes d'alimentation ont été développés pour rationner les animaux de manière individuelle. Cette conduite est une première étape vers l'alimentation sur mesure qui consiste à adapter individuellement ainsi que quotidiennement les apports d'énergie et des autres nutriments aux besoins (Pomar *et al.*, 2009). Chaque truie est ainsi prise en compte de manière individuelle au regard de ses propres caractéristiques et non selon son rang de portée uniquement ou comme un élément d'une population dont on ferait fi de l'hétérogénéité. Le développement de modèles d'estimation des besoins nutritionnels a permis d'améliorer l'adéquation des apports aux besoins qui évoluent parallèlement aux efforts de la sélection génétique pour des truies toujours plus productives (Durmad *et al.*, 2015). Ces modèles utilisent des objectifs d'état à la mise-bas (poids vif, épaisseur de lard dorsal (**ELD**), poids de portée) pour estimer les besoins et adapter en conséquence les apports alimentaires à chaque truie. Cependant, on constate une variabilité à la mise-bas entre les objectifs pris en compte dans ces modèles et les valeurs observées, avec par exemple des écart-types compris entre 12 et 17 kg pour le poids vif à la mise-bas et pouvant atteindre 5 mm pour l'ELD selon la bande (Quiniou, 2021). Une meilleure prise en compte de la variabilité au sein du troupeau pourrait être réalisée pour affiner l'estimation des besoins via l'utilisation du poids de la truie, *i.e.* en temps réel (P_R) plutôt que la valeur théorique modélisée (P_M) au cours de la gestation (Quiniou, 2021). En effet, sous-estimer le poids d'une truie conduit à sous-estimer ses besoins d'entretien. Dans ce cas, pour un apport donné en nutriments, la part disponible pour la production est de fait inférieure à ce qui est prévu. Cela accentue le risque de truies considérées comme trop maigres qui mettent-bas des porcelets plus légers et qui produisent moins de lait malgré une consommation plus élevée en lactation (Quiniou, 2016). A l'inverse, surestimer le poids et donc les besoins d'entretien conduit à sur-alimenter la truie, ce qui accentue le risque qu'elle soit trop grasse à la mise-bas, avec un risque accru de mise-bas difficile, un niveau de consommation en maternité inférieur aux autres truies ce qui conduit à une mobilisation des réserves plus élevée avec des conséquences négatives sur les performances de reproduction après sevrage (Zhou *et al.*, 2018).

Chez le porc en croissance, la prise en compte du poids et de la consommation alimentaire en temps réel dans l'estimation des besoins a permis de réduire la quantité d'azote ingérée et rejetée de 14 % à niveau de performances égal (Brossard *et al.*, 2020). A notre connaissance, l'intégration du poids en temps réel dans l'estimation des besoins des truies en gestation n'a pas encore été explorée.

Notre étude a deux objectifs : comparer l'évolution du P_R en comparaison du P_M utilisé dans l'estimation des besoins nutritionnels des truies gestantes et évaluer les conséquences de la prise en compte du P_R sur l'estimation des besoins journaliers.

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental

Deux jeux de données ont été obtenus à partir de truies croisées Large White x Landrace suivies durant la gestation et provenant de deux élevages expérimentaux. Le premier jeu de données rassemble 85041 pesées provenant de 102 gestations issues de truies de l'Unité Expérimentale Physiologie et Phénotypage des Porcs (UE3P, 35590 Saint-Gilles, France, doi: 10.15454/1.5573932732039927E12) et le deuxième regroupe 53247 pesées issues de 140 gestations de truies de l'élevage CIRI de l'IFIP (35850 Romillé, France). Dans les deux élevages, les truies étaient nourries à l'aide de distributeurs automatiques de concentrés (**DAC**) permettant le mélange de plusieurs aliments. L'apport d'aliment était ajusté individuellement aux besoins des truies estimés à l'aide d'un modèle nutritionnel pour les truies gestantes (Gaillard et al., 2019). Ce modèle utilise les caractéristiques d'âge, de poids vif et d'ELD à l'insémination ainsi que les objectifs définis à la mise-bas sur la base de données historiques collectées sur chaque site. Ainsi, le P_M de chaque truie est modélisé chaque jour pour atteindre un objectif de poids vif après mise-bas qui dépend de l'âge. L'objectif d'ELD à la mise-bas est identique pour toutes les truies. L'objectif de poids de portée dépend du rang de portée.

Acquisition du poids vif individuel journalier

Collecte des données

Les truies sont élevées en groupe entre le troisième jour (j) de gestation pour les truies UE3P ou le vingt-cinquième jour de gestation pour les truies CIRI et l'entrée en maternité vers 108 j de gestation. A l'UE3P, elles sont élevées par groupe de 20 individus. Au CIRI, l'étude porte sur des bandes de 24 truies qui entrent dans une case conduite en groupe dynamique pouvant accueillir jusqu'à 72 animaux. Dans les deux cas, chaque case est équipée de deux balances automatiques connectées (Asserva, précision ± 1 kg) situées devant les abreuvoirs (UE3P) ou en sortie de chacune des deux stations d'alimentation (CIRI). Chaque fois qu'une truie se présente dans la bascule, elle est identifiée par sa puce radio fréquence auriculaire. La mesure du poids vif est réalisée à l'aide de jauges de contraintes, dont le signal est converti en kg à l'aide de l'algorithme du constructeur. La pesée est réalisée sur animal statique à l'UE3P et à la volée au CIRI. Après la mise-bas au CIRI uniquement, les truies sont pesées individuellement à l'aide d'une balance mobile (Maréchalle, précision $\pm 0,2$ kg). L'addition de la

valeur obtenue (poids net) et du poids du conceptus, supposé proportionnel au poids de portée d'après Dourmad et al. (1997), est utilisé comme poids brut final (truie pleine) avant mise-bas (P_{MB}).

Nettoyage de la base de données

La collecte de données de manière automatique peut entraîner l'enregistrement de valeurs erronées. C'est par exemple le cas si deux truies se trouvent ensemble sur la balance. Il est donc nécessaire de nettoyer la base de données brutes. Cela a été réalisé en deux étapes successives qui consistent à se référer à la variabilité intra-journalière dans un premier temps et à la variabilité inter-journalière dans un second temps. La première a consisté, pour une truie donnée, à retirer les mesures qui s'éloignent de $\pm 5\%$ de la moyenne journalière pour retirer les valeurs considérées comme des erreurs de mesure. Cette étape est ensuite répétée une fois pour exclure les données qui diffèrent de $\pm 5\%$ de la nouvelle moyenne. La deuxième étape a consisté en l'utilisation d'une moyenne glissante sur 3 jours pour vérifier la cohérence inter-journalière des poids pour chaque animal. Si le poids journalier s'écartait de plus de 20 kg de la moyenne glissante des 3 jours précédents, la donnée associée était exclue de la base. Le détail des deux jeux de données utilisés est disponible dans le Tableau 4.1.

Les données de 12 truies de l'UE3P et 23 truies du CIRI sont retirées de la base de données étudiée, soit parce qu'elles étaient vides (UE3P : 6, CIRI : 5 truies), réformées (UE3P : 5, CIRI : 17 truies) ou morte (une dans chaque élevage).

Tableau 4.1 – Caractéristique des jeux de données

Site de collecte des données	UE3P	CIRI
<i>Nombre de gestations suivies</i>	102	140
<i>Stade de gestation étudié, j</i>	3 à 106	25 à 106
<i>Nombre de données, n</i>		
<i>Instantanées</i>	85041	53247
<i>Moyennes journalières</i>		
<i>Avant nettoyage</i>	9895	9645
<i>Après nettoyage</i>	9850	9093

Prédiction du poids lorsque la donnée est manquante

Avant la mise en groupe des truies, qui intervient en moyenne 2 j et 24 j après l'insémination artificielle, respectivement à l'UE3P et au CIRI, le P_R n'est pas disponible. Sur cette période, le P_M est utilisé pour estimer les besoins journaliers. En cas de P_R manquant pendant les semaines de gestation en groupe, la donnée est prédite à partir des valeurs acquises les jours qui précèdent. La méthode de prédiction retenue est celle du double lissage exponentiel de

Holt-Winters (HW) déjà utilisée pour prédire le poids journalier de porcs en croissance par Quiniou *et al.* (2017). Les données des 8 jours précédents le jour pour lequel le poids est manquant sont utilisées, avec un critère de lissage α de 0,6 et un critère de tendance β déterminé en minimisant l'erreur de prédiction au carré. La dernière semaine de gestation, les truies sont en maternité où elles ne sont pas pesées. A ce stade, l'historique de données des 30 derniers jours est utilisé.

Estimation des besoins journaliers en prenant en compte le poids réel journalier (P_R)

Le modèle nutritionnel utilisé pour estimer les besoins de chaque truie prédit chaque jour le poids brut de la truie (*i.e.*, poids net de la truie et poids du conceptus (Gaillard *et al.*, 2019)), en se fondant sur une représentation par compartiments (énergétique, protéique et lipidique) dont l'évolution dépend des objectifs de performances fixés à la mise-bas et des apports nutritionnels réalisés.

Le P_R est intégré au modèle nutritionnel en tant que donnée d'entrée. Il remplace le P_M de la truie et de son conceptus. Plusieurs stratégies sont appliquées pour estimer les besoins. Le scénario 1 conserve les objectifs de poids de portée théoriques. Le scénario 2 prend en compte le poids réel de la portée à la naissance. Enfin, le scénario 3, mis en œuvre seulement à partir des données CIRI, utilise le P_{MB} comme objectif de poids. Le cumul des besoins journaliers sur l'ensemble de la gestation est calculé pour chaque scénario.

Calculs et analyses statistiques

Le traitement des données et les analyses statistiques sont réalisés à l'aide du logiciel R v.4.2.2. La fonction HoltWinters du package stats est utilisée pour la prédiction du poids si nécessaire. Le test de Shapiro-Wilk est utilisé pour tester la normalité de la différence entre P_M et P_R . Dans le cas d'une distribution normale, à partir du package stats, un test de Student pour données appariées est utilisé pour tester la méthode d'évaluation du poids. Dans le cas contraire, un test des rangs signés de Wilcoxon est utilisé. La racine de l'erreur quadratique moyenne (**RMSE**) est utilisée pour quantifier la différence entre P_R et P_M . Un modèle linéaire mixte (fonction lme du package nlme) est utilisé pour tester l'effet du type de poids sur l'estimation des besoins énergétiques cumulés sur la gestation. Le scénario est utilisé comme effet fixe et le rang de portée comme covariable. La truie est intégrée comme effet aléatoire car dans le jeu de données, certaines truies sont suivies sur plusieurs gestations. L'unité expérimentale est la truie gestante. Le coefficient de Spearman, avec la fonction cor.test, est utilisé pour corrélérer les estimations de poids le jour de la mise-bas de la truie (P_M ou P_R) aux valeurs observées (P_{MB}) pour l'élevage CIRI. L'écart-type résiduel (**ETR**) est calculée d'après

Gu *et al.* (1992). Les différences sont considérées significatives quand la P -value est inférieure ou égale à 0,05.

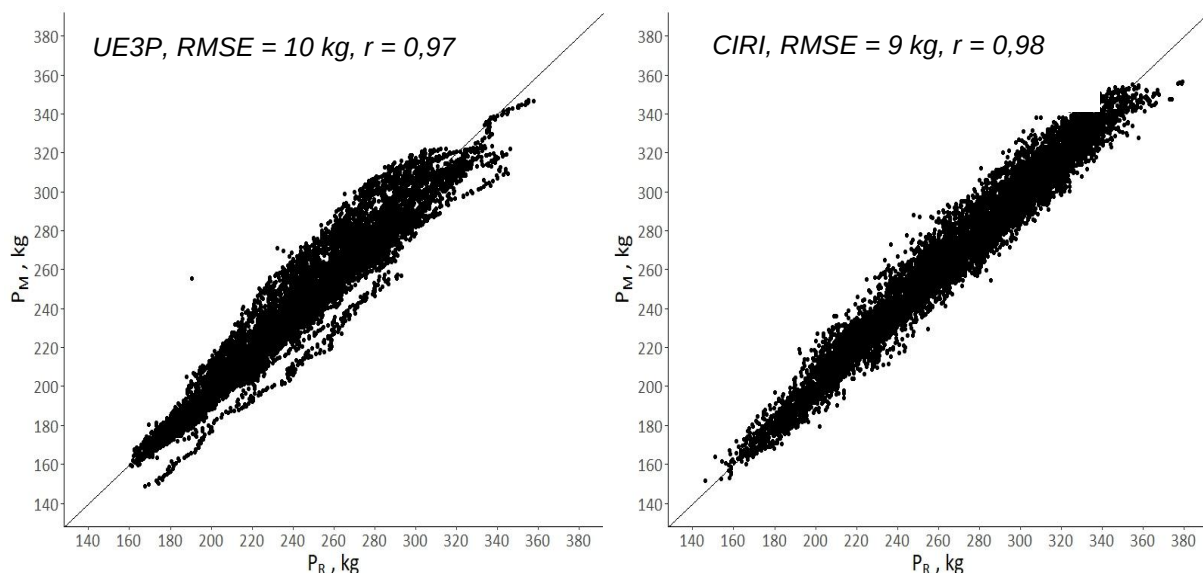
Résultats

Comparaison entre P_R et P_M

Après nettoyage des données, le RMSE est de 10 kg et de 9 kg, respectivement pour les truies UE3P et CIRI (Figure 4.1).

L'analyse des écarts selon le stade de gestation indique que le modèle sous-estime le poids (P_M inférieur à P_R , $P < 0,001$, Tableau 4.2) sur les 2 premiers mois de gestation (UE3P : entre J3 et J61, CIRI : entre J28 et J59) tandis que c'est l'inverse sur le dernier mois de gestation (UE3P : entre J70 et J106, CIRI : entre J68 et J106) ($P < 0,001$). Le point d'inflexion se situe à 62 et 60 j de gestation, respectivement pour les truies UE3P et CIRI. À partir de ce point d'inflexion, et pendant les 8 jours qui suivent, les poids modélisés et mesurés ne sont pas significativement différents pour les deux élevages ($P > 0,05$).

Au niveau individuel, l'évolution du P_M et du P_R de six truies de l'élevage CIRI est représentée dans la Figure 4.2. Au cours de la gestation, l'évolution du P_R n'est pas monotone contrairement au P_M car nous observons des variations d'un jour à l'autre pour une truie donnée.



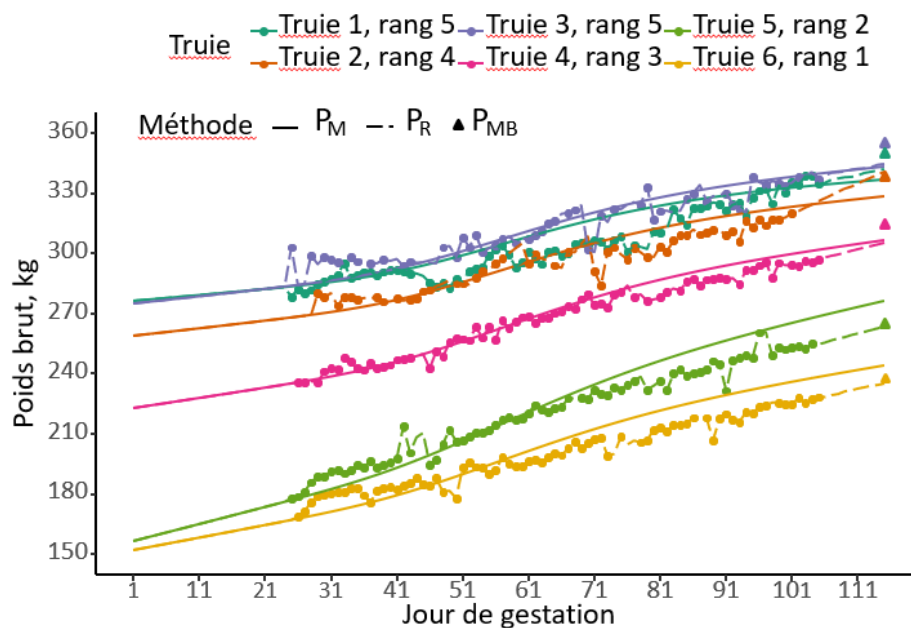
Note : Dans chaque graphique, la droite correspond à la bissectrice ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne ; r : coefficient de Pearson.

Figure 4.1 : Poids journalier en temps réel (P_R) et prédiction (P_M) selon l'élevage (UE3P ou CIRI)

Tableau 4.2 – Poids (kg) modélisé (P_M) et en temps réel (P_R) moyen selon le stade de gestation dans les élevages étudiés

	P_M	P_R	$P\text{-VALUE}^1$
UE3P			
J 3-61	229	233	< 0,001
J 62-69	256	255	0,82
J 70-106	272	269	< 0,001
J 107-115	284	292	< 0,001
Gestation entière	247	248	< 0,001
CIRI			
J 28-59	251	255	< 0,001
J 60-67	272	272	0,68
J 68-106	293	288	< 0,001
J 107-115	307	308	0,56
Gestation entière	274	273	< 0,001

¹Un test de Student pour données appariées est utilisé en cas de distribution normale, sinon un test des rangs signés de Wilcoxon.



Note : La présence d'un point pour un jour donné indique l'utilisation d'une donnée obtenue avec une balance connectée, son absence indique une donnée manquante remplacée par une valeur prédite. Le triangle final à 115 jours de gestation correspond au poids brut de la truie après mise-bas calculé à partir des mesures du poids net de la truie et de la portée (P_{MB}).

Figure 4.2 : Exemples d'évolution individuelle du poids brut (truie et conceptus) au cours de la gestation pour six truies du CIRI selon la méthode de prise en compte du poids journalier, i.e. modélisé (P_M) ou pesées journalières (P_R)

Pour l'ensemble des données, au regard des jours où il est possible de collecter P_R , il manque en moyenne 10,9 et 17,6 poids moyens journaliers par truie pour UE3P et CIRI respectivement et qui sont donc prédit avec la méthode HW. Ces données manquantes sont très variables au sein du troupeau avec un écart-type sur les poids moyens journaliers de 15,1 et 8,9 pour UE3P et CIRI respectivement. Au sein du CIRI, la connaissance du P_{MB} permet de comparer les poids obtenus le jour de la mise-bas avec les deux méthodes. En moyenne, le P_R prédit à la mise-bas avec la méthode HW est proche de P_{MB} avec une différence de -0,2 kg comparé au P_M qui sous-estime le poids de 2,5 kg. En revanche, le RMSE de P_R par rapport à P_{MB} est deux fois plus élevé que celui de P_M par rapport à P_{MB} (respectivement 22 et 12 kg). Ainsi, nous obtenons des corrélations de Spearman élevées pour les deux méthodes mais avec une corrélation supérieure pour P_M ($r = 0,97$) par rapport à P_R ($r = 0,90$). En moyenne, les individus dont le P_R s'écarte de plus de 10 kg du P_{MB} ont significativement plus de jours sans données lors des 8 derniers jours de collecte de données qui précèdent l'entrée en maternité, *i.e.* 3,3 vs. 2,5 j ($P = 0,02$).

Estimation des besoins énergétiques

Le Tableau 4.3 présente la quantité d'énergie métabolisable (**EM**) à apporter pour couvrir le besoin sur l'ensemble de la gestation selon le scénario retenu pour les estimer avec le modèle nutritionnel. Avec les scénarios 1 et 2, que ce soit pour l'élevage UE3P ou l'élevage CIRI, la méthode de prise en compte du poids influence significativement le besoin estimé ($P < 0,001$ et $P = 0,01$, respectivement pour l'UE3P et le CIRI). La différence est cependant inférieure à 10 MJ d'EM. La différence entre le scénario 1 et 2 (qui prend en compte le poids de portée réel) est inférieur à 10 MJ EM pour les truies du CIRI ($P < 0,001$), mais atteint 27 MJ EM ($P < 0,001$) pour celles de l'UE3P.

Avec le scénario 3 (la prise en compte du P_{MB} comme objectif), le besoin énergétique est significativement différent ($P < 0,001$) comparativement au P_M ou au P_R utilisés jusqu'alors avec une différence numérique moyenne de 379 MJ représentant 31,5 kg de différence sur une gestation soit 275 g d'aliment en plus par jour de gestation avec P_{MB} . La méthode de prise en compte du poids où l'utilisation de la portée réelle ou estimé n'a pas d'effet sur l'estimation du poids et de l'ELD modélisé pour le CIRI dans les scénarios 1 et 2 ($P > 0,10$).

Pour ces mêmes scénarios à l'UE3P, cette différence est significative pour le poids et l'ELD ($P < 0,001$) mais ne représente numériquement que de faibles différences de 2 kg et 1 mm en plus avec P_M par rapport à P_R . Pour le CIRI, l'ELD mesuré est significativement différent de l'ELD modélisé avec une surestimation de 1,9 mm avec P_M ($P < 0,001$) tandis que le P_R est sous-estimé par rapport au P_{MB} avec une différence de 7 kg ($P < 0,001$) dans le cadre du scénario 3.

Discussion

Variabilité et évolution du P_R

Dans notre étude à l'échelle d'une gestation, le P_M et le P_R étaient numériquement très proches avec une dynamique un peu différente au cours de la gestation avec P_M qui augmente moins rapidement que P_R sur les deux premiers mois de gestation et inversement pour le dernier mois. Le P_M suit l'évolution des compartiments corporels modélisés pour atteindre l'objectif de poids retenu à la mise-bas. Ce poids dépend de l'âge et suit un modèle de Weibull qui est ajusté grâce aux données historiques du troupeau (Quiniou, 2019). Le P_R évolue de façon moins régulière et sous la dépendance de plusieurs facteurs. Selon le moment de la journée où la truie passe sur la balance, la miction ou la défécation peut avoir eu lieu ou non. Cela peut entraîner de la variabilité sur le résultat de la pesée, sachant qu'une truie peut uriner jusqu'à 17 L d'urine et déféquer jusqu'à 9 kg de fèces par jour (Robert *et al.*, 2000). A ceci s'ajoute les difficultés connues dans l'analyse de poids obtenus de manière automatique, avec la nécessité de nettoyer les données collectées (Thomas *et al.*, 2018) ainsi que la prédiction des poids lorsqu'ils ne sont pas disponibles (Brossard *et al.*, 2017). Nous avons fait le choix d'utiliser la méthode HW pour prédire les poids car elle a déjà été utilisée sur des porcs en croissance dont l'accès à l'aliment était restreint (Quiniou *et al.*, 2017). Cette méthode a été efficace pour combler les données ponctuellement manquantes mais est moins adéquate quand un nombre important de jours consécutifs ne sont pas disponibles comme la semaine précédant la mise-bas pendant laquelle le P_R n'est plus mesuré.

Estimation des besoins énergétiques avec le P_R

Le fait de prendre en compte le P_R en remplacement du P_M tout en conservant le même objectif de poids à la mise-bas n'a que peu d'effets sur l'estimation des besoins énergétiques. Les différences numériques constatées sont inférieures à 10 MJ EM soit moins de 10 g de différence d'apport alimentaire par jour de gestation. Pour l'élevage UE3P, les performances des bandes suivies étaient supérieures à l'historique du troupeau ce qui a entraîné une sous-estimation du poids de portée de 1,5 kg par rapport au poids de portée réel. Malgré cela, la différence entre le scénario 1 et 2 ne représentent que 27 MJ d'EM soit environ 20 g d'aliment supplémentaires à apporter par jour en moyenne sur la gestation entière. En pratique, les DAC peuvent atteindre une précision de l'ordre de 30 g dans l'apport des doses alimentaires (Marcon *et al.*, 2015). Ainsi aux vues de cette précision et des différences observées, utiliser le P_R en gardant les mêmes objectifs de poids de mise-bas n'apporte pas de plus-value par rapport au P_M . Connaître en amont de la mise-bas, le poids de portée réelle n'apporte pas de différences notables sur l'estimation des besoins moyen sur l'intégralité de la gestation par rapport à l'historique de performances du troupeau. A contrario, en prenant en compte la pesée

après mise-bas comme objectif de poids brut final, la différence représente pratiquement 300 g d'aliment en plus par jour en moyenne mais avec une grande disparité entre individus. Le P_R permet en moyenne d'être plus proche des valeurs mesurées à la mise-bas (P_{MB}) comparativement à P_M mais avec une variabilité deux fois plus élevée due en partie à la méthode HW ce qui n'est pas négligeable et restreint donc son utilisation. Le caractère exponentiel de la méthode est exacerbé lorsqu'un nombre important de données manque les jours qui précèdent la prédiction.

Tableau 4.3 – Besoin énergétique total de gestation estimé selon trois scénarios de définition des objectifs de fin de gestation et deux méthodes de prise en compte du poids journalier (P_M , P_R)

Scénario	METHODE		STATISTIQUES ¹		
	P_M	P_R	ETR	METHODE	PORTEE
UE3P					
Besoin énergétique estimé, MJ EM/gestation					
Scénario 1 : avec poids de portée à la naissance estimé	4389	4380	8,4	< 0,001	-
Scénario 2 : avec poids de portée à la naissance réel	4416	4407	8,4	< 0,001	< 0,001
Poids modélisé de la truie après mise-bas, kg					
Scénario 1 : avec poids de portée à la naissance estimé	256	254	1,1	< 0,001	-
Scénario 2 : avec poids de portée à la naissance réel	257	255	1,1	< 0,001	0,14
Epaisseur de lard dorsal modélisée à la mise-bas, mm					
Scénario 1 : avec poids de portée à la naissance estimé	19,9	18,9	0,56	< 0,001	-
Scénario 2 : avec poids de portée à la naissance réel	19,8	18,9	0,56	< 0,001	0,14
CIRI					
Besoin énergétique estimé, MJ EM/gestation					
Scénario 1 : avec poids de portée à la naissance estimé	4976	4974	3,3	0,01	-
Scénario 2 : avec poids de portée à la naissance réel	4981	4980	3,3	0,01	< 0,001
Scénario 3 : avec poids de portée à la naissance et de truie réels	4981	5359	188	< 0,001	0,052
Poids modélisé de la truie après mise-bas, kg					
Scénario 1 : avec poids de portée à la naissance estimé	278	279	0,6	0,10	-
Scénario 2 : avec poids de portée à la naissance réel	278	279	0,6	0,10	< 0,001
Scénario 3 : avec poids de portée à la naissance et de truie réels	278	286	9,1	< 0,001	0,542
Epaisseur de lard dorsal modélisée à la mise-bas, mm					
Scénario 1 : avec poids de portée à la naissance estimé	21,8	21,9	0,31	0,14	-
Scénario 2 : avec poids de portée à la naissance réel	21,8	21,9	0,31	0,14	0,45
Scénario 3 : avec poids de portée à la naissance et de truie réels	21,8	19,9	2,9	< 0,001	0,315

¹Modèle mixte linéaire prenant en compte la méthode d'estimation du poids et le poids de portée comme effets fixes, le rang de portée en covariable et la truie en effet aléatoire (P_M : poids brut de la truie modélisé ; P_R : poids brut journalier obtenu avec des balances connectées).

Composition corporelle « optimale »

Une composition corporelle optimale de l'animal à la mise-bas correspondrait à des valeurs de poids et d'ELD associés à un âge donné conduisant à une mise-bas qui se déroule bien et à des performances de lactation maximisées sans compromettre la reproduction après sevrage. Avec la sélection génétique pour des porcs à l'engrais plus maigres et plus efficaces, les truies sont devenues de plus en plus lourdes. D'un point de vue économique, un poids à maturité plus élevé nécessite plus d'aliments pour couvrir le besoin d'entretien. Il est possible de sélectionner le poids à maturité des truies car ce caractère est fortement héritable mais cela pourrait affecter négativement d'autres caractères d'intérêt tel que le poids de portée si les corrélations génétiques ne sont pas analysées (Bergsma *et al.*, 2024). La composition corporelle des truies a évolué avec la sélection génétique vers moins de réserves lipidiques pour un poids donné (Dourmad *et al.*, 2021). Ainsi, il semblerait intéressant de suivre le P_R en même temps qu'un indicateur des réserves lipidiques en temps réel (ELD_R). Chez les bovins, un projet permettant l'analyse d'images 3D permet de phénotyper en routine les caractéristiques de poids et de réserves corporelles des animaux (Le Cozler *et al.*, 2019). Pour le porc, les caméras dont l'utilisation se développe en élevage ou des robots de mesure de l'ELD tel que Scanpig pourraient être associés aux données des balances connectées pour obtenir ces informations (Xie *et al.*, 2024). Des algorithmes entraînés pourraient ensuite transformer ces données en informations indicatives de la composition corporelle individuelle au niveau journalier pour piloter plus finement les apports nutritionnels.

Conclusion

Au regard des résultats obtenus, le gain de précision apporté par le P_R pour piloter les rations apparaît relativement limité lorsqu'une alimentation sur mesure est déjà mise en place sur la base des caractéristiques des truies en début de gestation. En revanche, utiliser le P_R pour réajuster l'objectif de poids semble être une voie prometteuse pour réduire la variabilité d'état corporel au moment de la mise-bas. Augmenter la précision des balances et réduire le nombre de valeurs erronées semblent compromis avec les outils et méthodes utilisés actuellement. L'imagerie 2D ou 3D pourrait permettre de gagner en précision et répondre à l'enjeu d'obtenir un P_R individuel associé à un ELD_R pour avoir des troupeaux de truie plus homogènes.

Remerciements

Ce projet est financé par INRAE et l'IFIP dans le cadre de l'UMT Digiporc, à travers la bourse de thèse de Clément RIBAS. La phase expérimentale pour les truies du CIRI a été financée par le projet SOMOVE (N°7376619) dans le cadre de l'appel à projets CASDAR Connaissances 2022. Les auteurs remercient les équipes techniques des deux élevages expérimentaux pour

les soins et suivi des animaux ainsi que l'entretien du matériel connecté lors du déroulement de l'étude.

Références bibliographiques

- Bergsma R., Lei H., Yang C., Knol E.F., 2024. Sow weight development: A pragmatic approach to crossbred and selection populations. *J. Anim. Sci.*, 102, 45-46.
- Brossard L., Marcon M., Dourmad J. Y., van Milgen J.J., Pomar J., Lopez V., Quiniou N., 2020. Application d'un programme d'alimentation de précision chez le porc en croissance alimenté à volonté: effet sur les performances et l'utilisation des nutriments. *Journées Rech. Porcine*, 52, 111-112.
- Brossard L., Taoussi I., Van Milgen J., Dourmad J.Y., 2017. Selection of methods to analyse body weight and feed intake data used as inputs for nutritional models and precision feeding in pigs. *Proc. of 8th European Conference on Precision Livestock Farming*, 574-583. Nantes, France.
- Dourmad J.Y., Étienne M., Noblet J., Causeur D., 1997. Prédiction de la composition chimique des truies reproductrices à partir du poids vif et de l'épaisseur de lard dorsal. *Journées Rech. Porcine*, 29, 255-262.
- Dourmad J. Y., Gauthier R., Gaillard C., 2021. Évolution des concepts nutritionnels et des méthodes d'alimentation des truies reproductrices : historique et perspectives. *INRAE Prod. Anim.*, 34, 111-126.
- Dourmad J.Y., Milgen J. van, Valancogne A., Dubois S., Brossard L., Noblet J., 2015. Modelling nutrient utilization in sows: a way towards the optimization of nutritional supplies. In : *CABI Books (Eds), Nutritional modelling for pigs and poultry*, 50-61. Wallingford, UK.
- Gaillard C., Gauthier R., Cloutier L., Dourmad J. Y., 2019. Exploration of individual variability to better predict the nutrient requirements of gestating sows. *J. Anim. Sci.*, 97, 4934-4945.
- Gu Y., Schinckel A.P., Martin T.G., 1992. Growth, development, and carcass composition in five genotypes of swine. *J. Anim. Sci.*, 70, 1719-1729.
- Pomar C., Hauschild L., Zhang G.-H., Pomar J., Lovatto P.A., 2009. Applying precision feeding techniques in growing-finishing pig operations. *R. Bras. Zootec.*, 38, 226-237.
- Le Cozler Y., Allain C., Caillot A., Delouard J.M., Delattre L., Luginbuhl T., Faverdin P., 2019. High-precision scanning system for complete 3D cow body shape imaging and analysis of morphological traits. *Comput. Electron. Agric.*, 157, 447-453.
- Marcon M., Brossard L., Quiniou N., 2015. Precision feeding based on individual daily body weight of group-housed pigs with an automatic feeder developed to allow for restricting feed allowance. *Proc. of 7th European Conference on Precision Livestock Farming*, 592-601. Milan, Italie.
- 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 Rech. Porcine*, 48, 207-212.
- Quiniou N., 2019. Modélisation de l'évolution moyenne du poids vif après la mise bas selon l'âge chez des truies croisées Large White x Landrace. *Journées Rech. Porcine*, 51, 123-128.
- Quiniou N., 2021. Results of 15 years of precision feeding of hyper prolific gestating sows. *Animals*, 11, 1-13.
- Quiniou N., Brossard L., Marcon M., 2017. Assessment of the dynamic growth of the fattening pigs from body weight measured daily and automatically to elaborate precision feeding strategies. *Proc. of 8th European Conference on Precision Livestock Farming*, 593-602. Nantes, France.
- Robert S., Farmer C., Rushen J., 2000. Manure production of first-litter sows fed a high-fibre diet during gestation. *Can. J. Anim. Sci.*, 80, 737-739.
- Thomas L.L., Gonçalves M.A., Vier C.M., Goodband R.D., Tokach M.D., Woodworth J.C., DeRouchey J.M., 2018. Lessons learned from managing electronic sow feeders and collecting weights of gestating sows housed on a large commercial farm. *J. Swine Health Prod.*, 26, 270-275.
- Xie C., Cang Y., Lou X., Xiao H., Xu X., Li X., Zhou W., 2024. A novel approach based on a modified mask R-CNN for the weight prediction of live pigs. *Artif. Intell. Agric.*, 12, 19-28.
- Zhou Y., Xu T., Cai A., Wu Y., Wei H., Jiang S., Peng J., 2018. Excessive backfat of sows at 109 d of gestation induces lipotoxic placental environment and is associated with declining reproductive performance. *J. Anim. Sci.*, 96, 250-257.

4.2. Activité physique

Les données d'accéléromètres issues de la première gestation de l'expérimentation 1 ont été utilisées pour cette section. La caractérisation de l'activité physique au cours de la gestation a fait l'objet d'un stage master 2 que j'ai co-encadré (Desmet, 2025). Ce travail a également été valorisé à travers un article de deux pages et un poster pour les Journées de la Recherche Porcine 2026.

Résumé :

L'activité physique est une composante du besoin énergétique dans les modèles nutritionnels du porc. Pour les truies, elle a été établie par défaut à 240 minutes debout pour l'ensemble du troupeau à partir de valeurs obtenues chez des truies logées en stalles. La mise en groupe des truies permet une plus grande diversité d'activités telles que le mouvement et les interactions sociales qui devraient entraîner une augmentation de la dépense énergétique liée à l'activité physique. L'objectif de cette étude est de quantifier l'activité physique individuelle grâce à des données d'accéléromètres et de calculer le besoin énergétique correspondant. Elle comprend 16 truies gestantes suivies quotidiennement du 5^{ème} au 109^{ème} jour de gestation. Les truies en gestation restent debout 237 ± 73 min/j (moyenne $\pm$ écart-type) et se déplacent pendant 99 ± 33 min/j. Prendre en compte l'activité physique individuelle augmente de 8 % avec une vitesse de marche lente (1,5 km/h) et de 12 % avec une vitesse de marche rapide (2,75 km/h) l'apport alimentaire à réaliser au troupeau sur une gestation (P -value < 0,001). L'activité physique est hautement variable entre individus et la prise en compte de l'activité individuelle présente un ratio de 7 entre le besoin énergétique associé à la plus faible activité et celle la plus élevée. Prendre en compte l'activité physique individuelle et journalière dans les modèles nutritionnels affinerait l'estimation du besoin énergétique au cours de la gestation de la truie.

Introduction

Les modèles nutritionnels combinent aux besoins d'entretien de la truie gestante une activité physique où la truie est supposée rester debout pendant 4 heures de temps par jour (Dourmad et al., 2008). Cette valeur a été obtenue à partir de truies logées en stalle (Noblet et al., 1993). Avec la directive européenne 2008/120/EC et sa mise en application en 2013 sur le territoire français, les truies gestantes doivent être logées en groupe à partir de la 4^{ème} semaine qui suit l'insémination et jusqu'à une semaine avant la date de mise-bas prévue (Council of the European Union, 2008). Les conditions de logement sont l'un des facteurs qui influencent le temps dédié à l'activité physique pour les truies (Gaillard et al., 2021). Le logement en groupe

augmente les interactions sociales entre truies. La surface disponible pour se déplacer étant plus grande, cela accroît les distances parcourues par les truies (Bertin et Ramonet, 2015). Pour prendre en compte cette hausse d'activité et ses conséquences sur l'utilisation de l'énergie, un apport d'aliment supplémentaire moyen au groupe (compris entre 300 et 500 g/j) et fondé empiriquement sur l'état corporel des truies du troupeau est utilisé en élevage commercial (Theil et al., 2023). Or, l'activité physique est fortement variable entre les individus (Noblet et al., 1993). Dans l'objectif d'améliorer l'individualisation de l'apport énergétique, un accéléromètre peut être placé sur l'oreille de l'animal. Il permet de caractériser individuellement et de manière précise le budget temps consacré aux différentes activités (debout, en mouvement) durant l'intégralité de la gestation (Busnel et Quiniou, 2019).

Ainsi l'objectif de cette étude est d'évaluer les besoins énergétiques individuels au cours de la gestation en intégrant les données d'activité physique individuelle obtenues *via* des accéléromètres.

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental

Au sein de l'Unité Expérimentale de Physiologie et Phénotypage des Porcs (UE3P, 35590 Saint-Gilles, France, doi: 10.15454/1.5573932732039927E12), deux bandes de 20 truies Large White x Landrace ont été suivies au cours d'une gestation. L'essai s'est déroulé de début juillet à fin octobre 2021. À partir du 3^{ème} jour de gestation, la bande était logée dans une salle de gestation de 7,5 x 8,0 m avec un sol en béton paillé quotidiennement. Elle y restait jusqu'au jeudi qui précède la semaine avant la mise-bas.

Collecte et traitement des données

Les truies portaient à l'oreille un accéléromètre (Actisow, RF-Track, France) qui enregistrerait l'activité physique individuelle par heure, du 5^{ème} au 109^{ème} jour de gestation inclus. Sur les 40 truies suivies initialement, seulement 20 truies de la 1^{ère} bande et 4 truies de la 2^{ème} bande ont eu un accéléromètre qui remontait des données. Sur ces 24 truies, sept truies avaient moins de 30 jours de données de suivi utilisables et une truie était non gestante. Ainsi, 16 truies ont pu être utilisées pour l'étude. L'accéléromètre quantifiait le temps passé en minutes debout, en mouvement et couchée pour chaque heure de la journée grâce à un algorithme interne transformant l'accélération dans les trois directions en valeur d'activité (Marcon et al., 2017). La présence de boiterie a été surveillée toutes les semaines de suivi par des personnes formées au protocole Welfare Quality® (2009). Tant que la truie était catégorisée boiteuse, elle y restait jusqu'à la prochaine semaine où elle était catégorisée comme non-boiteuse.

Les données de la semaine 9 et de la semaine 6, respectivement pour la 1^{ère} et la 2^{ème} bande, sont indisponibles dû à un problème de transfert des données des capteurs. Seules les données des heures de suivi dont la somme des activités était égale à 60 ± 1 min ont été conservées. Les jours comprenant moins de 19 h enregistrées ont été écartés. Pour homogénéiser la durée des jours à 24 h, les heures manquantes ont été comblées avec la moyenne des activités pour la même heure des jours précédant et suivant.

Pour estimer les besoins énergétiques individuels au cours de la gestation, il est nécessaire d'avoir une valeur journalière et individuelle d'activité physique. Pour les jours avant et après la mise en groupe, la valeur de 4 h debout a été utilisée. Pour les jours manquants lors du logement en groupe, le pourcentage moyen individuel pour chaque activité de la truie a été utilisé pour combler le jeu de données journalières.

Estimation du besoin énergétique journalier avec l'activité physique individuelle

L'estimation des besoins énergétiques individuels au cours de la gestation a été réalisée à l'aide du modèle de Gaillard et al. (2019), dérivé du modèle de Dourmad et al. (2008). Les valeurs obtenues par Labussière et al. (2022) ont été utilisées pour évaluer le coût énergétique de chaque activité : debout ou en mouvement. L'activité physique des truies correspondait à la somme du temps passé debout et en mouvement. Ces valeurs ont été utilisées pour établir une relation linéaire entre dépense énergétique et vitesse de marche. L'équation obtenue a été corrigée avec la dépense liée à l'activité debout initialement disponible dans le modèle et fixée à 0,30 kJ par min et par kg de poids métabolique ($PV^{0,75}$) (Dourmad et al., 2008). Le résultat est le suivant :

Dépense énergétique en kJ/min/kg $PV^{0,75} = 0,30 + 0,22 \times \text{vitesse de marche}$ (Eq.1 ; $R^2 = 0,97$).

Trois scénarios pour estimer le besoin énergétique journalier ont été étudiés :

- Une stratégie initiale où la valeur de 4 h passées en position debout par jour comme usuellement utilisée dans le modèle. Cette valeur est conservée tout au long de la gestation et a servi comme stratégie témoin.
- les deux autres stratégies ont pris en compte l'activité physique individuelle des truies, obtenue avec les accéléromètres avec deux hypothèses de vitesse de déplacement : lente ou rapide, avec ou sans occurrence de boiterie (Tableau 4.4).

Un aliment conventionnel contenant 13,14 MJ d'énergie métabolisable est utilisé pour l'ensemble des scénarios.

Tableau 4.4 – Dépense énergétique en énergie métabolisable de l'activité debout sans déplacement et en mouvement avec différentes vitesses de marche

	Debout	Truie en mouvement lent		Truie en mouvement rapide	
		Boiteuse (1,32 km/h)	Non-boiteuse (1,50 km/h)	Boiteuse (2,42 km/h)	Non-boiteuse (2,75 km/h)
Dépense énergétique, kJ/min/kg $PV^{0,75}$	0,30	0,58	0,62	0,82	0,89

Note : Les données proviennent de Dourmad et al. (2008) et Labussière et al. (2022).

Analyses statistiques

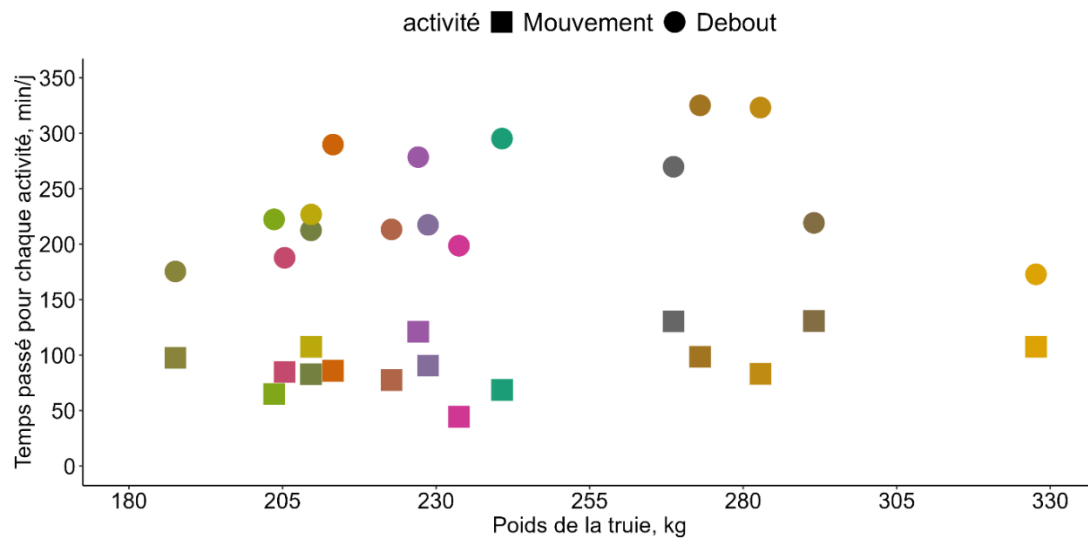
Les analyses statistiques sont réalisées à l'aide du logiciel R v.4.4.1 (R Core Team, 2024). Un modèle linéaire mixte *via* la fonction lmer du package lme4 (Bates et al., 2015) a été utilisé pour tester l'effet de la stratégie sur l'estimation des besoins alimentaires pendant une gestation. La stratégie est considérée comme effet fixe et la truie comme effet aléatoire qui est également l'unité expérimentale. L'écart-type résiduel (ETR) est calculé d'après Gu et al. (1992). Les différences sont considérées significatives quand la *P*-value est inférieure ou égale à 0,05.

Résultats

Un total de quatre truies nullipares, six primipares et six multipares compose les 16 truies ayant des données disponibles pour l'étude. Le traitement des données brutes horaires obtenues avec les accéléromètres a conduit à en retirer 0,3 %. Parmi l'ensemble des jours de suivi en groupe (*i.e.*, du 5^{ème} au 109^{ème} jour de gestation), en moyenne 35 % des jours ont été comblés par le pourcentage moyen individuel pour chaque activité. En moyenne, durant la gestation en groupe, une truie passe 237 minutes debout, 99 minutes en mouvement et le reste du temps couchée (Tableau 4.5). Les boiteries ont été relevées 43 fois sur huit truies différentes sur plusieurs phases. La variabilité individuelle sur les activités est importante avec un écart-type correspondant à 31 % de la moyenne de l'activité debout et 33 % de la moyenne de l'activité en mouvement (Figure 4.3).

Tableau 4.5 – Temps journalier consacré à chaque activité les jours où le suivi était possible (du 5^{ème} au 109^{ème} jour de gestation) (moyenne $\pm$ écart-type)

Scénario	Initial	Réel avec accéléromètres
Activité, minutes		
Debout	240	237 $\pm$ 73
En mouvement	0	99 $\pm$ 33
Couchée	1200	1104 $\pm$ 91
Occurrence boiterie, jour/truie	/	3 $\pm$ 4



Note : Chaque couleur représente une truie. Activités obtenues avec un accéléromètre individuel du 5^{ème} au 109^{ème} jour de gestation.

Figure 4.3 : Temps moyen passé par activité (debout ou en mouvement ; min/j) en fonction du poids moyen de la truie (kg) au cours de la gestation.

La prise en compte de l'activité physique individuelle journalière a un impact sur l'estimation du besoin énergétique et donc de l'apport alimentaire à effectuer au cours de la gestation (Tableau 4.6 ; P -value < 0,001). Comparativement à la situation initiale prenant en compte 4 h debout pour chaque truie, prendre en compte le temps debout et en mouvement individuellement et journalièrement augmente l'apport alimentaire sur une gestation de 28 kg et 41 kg, respectivement selon la vitesse de marche lente ou rapide. Cela représente un apport supplémentaire journalier au troupeau de 250 g dans le cas d'une vitesse de marche lente et de 360 g dans le cas d'une vitesse de marche rapide.

Tableau 4.6 – Apport à effectuer sur la gestation selon le scénario de prise en compte de l'activité physique

	Stratégie ¹			ETR	P-value Stratégie
	Initiale	Réelle lente	Réelle rapide		
Apport alimentaire, kg/gestation	335 ^a	363 ^b	376 ^c	15,3	< 0,001

¹La stratégie initiale correspond à une activité physique de 4 heures debout intégrée dans le besoin d'entretien. Les stratégies réelles prennent en compte le temps passé debout et en mouvement obtenu individuellement et quotidiennement à l'aide d'accéléromètres. Sans boiterie, la vitesse de marche est supposée être de 2,75 km/h et 1,50 km/h, respectivement pour la stratégie rapide et lente, et de 2,42 et 1,32 km/h avec la présence de boiterie pour ces mêmes stratégies.

a, b, c Une lettre différente correspond à une différence statistique significative entre groupe avec $P \leq 0,05$.

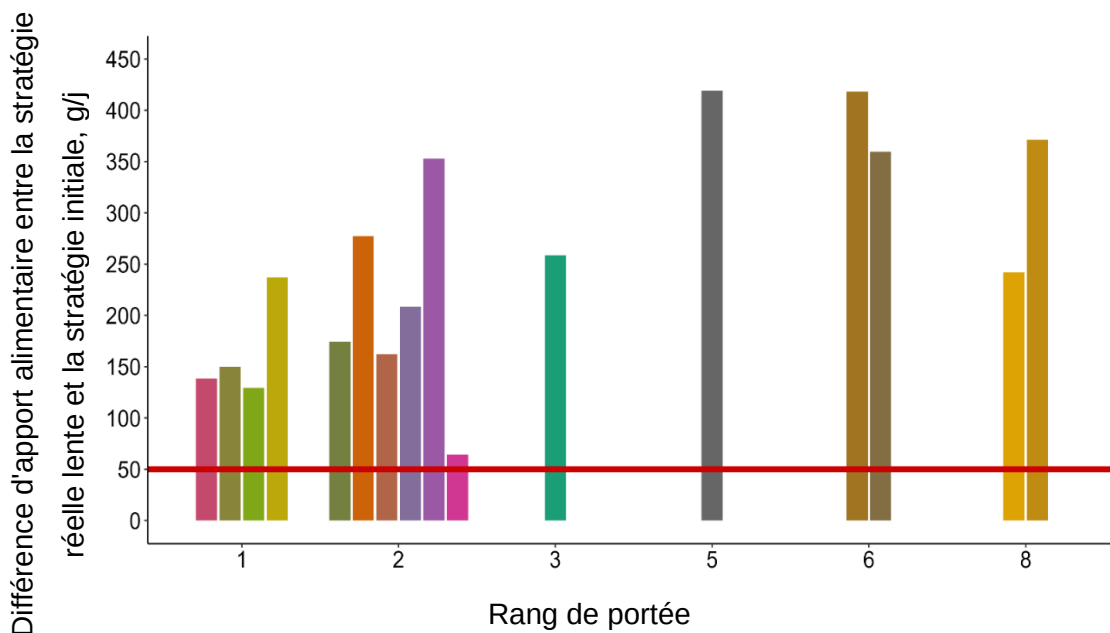
La prise en compte de l'activité physique au niveau individuel nécessite un apport supplémentaire d'aliment journalier pour l'ensemble des truies du troupeau (Figure 4.4). L'apport supplémentaire moyen est de 250 g par jour en utilisant la stratégie avec vitesse de déplacement lente. Elle est très variable entre individus allant d'une valeur minimale de 60 g supplémentaire par jour à 420 g pour l'apport supplémentaire le plus important.

Discussion

Le temps passé debout est en moyenne considéré égal à la durée de 4 heures initialement utilisée par défaut dans le modèle (Dourmad et al., 2008). Cependant, on observe une grande variabilité sur cette valeur entre individus. Cette variabilité se combine à la variabilité sur le poids ce qui conduit à une variabilité élevée du besoin énergétique pour l'activité physique. La dépense énergétique double entre la position couchée et la position debout (Noblet et al., 1993). Elle est également multipliée par deux lorsque la truie passe de la position debout à un mouvement de 1,50 km/h. Ainsi, dans le cas d'une vitesse de déplacement de 1,50 km/h et avec environ 1,5 heure de temps passé en mouvement en moyenne, cela équivaut au niveau énergétique à prendre en compte un temps debout moyen de 7 heures par jour.

Que ce soit en marche lente ou rapide, l'apport alimentaire moyen supplémentaire de respectivement 250 et 360 g/j, se situe proche de la limite inférieure basse indiquée par Theil et al. (2023). En prenant en compte les deux stratégies, l'apport d'aliment sur la gestation est augmenté respectivement de 8 et 12 %, ce qui peut représenter un surcoût alimentaire pour l'élevage. Avec la situation initiale, l'ensemble des truies du troupeau sont potentiellement sous-alimentées en gestation ce qui peut conduire à des truies plus maigres que l'objectif à la mise-bas voire à mener à la mobilisation des réserves corporelles (Goodband et al., 2013). Une truie gestante dont les réserves corporelles sont trop faibles à la fin de la gestation a des porcelets plus légers à la mise-bas et sèvre des porcelets moins lourds malgré une consommation accrue d'aliments pendant la lactation (Amdt et al., 2014 ; Quiniou, 2016).

L'ensemble de ces éléments pourraient avoir des conséquences économiques néfastes plus élevées que le surcoût alimentaire associé à la prise en compte de l'activité physique pour alimenter les truies gestantes. Les truies de cette expérimentation, avec un apport alimentaire suivant la stratégie initiale avaient, au bout du 3^{ème} cycle de gestation, une épaisseur de lard dorsal inférieure à celle des truies alimentées sur mesure (Ribas et al., 2024). Ce résultat indique que les truies n'ont pas pu déposer autant de réserves que prévu par les objectifs d'état à la mise-bas avec l'apport suivant la stratégie initiale pour pallier un apport énergétique inférieur aux besoins réels des truies.



Note : Chaque couleur représente une truie classée par rang de portée. Le trait rouge correspond à la valeur de précision de distribution d'aliment par les automates d'alimentation. L'aliment considéré contient 13,14 MJ d'énergie métabolisable par kg.

Figure 4.4 : Apport supplémentaire (en g/j) avec une stratégie prenant en compte l'activité physique individuelle (avec une vitesse de déplacement lente de 1,50 km/h) comparativement à une stratégie initiale considérant 4 h debout d'activité journalière pour l'ensemble des truies.

Les résultats de cette étude sont en faveur de la prise en compte de l'activité physique au niveau individuel dans le calcul des rations ainsi que la connaissance de la vitesse de déplacement des animaux. La vitesse de marche influence grandement l'estimation du besoin énergétique dans le cadre de la prise en compte de l'activité en mouvement de l'animal. En effet, passer d'une vitesse de marche lente de 1,50 km/h pour la truie à une vitesse de marche rapide de 2,75 km/h augmente de 44 % la dépense énergétique (Labussière et al., 2022). Les écarts d'activité physique entre la valeur par défaut et la valeur individuelle ont un effet plus

important pour les truies les plus lourdes avec une dépense énergétique directement dépendante du $PV^{0.75}$ de l'animal. A l'époque où elles étaient encore à l'attache, les truies multipares passaient plus de temps debout que les autres truies (Cariolet et Dantzer, 1984). Il semblerait que l'hypothèse se vérifie également chez les truies en groupe (Desmet, 2025).

Les accéléromètres étaient assez fragiles avec sept capteurs sur les 24 (soit 29 %) qui ont eu un problème durant l'essai. Pour pallier ce problème, le suivi par caméra et l'analyse automatique d'images semblent être prometteurs. Cette solution non invasive pour l'animal devrait permettre de suivre avec précision les activités individuelles des truies en groupe pendant la gestation, notamment la position debout avec 89 % de précision (Gaillard et Simon, 2024). Cependant, le suivi individuel doit être amélioré pour obtenir les activités de chaque truie tout au long de la journée et obtenir automatiquement leur vitesse de marche en mouvement. En l'absence de telles technologies et après l'établissement de la hiérarchie au sein du groupe, l'analyse de métabolites urinaires issus de l'activité musculaire pourrait fournir de manière simpliste un niveau individuel d'activité physique (Sampson et al., 2014). Par exemple, la créatinine est une molécule issue de la dégradation protéique. Elle est déjà analysée dans le cadre d'échantillonnage ponctuel d'urine pour standardiser les valeurs de biomarqueurs osseux.

Conclusion

La prise en compte de l'activité physique individuelle journalière obtenue à l'aide d'accéléromètres augmente les besoins énergétiques estimés en comparaison d'une valeur d'activité physique fixée à 4 heures debout pour l'ensemble des truies en groupe. En plus de passer 4 heures debout, les truies passent en moyenne dans notre étude 1 heure et 39 minutes en mouvement. La variabilité individuelle de temps passé debout et en mouvement incite à une prise en compte à l'échelle individuelle de l'activité physique dans les modèles nutritionnels pour truie gestante dans le cadre d'une alimentation sur mesure. Le déploiement de caméras et d'algorithmes d'analyses d'images semble être un levier pour mieux caractériser l'activité physique si le verrou technique du suivi individuel des animaux élevés en groupe est levé.

Références bibliographiques

- Amdi, C., Giblin, L., Ryan, T., Stickland, N.C., Lawlor, P.G., 2014. Maternal backfat depth in gestating sows has a greater influence on offspring growth and carcass lean yield than maternal feed allocation during gestation. *Animal* 8, 236–244. <https://doi.org/10.1017/S1751731113002073>
- Bates, D.M., Mäechler, M., Bolker, B., Walker, S., 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67, 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>

- Bertin, C., Ramonet, Y., 2015. Utilisation d'accéléromètres pour mesurer l'activité physique des truies logées en groupes : Développement de la méthode et utilisation dans six élevages. *Journées Recherche Porcine* 47, 229–234.
- Busnel, F., Quiniou, N., 2019. Précision de l'information collectée chaque heure par un accéléromètre fixé à l'oreille de la truie gestante pour la caractérisation de son activité physique. *Journées Recherche Porcine* 51, 19–24.
- Cariolet, R., Dantzer, R., 1984. Motor activity of pregnant tethered sows. *Annales de Recherches Vétérinaires* 15, 257–261. <https://hal.science/hal-00901503>
- Council of the European Union, 2008. Directive 2008/120/EC: laying down minimum standards for the protection of pigs. Consulté le 30/04/2025 à <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/120/2019-12-14>
- Desmet, M. 2025. Caractérisation de l'activité physique individuelle et journalière des truies en gestation et estimation des besoins énergétiques. Mémoire de Master 2, INP Purpan, INRAE UMR PEGASE, 79 p.
- Dourmad, J. Y., Étienne, M., Valancogne, A., Dubois, S., van Milgen, J., Noblet, J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of sows. *Animal Feed Science and Technology* 143, 372–386. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.05.019>
- Gaillard, C., Durand, M., Largouët, C., Dourmad, J. Y., Tallet, C., 2021. 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. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115034>
- Gaillard, C., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J. Y., 2019. Exploration of individual variability to better predict the nutrient requirements of gestating sows. *Journal of Animal Science* 97, 4934–4945. <https://doi.org/10.1093/jas/skz320>
- Gaillard, C., Simon, M., 2024. Improvement of an algorithm performance to estimate the physical activity of group-housed sows based on videos. *Annual Meeting of the European Association for Animal Production* 75, 742.
- Goodband, R.D., Tokach, M.D., Goncalves, M.A.D., Woodworth, J.C., Dritz, S.S., DeRouchey, J.M., 2013. Nutritional enhancement during pregnancy and its effects on reproduction in swine. *Animal Frontiers* 3, 68–75. <https://doi.org/10.2527/af.2013-0036>
- Gu, Y., Schinckel, A.P., Martin, T.G., 1992. Growth, development, and carcass composition in five genotypes of swine. *Journal of Animal Science* 70, 1719–1729. <https://doi.org/10.2527/1992.7061719x>
- Labussière, E., Dubois, S., Esnault, J., van Milgen, J., 2022. Energy cost of physical activity (standing and walking) in finishing pigs and sows. *Animal - science proceedings* 13, 325–326. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.07.076>
- Marcon, M., Melot, G., Courboulay, V., Boulot, S., Rousselière, Y., 2017. Monitoring du niveau d'activité des truies par un accéléromètre communiquant placé sur la boucle d'identification. *Journées Recherche Porcine* 49, 171–172.
- Noblet, J., Shi, X.S., Dubois, S., 1993. Energy cost of standing activity in sows. *Livestock Production Science* 34, 127–136. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(93\)90041-F](https://doi.org/10.1016/0301-6226(93)90041-F)
- 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 Recherche Porcine* 48, 207–212.
- R Core Team, 2024. R: A language and environment for statistical computing, version 4.4.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ribas, C., Quiniou, N., Gaillard, C., 2024. On farm precision feeding of gestating sows based on energy and amino acids on farrowing performances and feeding behavior over 3 consecutive gestations. *Journal of Animal Science* 102, skae201. <https://doi.org/10.1093/jas/skae201>
- Sampson, D.L., Broadbent, J.A., Parker, A.W., Upton, Z., Parker, T.J., 2014. Urinary biomarkers of physical activity: candidates and clinical utility. *Expert Review of Proteomics* 11, 91–106. <https://doi.org/10.1586/14789450.2014.859527>
- Theil, P.K., Krogh, U., Bruun, T.S., Feyera, T., 2023. Feeding the modern sow to sustain high productivity. *Molecular Reproduction and Development* 90, 517–532. <https://doi.org/10.1002/mrd.23571>
- Welfare Quality®, 2009. Welfare Quality® assessment protocol for pigs. Welfare Quality® Consortium, Lelystad, The Netherlands, 123 p.

5. Effets d'une alimentation sur mesure des truies gestantes ajustée en énergie et acides aminés sur les performances à la mise-bas et le comportement alimentaire sur trois cycles consécutifs

Les résultats de cette partie sont issus d'un article publié dans *Journal of Animal Science* en juillet 2024 (Ribas, C., Quiniou, N., Gaillard, C., 2024. On farm precision feeding of gestating sows based on energy and amino acids on farrowing performances and feeding behavior over 3 consecutive gestations. *Journal of Animal Science* 102, skae201. <https://doi.org/10.1093/jas/skae201>).

Résumé :

Les truies gestantes sont souvent nourries avec un unique aliment au cours de la gestation, menant à des situations de déficit ou d'excès de nutriments à l'échelle individuelle. L'objectif de cette étude était de caractériser, sur trois cycles de gestation consécutifs, l'impact d'une alimentation sur mesure (**PF**), *i.e.*, apports alimentaires ajustés à l'échelle individuelle en terme de quantité (ingéré d'énergie) et en terme de qualité (lysine (**Lys**) digestible iléale standardisée (**DIS**)), sur les performances productives des truies gestantes, leur comportement alimentaire, les rejets environnementaux, et l'état de santé comparé avec des truies nourries en alimentation conventionnelle (**CF**, *i.e.*, un apport fixe de Lys DIS). Au début de l'essai, deux bandes de 20 truies gestantes Landrace x Large White sont réparties dans l'une des deux stratégies alimentaires (PF vs. CF) en fonction de leur rang de portée (1, 2 ou 3 et plus), leur poids, et leur épaisseur de lard dorsal (**ELD**), 3 jours après insémination. La stratégie PF consiste à mixer avec un alimentateur automatique deux aliments iso-énergie (9,8 MJ/kg d'énergie nette avec 3,3 et 8,5 g de Lys DIS/kg, respectivement), dans des proportions variables au niveau individuel et journalier, tandis que pour la stratégie CF, ces proportions restent constantes au cours de la gestation (73 % et 27 %, respectivement, résultant en une concentration de 4,7 g Lys DIS/kg). Les truies ont été suivies sur trois cycles consécutifs de gestation et les truies conservent la même stratégie alimentaire au cours de l'étude. Quelques truies ont été réformées avant la fin de l'étude et ont été remplacées par d'autres truies qui ont été suivies sur une ou deux gestations au cours de l'étude. Ainsi, 106 gestations et lactations de 51 truies ont été entièrement suivies et leurs données analysées. La stratégie PF a permis de mieux atteindre les objectifs de ELD fixés à la mise-bas avec la succession des cycles comparativement à la stratégie CF ($P < 0,001$). Les truies PF consomment 16 % moins de Lys DIS par gestation

que les truies CF ($P < 0,001$), résultant en une amélioration de 4 % de l'efficacité d'utilisation de N ($P < 0,001$), sans impacts sur les performances à la mise-bas ($P > 0,10$). Les truies ont consommé leur ration quotidienne en une seule visite quelque soit la stratégie alimentaire ($P = 0,41$), mais les truies CF passent plus de temps dans l'alimentateur durant les cycles 2 et 3 ($P < 0,001$). Ainsi, comparativement à une stratégie CF, mise en œuvre par l'éleveur, les apports nutritionnels individuels et journaliers mis en œuvre avec la stratégie PF ont été plus efficaces pour permettre aux truies d'atteindre les objectifs d'état corporel fixés à la mise-bas sur le long-terme, ainsi que de réduire l'ingéré de Lys DIS et améliorer l'efficacité d'utilisation de N sans impact négatif sur les performances à la mise-bas.

Introduction

In commercial farms, sows are frequently fed the same single diet during the whole gestation and more rarely with a transition diet or a mix of gestation and lactation diets at the entrance of the farrowing room (Quiniou et al., 2018). Nutritional requirements assessed through a factorial approach depend on parity, initial body condition, stage of gestation (Noblet et al., 1993; Dourmad et al., 2008), and expected target values at farrowing for body weight (**BW**), backfat thickness (**BT**), prolificacy, and piglets' birth weight (Young et al., 2004; Quiniou, 2016). The minimum ratios between essential amino acids and energy requirements (Noblet et al., 1990; Gaillard et al., 2019) increase with the stage of gestation but they are not similar for all sows. It means that with a single diet, formulated for a given ratio between essential amino acids and energy, the adequacy between nutritional requirements and supplies is not achieved for each sow in the herd each day (Solà-Oriol and Gasa, 2017).

Accounting for differences in energy requirement is more and more frequent in commercial farms, but most often only at an average level based on parity and classes of BT measured at weaning or after insemination. Then only few different dietary energy allowances are implemented in practice for sows of the same batch, with decisions taken by farmers based on observations instead of measurements. In addition, as the increase in maternal BW and BT from the insemination to the farrowing depends on the amount of dietary energy supplied, unadjusted energy delivery is one of the factors that contribute to the inter-individual variability of sow's characteristics body condition (BW and BT) at farrowing, which has important consequences on sows and piglets' welfare and performances when sows are either too fat or too lean. In this case, for overfat sows the farrowing process is impaired and results in an increased rate of stillborn piglets. In addition, these sows have a poor appetite during the

lactation and mobilize more their body reserves with consequences on reproduction after weaning and increased risk of being culled early (Niemi et al., 2017). On the contrary, too lean sows eat more but they farrow lighter piglets and produce less milk, which results in an increased risk of mortality and low body weight of piglets at weaning (Quiniou, 2016).

The aim of precision feeding (**PF**) is to improve the adequacy between the nutritional supplies and the requirements. For the present study the adjustment occurs individually and daily. Through an individualized quantity and quality of the feed, the aim is to reach target values of sow characteristics at farrowing in terms of BW, BT, and litter weight at the individual level, to reduce the inter-individual variability of BT at farrowing at the batch level and to improve the efficiency of nutrient utilization towards reduced situations of deficiency and spillage at the sow's level. In group-housed gestating sows, the assessment of nutritional requirements of each sow on a daily basis relies on the use of new technologies like automatic feeders equipped with multiple feed hoppers; they identify each sow and can deliver an individually and daily adapted mix of different diets. The quantity allocated per day per sow is mainly related to energy requirement (Gaillard et al., 2020). The daily adjustment of the dietary quality refers mainly to the amino acid content (based on lysine (**Lys**) requirement for the present study). Indeed, a recent trial carried out over 1 gestation, the PF strategy designed by Gaillard and Dourmad (2022) reduced the Lys intake by around 25% and nitrogen excretion by 19% compared to a conventional feeding (**CF**) strategy (1 diet for all the sows and all the gestation), without any negative impact on litter characteristics at birth. Furthermore, feeding behavior seemed slightly affected by the feeding strategy, as it resulted in the same number of feeding visits, but with + 0.5 non-feeding visit at the end of gestation for PF sows (Gaillard and Dourmad, 2022). The long-term effects (i.e. over several reproductive cycles) of such a PF strategy have not yet been studied. Therefore, the aim of this present paper was to estimate the impact of a PF strategy adjusted on energy and amino acids across 3 consecutive gestations on sow's performances and behavior compared with a CF defined thereafter.

Material and methods

Experimental farm

The protocol for the experiment was reviewed and approved by the Ethics Committee in Animal Experimentation (Rennes, France, reference APAFiS #24663). The experiment was conducted in accordance with the French legislation for commercial pig production and experimental animal care. It was performed between June 2021 and September 2022, at the Pig Physiology and Phenotyping Experimental Facility (UE3P), Saint-Gilles, France (doi: 10.15454/1.5573932732039927E12).

Experimental design

Initially, 2 batches of 20 Landrace x Large White gestating sows were involved in the experiment. At the beginning of the study (cycle 1), the sows were allocated to 1 of the 2 feeding strategies (PF vs. CF), based on their parity (1, 2 or 3 and more), BW, and BT 3 days after insemination (i.e. initial BW and BT). They were followed during 3 consecutive gestations and remained allocated to the same strategy throughout the study. Some sows were culled after weaning after the first or second gestation(s) of the trial under the performance-based replacement policy of the experimental farm, i.e. before the end of the study. They were replaced by primiparous sows who could perform only 1 or 2 gestations during the study. All sows that completed at least 1 gestation cycle were used for the analyses.

Housing conditions, equipment, and management

Sows were moved to the gestation room and group-housed 3.1 ± 0.5 d after insemination. Each batch of 20 gestating sows was housed in a room of 7.5×8.0 m, on concrete floor with fresh straw distributed every morning. The feed was delivered using 2 automatic feeders (Gestal, JYGA Technologies Inc., Québec, Canada), each equipped with 2 hoopers allowing the delivery of a mixture of 2 diets in individualized proportions. The 2 automatic feeders were connected to the same computer, so that each sow could access its daily ration using either one or both automatic feeders. Sows had free access to water using 2 drinking troughs with an integrated sow scale (Asserva, Lamballe, France). Ventilation set point temperature was 21°C in the gestating rooms. The sows were moved to the farrowing room about 1 week (106.9 ± 0.7 d) before the planned farrowing date and farrowed at 115.4 ± 1.2 d of gestation after the first insemination.

Diets and feeding strategies

Two diets were formulated on an iso-net energy basis (9.8 MJ/kg) and different amino acid concentrations. As Lys is in most cases the first limiting essential amino acid in pigs, the diets were formulated in such a way that the minimum levels between standardized ileal digestible (**SID**) essential amino acids and SID Lys follow the fixed ideal protein profile for gestating sows (van Milgen and Dourmad, 2015). The SID Lys concentration was 3.3 and 8.5 g/kg in the GL and GH diets, respectively (Tableau 5.1). For the PF strategy, proportions of GL and GH diets were changed over the gestation on an individual and daily basis according to the assessed Lys requirement of each sow. Both diets were mixed in constant proportions (73% GL and 27% GH, respectively) for the CF strategy, resulting in a SID Lys concentration of 4.7 g/kg. From the entrance into the farrowing room to farrowing, all sows received a standard gestation diet

(so-called GS diet), which formulation corresponded to the mix of GL and GH delivered before to CF sows. From the day after farrowing up to weaning, all sows received a blend made of 34% GL diet and 66% of a lactation diet available on the farm which presented a high concentration in amino acids (so-called LH diet with a 10.6 g SID Lys/kg), so that the SID Lys concentration in the resulting diet was close to the value observed in a standard lactation diet. Lactation feed allowance followed a progressive rationing plan which is different for primiparous and multiparous sows. Details on ingredients and chemical composition of diets GL, GH, GS, and LH are shown in Tableau 5.1.

Based on the parity (1, 2, or 3 and more), BW and body conformation assessed visually by the experimental farm technician 3 d after insemination, each CF sow was allocated to a small, medium or high feeding level. A 3-phase strategy, following an high-low-high feeding pattern, was used, with phase 1 between insemination and day 35 of gestation (recovery of maternal reserves mobilized during the previous lactation), phase 2 between day 36 and day 85 of gestation (energy supply close to maintenance requirement: $0.440 \text{ MJ/kg BW}^{0.75}$ (Noblet et al., 1990)), and phase 3 between day 86 of gestation and entrance into the farrowing room. Details for each group are available in Table S1. For PF sows, individual total feed allowance and dietary proportions of diets GL and GH were calculated based on energy and Lys requirements estimated by an enhanced version of the InraPorc model (Dourmad et al., 2008) updated for gestating sows (Gaillard et al., 2020). The energy requirement was assessed for the whole gestation period based on individual age, BW and BT at insemination, and target values for litter birth weight, BT and BW at farrowing after calibration of a sow's profile. For this purpose, historical performances of the herd were used to fit a BW curve according to age at farrowing, which was used in our study to estimate the expected maternal BW at farrowing. Expected litter size and litter weight at birth were considered according to the parity. Thereafter, the total feed allowance for the whole gestation was calculated from the total energy requirement divided by the dietary energy content. Then, it was partitioned per day in a 2-phase program with daily feed allowance increased by 500 g after day 86 of gestation (corresponding to phase 3 for CF) compared to previous allowance (from insemination to day 85 of gestation), to match the increase in energy requirement for fetal growth.

Tableau 5.1 – Ingredients and chemical composition of sows' diets (on an as-fed basis)

Diet type ¹	GL	GH	GS	LH
Ingredients, g/kg				
Barley	400	256	353	230
Wheat	254.1	272.6	230.0	230.0
Maize	100	120	100	120
Wheat bran	150	100	150	100
Soybean meal 48%	-	162.6	70.8	219.9
Vegetable oil	20	19.9	20	20
Sugar beet pulp	50	-	50	-
Cane molasses	-	30	-	30
Limestone	11.5	15.3	12.5	18.0
Monocalcium phosphate	2.78	6.6	2.5	9.0
Salt	4.5	4.5	4.5	4.5
Premix ²	5	5	5	5
L-Lysine 50	1.07	4.59	0.65	6.28
DL-Methionine	-	0.54	-	1.40
L-Threonine	-	0.77	-	1.45
L-Tryptophan	-	-	-	0.66
L-Valine	-	0.55	-	2.76
Phytase	0.05	0.05	0.05	0.05
Acidifying agent	1	1	1	1
Calculated chemical composition, g/kg				
Dry matter	879.9	874.9	880.5	875.4
Crude protein	105.7	160.4	130.0	181.5
Ash	46.6	59.4	50.6	66.8
Crude fat	41.0	39.9	41.1	39.9
Crude fiber	49.3	38.4	50.3	39.3
NDF	198.3	151.8	193.9	147.9
ADF	61.4	48.2	62.6	49.2
ADL	13.1	10.3	12.9	10.0
Lys	4.4	9.6	5.9	11.8
Met	1.8	2.9	2.1	3.8
Cys	2.4	3.0	2.7	3.2
Met + Cys	4.2	5.9	4.8	7.0
Thr	3.5	6.3	4.5	7.8
Trp	1.3	1.9	1.6	2.4
Ile	3.7	6.3	4.9	7.2
Val	5.1	7.7	6.3	9.4
SID ³ Lys	3.3	8.5	4.7	10.6
SID Met	1.5	2.6	1.8	3.5
SID Cys	2.0	2.6	2.2	2.8
SID Met + Cys	3.5	5.2	4.0	6.3
SID Thr	2.6	5.3	3.5	6.7
SID Trp	1.0	1.6	1.3	2.1
SID Ile	3.0	5.5	4.1	6.3
SID Val	4.0	6.5	5.1	8.2
Total calcium	7.6	9.8	8.2	11.5
Total phosphorus	4.6	5.5	4.7	6.2
Digestible phosphorus	2.6	3.4	2.6	4.0
Calculated energy, MJ/kg				
Digestible energy	13.3	13.7	13.5	13.8
Metabolizable energy	12.8	13.1	12.9	13.1
Net energy	9.8	9.8	9.7	9.7

Lys: lysine; Met: Methionine; Cys: Cysteine; Thr: Threonine; Trp: Tryptophan; Ile: Isoleucine; Val: Valine

¹ Corresponding to a gestation diet with a low Lys content (GL) or a high Lys content (GH), a standard gestation diet (GS), and a lactation diet with a high Lys content (LH).

² Provided the following amounts of vitamins and trace elements in units per kg of feed: vitamins: A = 10,000 IU, D3 = 1500 IU, E = 45 IU, biotin = 0.2 mg; trace minerals: Cu (E4 sulfate) = 10 mg, Zn (E6 oxide) = 100 mg, Mn (E5 oxide) = 40 mg, Fe (E1 carbonate) = 24 mg, Fe (E1 hepta sulfate) = 28.2 mg, Fe (E1 mono sulfate) = 27.5 mg, I (E2 calcium iodate) = 0.80 mg, Se (E3 sodium selenite) = 0.25 mg.

³SID: standardized ileal digestible

Measurements, data collection, and calculations

Each sow was equipped with 2 radio-frequency identification (**RFID**) ear-tags, 1 for the identification by the automatic feeders and 1 for the identification by the drinking troughs. Both equipment recorded each individual visit (duration and quantity eaten or drunk) each day. Overlapping visits at the same automaton and visits without duration were removed from the database. These data were used to characterize feeding and drinking behaviors of sows on a daily basis. Sow's BW and BT were measured manually at the beginning of the gestation (around the day 3 of gestation) during the transfer from the service room to the gestation room, at the end of the gestation (around day 107 of gestation) when sows were moved to the farrowing room, and at weaning (on Thursday, after around 4 weeks of lactation). An individual electronic scale (Schippers, The Netherlands, precision ± 0.5 kg) was used. An ultrasound portable device (ECM Imago, France) was used to measure the BT at the level of the last rib 6.5 cm from the midline on the right and left sides of the sow, and the average of both values was considered in the study.

In the gestation room, health status was monitored once per week by trained observers. The dirtiness of different body parts (on both sides instead of only one), bursitis, lameness (by observing the gait) or any other health problems such as coughs or injuries were noted using the Welfare Quality® protocol (Welfare Quality®, 2009) as the reference method.

At farrowing, individual birth weight, and status (alive, dead or mummified) of piglets were recorded. Depending on the number of functional teats, some piglets were cross-fostered in between the sows independently of the feeding strategy. From week 3 onwards, piglets had access to creep feed. Piglets were weighed at weaning, i.e. at around 4 weeks of age. Piglets' mortality between birth and weaning was also recorded, and piglets weighed at that time. Born alive and stillborn piglets were considered to calculate the litter size at birth, average birth weight per piglet and per litter. The average daily gain (**ADG**) of the litter was calculated based on BW gain of piglets alive at weaning and the BW gain of piglets that died before, divided by the duration of the lactation. The ADG per piglet was obtained from the ADG of the litter, divided by the suckled litter size, i.e. number of weaned piglets and dead piglets taken into account on a prorate temporis.

Feed costs were estimated on the basis of the average price of the diets observed over the last semester 2023: 322.23 (\$348.00), 393.05 (\$424.49), 339.72 (\$366.90) €/ton, and 371.09 (\$400.78) €/ton for diets GL, GH, GS, and LH, respectively.

Feed intake, performance at farrowing, and sow's initial BW and BT were averaged by parity and feeding strategy and used to calculate N and P retention and excretion with the InraPorc model.

Statistical analyses

Statistical analyses were carried out using the R studio software (R Core Team, 2022). A linear mixed model with the lme function of the nlme package (Pinheiro and Bates, 2000) was used to assess the effect of the feeding strategy on the variables of interest followed during each gestation: sow characteristics (BW and BT), litter characteristics (number of alive piglets, birth weight, ADG) intakes (feed, nitrogen, SID Lys), and nutrient (N and P) retention and excretion. The sow was considered as the experimental unit. The feeding strategy (CF vs. PF), the cycle (1, 2 or 3), and their interaction were used as fixed effects. Parity of the sow at the start of the trial was divided in 3 classes (1: parity 1, 2: parity 2, 3+: parity 3 and more) and used as a covariate. The sow was considered as a random effect. An autocorrelation structure of order 1 (corAR1 function) was used to take into account the correlations between results for the consecutive gestations of a given sow. To analyze daily data, the stage (day) of gestation was taken into account as a fixed effect as well as its interactions with other fixed effects. A general linear mixed model with glmer function of the lme4 package (Bates et al., 2015) was used to test the effect of the feeding strategy on binary, counting and percentage variables such as those related to health (occurrence of lameness and bursitis and percentage of dirtiness) and feeding behavior (number of visits, time spent in the feeder). The same fixed effects were used as for the linear mixed model. Binary and percentage data were normalized with Binomial transformation. Counting data were normalized with Poisson transformation. For pairwise comparisons, the Tukey's test for multiple comparisons of means was used. Assumptions of regression models (linearity, normal distribution of error, homoscedasticity of errors and independence of the observations thanks to the autocorrelation structure) were evaluated for each model used. To compare the measured values to the expected values (BW, BT, litter weight at farrowing) and to compare cumulative data over 3 cycles, a Student test or a Welch test was used depending whether the variances were equal or not for both feeding strategies, respectively.

Residual standard deviation (**RSD**) was used and calculated as follows:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(n - p)}}$$

with n as the sample size, p the number of parameters to estimate, Y_i observed value and $\hat{Y}_i$ predicted value (Gu et al., 1992). The effect was considered significant when P value was below 0.05 and as a tendency when P value ranged between 0.05 and 0.10.

Results

Over the 3 reproductive cycles of the two batches, 118 gestations were initiated from 58 sows, of which 11 failed because the sows were not confirmed 25 d after insemination. In addition, one PF sow died because of rectal prolapsus at 35 d of gestation in cycle 1. At the end, 106 gestations and lactations from 51 sows were fully studied. The number of sows in each parity class, in CF and PF, is the following: 13 and 10 (parity 1), 4 and 6 (parity 2) and 11 and 7 (parity 3 and more) respectively. During the trial, besides the sows removed from the experiment due to death or not confirmed, 8 CF sows and 2 PF sows were culled after weaning (parity 5.8 on average) mainly due to locomotive disorders and poor performances in maternity. In total, 20% of each batch was therefore replaced during the experiment. A total of 11 PF sows and 9 CF sows completed 3 cycles of gestation/lactation, 6 PF and 9 CF completed only 2 cycles and 4 PF and 12 CF only 1 cycle.

Nutritional supplies

On average for all the sows and cycles, observed feed intake and SID Lys intake over the whole gestation were in agreement with supplies implemented (Tableau 5.2). Observed daily feed intake and SID Lys intake were 0.04 kg/d and 0.2 g/d lower than expected, respectively ($P < 0.001$). As a result of the application of feeding strategies, PF sows ate 0.20 kg more than CF sows in cycle 1 ($P = 0.002$) and this difference doubled for cycles 2 and 3 ($P < 0.001$). A PF sow ate + 22 kg, + 43 kg and + 46 kg more than a CF sow, over the consecutive 3 cycles ($P = 0.002$). On average for all cycles, PF sows consumed less SID Lys, both on a daily basis (- 1.7 g/d) and during gestation (- 168 g SID Lys) ($P < 0.001$). Over the first 12 weeks of gestation, PF sows consumed 2.2 g SID Lys/d less than CF sows (Figure 5.1; $P < 0.001$). Over the last 2 weeks in the gestation room, SID Lys intake of PF and CF sows was similar (on average 14.5 g/d). Across all weeks in the gestation room, the proportion of GL diet was significantly different between primiparous and multiparous sows and was significantly different between parity 2 and parity 3 and more, from week 3 onwards (Fig S1; $P < 0.001$).

Over the 3 gestation cycles, PF sows consumed 109 kg more feed on average than CF sows and 550 g less SID Lys (Table S2). From the arrival in the farrowing room to parturition, there was no difference in daily feed intake between the 2 feeding strategies (Tableau 5.2; $P = 0.71$). The feeding strategy affected daily feed intake during lactation ($P = 0.05$). On average, PF sows consumed 0.37 kg/d more than CF sows in cycle 1, but 0.26 kg/d less in cycle 3, the

same average daily feed intake was observed in cycle 2 (interaction Strategy x Cycle: $P = 0.06$).

Tableau 5.2 – Cumulated and daily feed intake and SID Lys intake regarding feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles

Strategy	Cycle						RSD ¹	P-value			
	1		2		3			Strategy ²	Cycle ²	Strategy x Cycle ²	Observed vs. Expected ³
Number of sows	CF	PF	CF	PF	CF	PF					
Expected in the gestation room, /sow											
Feed, kg/d	2.59	2.77	2.61	2.99	2.67	3.09	0.22	-	-	-	<0.001
Feed, kg	263	282	266	305	272	314	4.6	-	-	-	0.365
SID Lys, g/d	12.2	10.3	12.3	10.6	12.6	10.5	0.90	-	-	-	<0.001
SID Lys, kg	1.24	1.05	1.25	1.08	1.28	1.06	0.02	-	-	-	0.350
Observed in the gestation room, /sow											
Duration, d	101	102	102	102	102	102	0.1	0.966	0.913	0.876	-
Feed, kg/d	2.55 ^a	2.75 ^b	2.57 ^a	2.99 ^c	2.59 ^a	3.05 ^c	0.26	0.002	0.741	<0.001	-
Feed, kg	258 ^a	280 ^b	262 ^a	305 ^c	264 ^a	310 ^c	27	0.197	0.452	0.020	-
Diet GL, kg	188 ^a	258 ^b	191 ^a	292 ^c	193 ^a	305 ^c	30	<0.001	0.477	<0.001	-
Diet GH, kg	70 ^a	22 ^b	71 ^a	13 ^c	71 ^a	5 ^c	12	<0.001	0.907	<0.001	-
Nitrogen, kg	4.98	4.93	5.05	5.27	5.10	5.29	2.9	0.421	0.471	0.137	-
SID Lys, g/d	12.0 ^a	10.2 ^b	12.1 ^a	10.6 ^c	12.2 ^a	10.3 ^c	1.3	<0.001	0.739	<0.001	-
SID Lys, kg	1.22 ^a	1.04 ^b	1.23 ^a	1.08 ^b	1.24 ^a	1.05 ^b	0.10	<0.001	0.529	0.941	-
Feed intake in the farrowing room ⁴											
Duration before farrowing, d	8.4 ^{ab}	9.1 ^b	8.4 ^{ab}	8.5 ^{ab}	8.3 ^{ab}	8.2 ^a	1.2	0.037	0.744	0.073	-
Gestation diet, kg/d	2.51	2.50	2.71	2.74	2.62	2.56	0.27	0.707	0.010	0.719	-
Gestation diet, kg	21.4 ^{ab}	22.6 ^{ab}	22.6 ^{ab}	23.1 ^b	21.8 ^{ab}	20.9 ^a	2.9	0.039	0.541	0.075	-
Duration of lactation, d	28.1 ^{ab}	27.4 ^a	28.3 ^b	27.9 ^{ab}	28.7 ^b	28.6 ^b	1.8	0.037	0.150	0.168	-
Lactation diet, kg/d	6.61 ^a	6.98 ^b	7.06 ^b	7.07 ^b	6.74 ^{ab}	6.48 ^a	1.30	0.046	0.663	0.057	-
Lactation diet, kg	185	191	200	197	193	186	38	0.204	0.362	0.163	-

CF: conventional feeding; PF: precision feeding; SID Lys: Standardized ileal digestible lysine; GL: gestation diet with a low Lys content GH: gestation diet with a high Lys content

¹ RSD = residual standard deviation.

² Fixed effects of the variance analysis model, with initial parity of the sow as a covariate.

³ Welch test for daily data and Student test for gestation data.

⁴ The gestation diet was delivered before farrowing, and the lactation diet thereafter.

^{a, b, c, d} Values within a row that do not share a common superscript are significantly different ($P \leq 0.05$).

Performance of the sow and the litter

As presented in Tableau 5.3, there was no significant effect of the feeding strategy on the initial BW and initial BT ($P > 0.10$). The initial BW increased with average parity from cycle 1 to cycle 3, by + 21 kg on average across cycles ($P < 0.001$). The interaction between the feeding strategy and the cycle was significant on final BW ($P = 0.05$) and final BT ($P < 0.001$), with PF sows being heavier and fatter in cycle 2 (+ 15 kg and + 1 mm compared to CF sows, respectively), and cycle 3 (+ 20 kg and + 3 mm compared to CF sows, respectively). Unlike final BW which was well achieved ($P = 0.60$), observed final BT was significantly different from expected BT ($P = 0.002$), and BT of CF sows was 4 mm lower than the target value in cycle 3 (interaction Strategy x Cycle: $P < 0.001$).

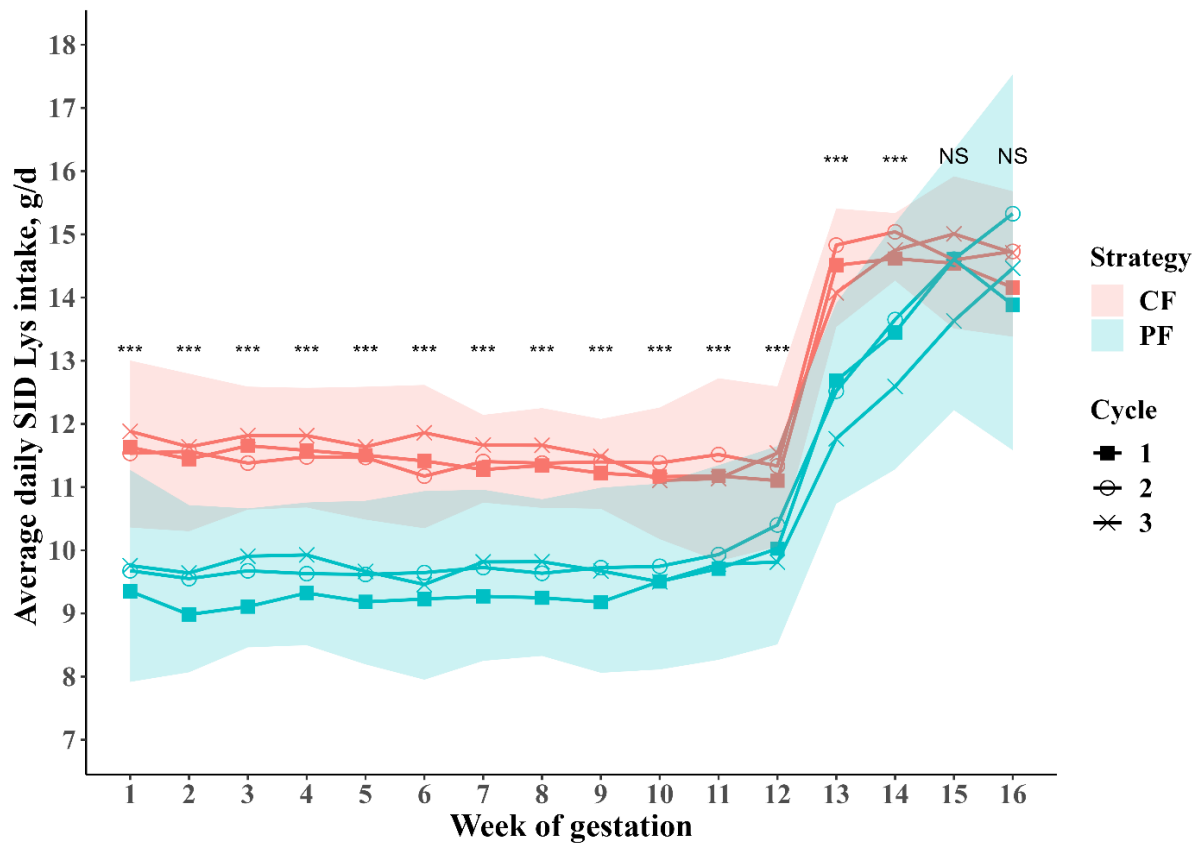


Figure 5.1 : Weekly evolution of the standardized ileal digestible lysine (SID Lys) intake during gestation regarding cycle (1, 2 or 3) and strategy (CF vs. PF). The 'cloud' corresponds to the average standard deviation of the three cycles for each strategy. P value of the Student's test of the effect of the feeding strategy for each week of gestation was performed. (***) = $P < 0.001$; NS = $P > 0.10$) CF: conventional feeding; PF: precision feeding

Additional Table S3 shows the results of sows followed over the 3 gestations. The PF sows were older than CF sows from the beginning of the study, with an initial parity of 2.7 vs. 1.7. Subsequently, PF sows were 20 kg heavier at the start of each gestation. Throughout the study, final BT of PF sows remained stable and close to expected BT, while BT of CF sows decreased and became 4 mm below the expectation at the end of cycle 3 (interaction Strategy x Cycle: $P = 0.004$).

Tableau 5.3 – Observed and expected body weight (BW) and backfat thickness (BT) at gestation group-housed entrance and at maternity entrance regarding feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles

Strategy	Cycle						RSD ¹	P-value			Observed vs. Expected ³
	1		2		3			Strategy ²	Cycle ²	Strategy x Cycle ²	
	CF 30	PF 21	CF 18	PF 17	CF 9	PF 11					
Number of sows	30	21	18	17	9	11					
Parity	2.8	2.9	3.4	3.5	3.7	4.7	0.5	0.899	<0.001	0.666	-
Age, days	566	566	656	652	667	828	4	0.602	<0.001	0.537	-
Expected ⁴											
Final BW ⁵ , kg	271	267	289	288	300	305	11	-	-	-	0.601
Final BT, mm	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	3.7	-	-	-	0.002
Observed											
Initial ⁶ BW, kg	198	200	218	219	220	242	10	0.517	<0.001	0.924	-
Initial ⁶ BT, mm	15.3	15.4	14.3	14.5	12.8	14.5	4.4	0.756	0.139	0.444	-
Final ⁷ BW ⁵ , kg	268 ^a	274 ^{ab}	283 ^b	299 ^c	288 ^{bc}	320 ^d	17	0.879	<0.001	0.045	
Final ⁷ BT, mm	17.9 ^b	18.4 ^b	17.7 ^b	19.7 ^b	14.6 ^a	17.9 ^b	1.4	0.450	0.002	<0.001	

CF: conventional feeding; PF: precision feeding; BW: body weight; BT: backfat thickness

¹ RSD = residual standard deviation.

² Fixed effects of the variance analysis model, with initial parity of the sow as a covariate.

³ Welch test for BT and Student test for BW.

⁴ Expected value simulated with InraPorc model.

⁵ BW: maternal BW + conceptus BW.

⁶ Initial = at the transfer between the service room and the gestation room (3.1 ± 0.5 days of gestation).

⁷ Final = at the transfer between the gestation room and the farrowing room (106.9 ± 0.7 days of gestation).

a, b, c, d Values within a row that do not share a common superscript are significantly different ($P \leq 0.05$).

At farrowing (Tableau 5.4), no significant effect of the cycle and the feeding strategy was observed on litter size (17.5 ± 4.5 total born piglets on average) and individual birth weight (1.43 ± 0.27 kg on average). Litter weight increased by 2.0 kg per cycle ($P = 0.02$). Sows farrowed 2.5 piglets more than expectations based on past results collected in the herd ($P < 0.001$) resulting in a heavier total litter weight than expected (+ 1.5 kg, $P = 0.01$). Over the 3 gestation cycles (Table S4), PF sows delivered 2.6 more live piglets and 1.1 more stillborn piglets, with a cumulated additional litter weight of 5.5 kg compared to CF sows, but this difference was not significant ($P > 0.10$).

After cross-fostering (Tableau 5.4), litter size averaged 13.2 ± 3.2 piglets of which 11.8 ± 2.1 were weaned for both feeding strategies ($P > 0.10$). Litter size and BW of piglets and litters at weaning and ADG per piglet and per litter from birth to weaning were similar for both strategies ($P > 0.10$). The cycle tended to influence the average weight of piglets at weaning ($P = 0.05$) and their ADG ($P = 0.08$), but not the corresponding values at litter scale. For the sows followed over 3 cycles (Table S4), no significant effect of the strategy was observed on their lactation performances ($P > 0.10$).

Tableau 5.4 – Expected and observed litter characteristics at birth and performance observed until weaning regarding feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles

	Cycle						RSD ¹	P-value			Observed vs. Expected ³
	1		2		3			Strategy ²	Cycle ²	x Cycle ²	
Strategy	CF	PF	CF	PF	CF	PF					
Number of sows	30	21	18	17	9	11					
Expectations at birth, per litter											
Total born piglets	14.7	14.6	15.1	15.0	16.0	15.9	4.8	-	-	-	<0.001
Birth weight, kg	21.8	21.5	23.5	23.4	24.7	24.5	1.4	-	-	-	0.014
Observations											
At birth											
Alive piglets	15.4	16.0	16.5	16.1	17.2	19.6	6.0	0.712	0.324	0.411	-
Stillborn piglets	1.1	1.0	1.5	1.2	0.8	0.8	1.0	0.685	0.442	0.406	-
Total born piglets	16.5	17.0	18.0	17.3	18.0	20.5	6.2	0.742	0.238	0.538	-
Birth weight, kg/piglet	1.35	1.39	1.44	1.55	1.52	1.40	0.25	0.337	0.167	0.436	-
Birth weight, kg/litter	21.5	23.0	25.2	26.2	26.2	28.6	7.5	0.741	0.022	0.714	-
After cross-fostering											
Initial litter size	12.8	13.3	13.6	13.5	12.6	13.6	2.8	0.817	0.457	0.980	-
Litter size at weaning	11.4	11.9	12.3	12.2	11.2	11.3	2.2	0.688	0.534	0.983	-
Final ⁴ weight, kg/piglet	7.76	7.84	8.37	8.78	8.31	7.97	0.97	0.235	0.054	0.327	-
Final ⁴ weight, kg/litter	87.7	93.6	103.0	107.0	91.8	90.1	25.8	0.268	0.377	0.559	-
Average daily gain from birth to weaning											
Piglet, g/d	233	241	252	264	252	246	51.4	0.212	0.078	0.299	-
Litter, kg/d	2.81	2.99	3.14	3.31	2.86	2.80	0.84	0.301	0.864	0.620	-

CF: conventional feeding, PF: precision feeding

¹ RSD = residual standard deviation.

² Fixed effects of the variance analysis model, with initial parity of the sow as a covariate.

³ Welch test.

⁴ Final = at weaning.

Feeding and drinking behaviors

Sows ate their daily ration in a single visit, regardless of the cycle or feeding strategy (Tableau 5.5; $P > 0.10$). Feeding visits represented 18% of total visits to the feeder and 55% of the time spent in the feeder. With the succession of gestation cycles, CF sows spent more and more time in the feeder for feeding visits whereas it remained stable for PF sows (interaction Strategy x Cycle: $P < 0.001$). Regarding the gestation cycle, CF sows spent more time in the feeder (i.e., + 1.7, + 12.7, + 8.6 min/d) than PF sows in cycles 1, 2, and 3 respectively (interaction Strategy x Cycle: $P < 0.001$). The feeding strategy affected the number of non-feeding visits, with + 0.3, - 0.2 and + 0.9 additional non-feeding visit from PF than CF sows in cycles 1, 2 and 3, respectively (interaction Strategy x Cycle: $P < 0.001$).

The drinking behavior consisted mainly in drinking visits to the drinking troughs, with 92% of drinking visits taking 98% of the time spent in the drinking trough. The feeding strategy affected the number of drinking and non-drinking visits regarding the gestation cycle ($P < 0.001$). In cycle 1, PF sows visited more often the trough than CF sows, for both drinking and non-drinking visits. The opposite was observed in cycles 2 and 3 ($P < 0.001$). Time spent drinking depended on strategy and gestation cycle (interaction Strategy x Cycle: $P = 0.01$), with PF sows spending more time to drink in cycles 1 and 2 than CF sows and the opposite occurring in cycle 3. The

water intake remained more or less constant for PF sows with 12.3 L/d over the 3 gestation cycles which was not the case for CF sows who consumed 5 L/d more in cycle 3 compared to previous cycles (17.6 vs. 12.6 L/d on average, respectively).

Tableau 5.5 – Effects of the feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles on feeding and drinking behaviors defined through the number of visits and time spent in the automaton per day

Strategy	Cycle						RSD ¹	P-value			Strategy x Cycle ²
	1		2		3			Strategy ²	Day ^{2,3}	Cycle ²	
Number of sows	CF 30	PF 21	CF 18	PF 17	CF 9	PF 11					
Feeding behavior											
Number of visits to the feeder per day											
Total	5.5 ^a	5.7 ^{ab}	5.6 ^{ab}	5.4 ^a	5.9 ^b	6.7 ^c	1.1	0.147	<0.001	0.228	<0.001
Feeding	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	0.411	0.428	0.603	0.519
Non-feeding	4.4 ^a	4.7 ^{ab}	4.6 ^{ab}	4.4 ^a	4.8 ^b	5.7 ^c	1.3	0.096	<0.001	0.129	<0.001
Time spent in the feeder per day, min											
Total	54.9 ^a	53.2 ^a	63.6 ^b	50.9 ^a	66.5 ^c	57.9 ^a _b	3.6	0.949	<0.001	<0.001	<0.001
Feeding	29.9 ^a	29.9 ^a	33.4 ^b	31.5 ^b	35.9 ^c	29.7 ^a	2.0	0.897	<0.001	<0.001	<0.001
Non-feeding	24.9 ^a _b	23.3 ^a	30.2 ^b	19.5 ^a	30.6 ^b	28.2 ^b	4.5	0.334	<0.001	<0.001	<0.001
Drinking behavior											
Number of visits to the trough per day											
Total	10.0 ^b	11.1 ^b	8.9 ^a	7.8 ^a	14.9 ^c	10.7 ^b	1.6	0.840	<0.001	<0.001	<0.001
Drinking	9.3 ^b	10.0 ^b	8.2 ^a	7.5 ^a	13.0 ^c	10.0 ^b	1.4	0.769	<0.001	<0.001	<0.001
Non-drinking	0.7 ^b	1.1 ^b	0.7 ^b	0.3 ^a	1.9 ^c	0.7 ^b	1.2	0.900	<0.001	0.455	<0.001
Time spent in the trough per day, min											
Total	9.7 ^b	10.0 ^b	7.4 ^a	8.4 ^a	9.7 ^b	9.5 ^b	1.3	0.981	<0.001	<0.001	<0.001
Drinking	9.5 ^b	9.8 ^b	7.3 ^a	8.3 ^a	9.6 ^b	9.3 ^b	1.3	0.992	<0.001	<0.001	0.010
Non-drinking	0.2 ^b	0.2 ^b	0.1 ^a	0.1 ^a	0.1 ^a	0.2 ^b	0.7	0.800	<0.001	<0.001	<0.001
Water intake, L/d	13.9 ^b	12.9 ^b	11.4 ^a	10.7 ^a	17.6 ^c	13.6 ^b	1.6	0.810	<0.001	0.622	<0.001

CF: conventional feeding, PF: precision feeding

¹RSD = residual standard deviation.

²Fixed effects of the variance analysis model, with initial parity of the sow as a covariate.

³From day 3 to day 106 of gestation, the following are all followed in the gestating room.

^{a, b, c, d} Values within a row that do not share a common superscript are significantly different ($P \leq 0.05$).

Health

Figure 5.2 is a 3 factors, i.e. cycle, feeding strategy and gestation week. For instance, if the focus is on the dirtiness, there is an orange circle at week 15, cycle 3 and strategy CF meaning that on average around 50% of the body of sows is dirty for the CF sows, on the given week and cycle. Feeding strategy had no effect on the occurrence of lameness and bursitis throughout the different cycles (Figure 5.2; $P > 0.10$). A total of 3.6% of observations reported lameness events in cycle 1, and 1.6% in cycles 2 and 3 (Figure 5.2). There was twice less bursitis observed in cycle 3 than in cycles 1 and 2 (0.30 vs. 0.60 on average; $P < 0.001$) mainly due to a significant drop in the occurrence of bursitis in the second part of gestation of cycle 3 (Figure 5.2). The feeding strategy affected the dirtiness of sows regarding the gestation cycle (interaction Strategy x Cycle: $P = 0.04$). CF sows were dirtier than PF sows in cycle 1, less dirty in cycle 3, and not different from PF sows in cycle 2 (interaction Strategy x Cycle: $P = 0.04$). The gestation week had an impact on sow dirtiness with sows being 56% dirtier over the last 3 weeks of gestation than at the beginning of gestation ($P < 0.001$).

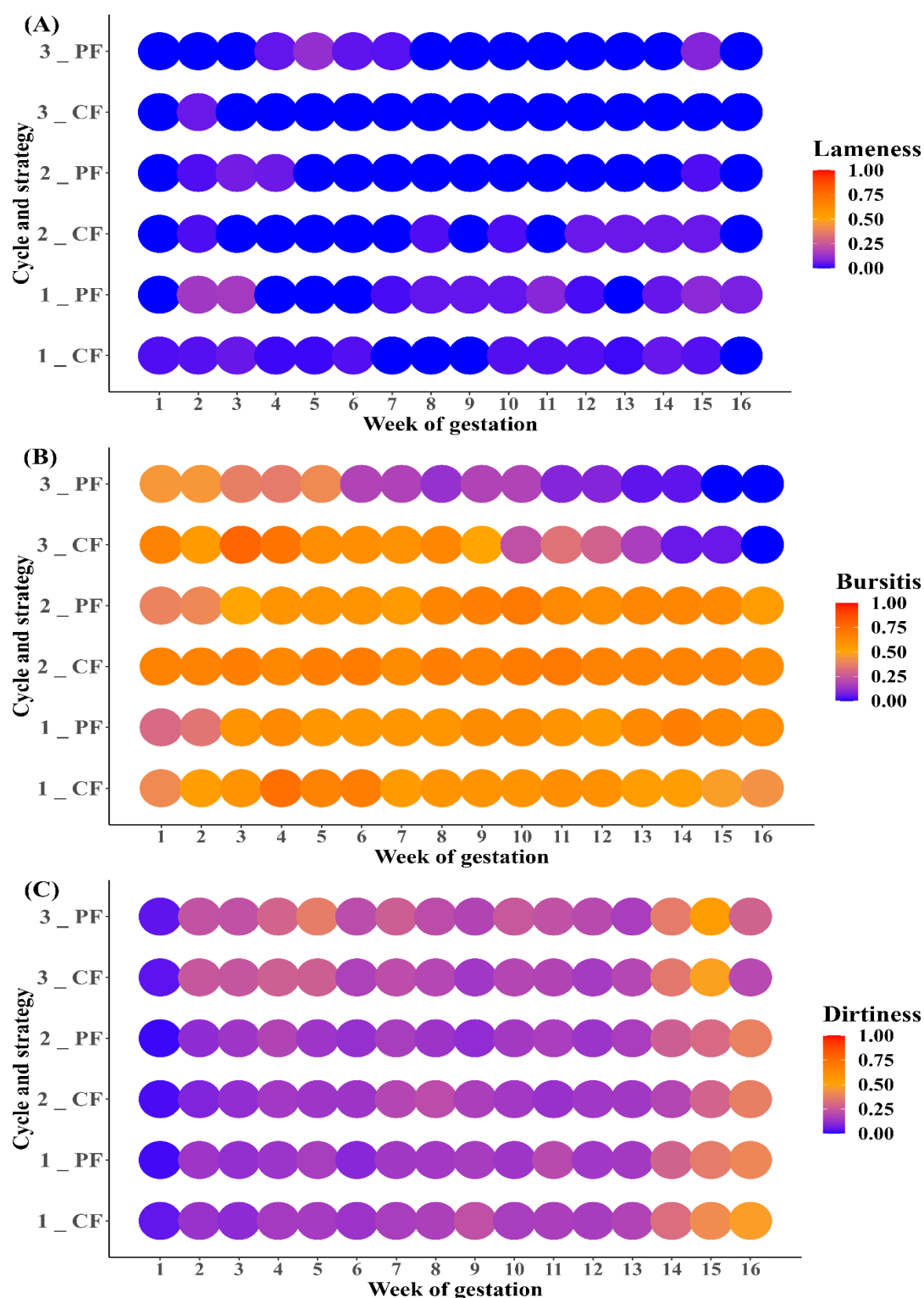


Figure 5.2 : Weekly evolution of (A) lameness (0 = absence vs. 1 = all sows are lamed), (B), bursitis (0 = absence vs. 1 = all sows have bursitis), and (C) dirtiness (0 = 100% sow's body clean vs. 1 = 100% sow's body dirty) observed over gestation and cycles for CF and PF sows. CF: conventional feeding; PF: precision feeding

Feed cost and nutrient excretion

On average, PF sows consumed 43 and 46 kg more feed per gestation in cycles 2 and 3 respectively, which resulted in additional feed costs of + 11 € (\$12) per gestation for PF sows compared to CF sows (Tableau 5.6; interaction Strategy x Cycle: $P = 0.04$). However, as PF sows mainly consumed GL diet, which is low in Lys and less expensive than all diets, the PF strategy has saved 11 € (\$12) per ton of feed ($P < 0.001$). The two feeding strategies resulted in equivalent nitrogen intakes per gestation, but PF sows excreted 207 g (5%) less N per gestation, in particular for cycle 1, than CF sows ($P = 0.009$), with an improved N efficiency by 4.2% compared to CF sows ($P < 0.001$). Nitrogen excretion increased by + 123 g on average by gestation cycle mainly due to an increase in sow parity ($P < 0.001$).

Feed formulation for SID Lys has concomitantly influenced phosphorus excretion through feeding strategies and cycles ($P = 0.02$). Phosphorus excretion stayed stable over the 3 cycles for CF sows but increased by 50 g/cycle on average for PF sows. Phosphorus efficiency was 4.0% greater for PF than CF sows ($P < 0.001$).

Tableau 5.6 – Effect of the feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles on feed costs and nutrient excretions

Strategy	Cycle						RSD ¹	P-value		
	1		2		3			Strategy ²	Cycle ²	Strategy x Cycle ²
	CF	PF	CF	PF	CF	PF				
Number of sows	30	21	18	17	9	11				
Feed cost										
From total feed intake, €	86.6 ^a	91.3 ^a	87.8 ^a	98.9 ^b	88.7 ^a	100.0 ^b	8.6	0.504	0.456	0.037
Assuming GS diet is used, €	87.8 ^a	95.1 ^b	88.9 ^a	104.0 ^c	89.8 ^a	105.0 ^c	9.1	0.197	0.452	0.020
Feed, €/t	335 ^c	326 ^b	335 ^c	324 ^a	335 ^c	323 ^a	1.6	<0.001	0.729	<0.001
Nitrogen balance during gestation										
Intake, kg	5.68	5.70	5.77	6.13	5.82	5.91	0.32	0.346	0.127	0.342
Retained, kg ³	1.24 ^a	1.49 ^{bc}	1.19 ^a	1.54 ^c	1.22 ^a	1.32 ^b	0.16	<0.001	<0.001	0.755
Output, kg ³	4.44 ^b	4.21 ^a	4.58 ^c	4.59 ^c	4.60 ^c	4.59 ^c	0.25	0.009	<0.001	0.147
Efficiency ⁴ , %	21.9 ^b	26.1 ^d	20.6 ^a	25.0 ^c	20.9 ^a	22.2 ^b	1.5	<0.001	<0.001	0.859
Phosphorus balance during gestation										
Intake, kg	1.42 ^a	1.50 ^b	1.45 ^a	1.62 ^c	1.45 ^a	1.58 ^c	0.09	0.006	0.126	0.052
Retained, kg ³	0.27 ^a	0.35 ^{bc}	0.26 ^a	0.37 ^c	0.26 ^a	0.32 ^b	0.04	<0.001	0.006	0.303
Output, kg ³	1.15 ^a	1.15 ^a	1.19 ^{ab}	1.25 ^b	1.19 ^{ab}	1.26 ^b	0.06	0.632	<0.001	0.024
Efficiency ⁴ , %	18.9 ^a	23.2 ^c	18.1 ^a	23.0 ^c	18.0 ^a	20.0 ^b	2.01	<0.001	<0.001	0.580

CF: conventional feeding; PF: precision feeding; GS: standard gestation diet

¹ RSD = residual standard deviation.

² Fixed effects of the variance analysis model, with initial parity of the sow as a covariate.

³ Values simulated with InraPorc model.

⁴ Efficiency calculated as retention/intake.

a, b, c, d Values within a row that do not share a common superscript are significantly different ($P \leq 0.05$).

Discussion

Adequacy of the feeding plan (energy supply)

Whatever the cycle, PF feeding strategy was efficient to make sows achieve the expected BT, in contrast with CF feeding strategy. This result can be partly explained by the fact that PF

sows were delivered more feed than CF sows, representing a difference of 109 kg of feed after 3 gestation cycles. Working with primiparous sows only, Amdi et al. (2013) reported that the impact of feed allowance during gestation was greater than initial BT at insemination on BT at farrowing. Although the PF sows consumed more feed over the 3 gestation cycles, they consumed 550 g less SID Lys mainly due to a 2.2 g/d average reduction over the first 12 weeks of each gestation. Without any difference on performances at farrowing, these results would be related to a decreased amino acid supply in excess as performed with the CF strategy. They are in agreement with those obtained by Stewart et al. (2021) with CF sows receiving the same amount of SID Lys per day on average, and PF sows requirements assessed using the NRC model (NRC, 2012) without accounting for any difference among parities on litter size and weight at farrowing. Solà-Oriol and Gasa (2017) showed that, with the same average piglet birth weight but with 2 additional piglets per litter, SID Lys requirements were increased by 1 and 2 g/d at the end of gestation for gilts and multiparous sows, respectively. Dietary blending proportions had different dynamics according to parity in our experiment. Primiparous sows were supplied less low Lys diet than multiparous sows, whose diet consisted entirely of low Lys diet up to day 80 of gestation. These results are in line with SID Lys requirement dynamics mentioned by Gaillard et al. (2020) according to parity with a slight increase in primiparous sows' requirements associated with maternal growth. The strong increase from day 80 of gestation up to end of gestation, i.e. a decrease of low Lys diet in the dietary blending, for all sows, was due to a switch of requirements from maternal tissue growth or maintenance to fetal and mammary growth but still with a gap between primiparous and multiparous sows due to maternal growth.

In our study, past performances of the herd were used to estimate litter size and litter weight per parity. But the sows performed better than expectation due to the continuous genetic progress for prolificacy, which finally led to a slight underestimation of sows' needs for fetal development. Thomas et al. (2021) suggested an intake of 11 g of SID Lys per day, after observing no impact on performance except with a reduction in the stillbirth rate when the increase in SID Lys reached 18 g/d during gestation. Contrary to this recommendation, and in view of our results and those of Stewart et al (2021), it is therefore possible with precision feeding to considerably reduce Lys intake (an intake between 9 and 10 g SID Lys/d, representing a 17% reduction compared with a supply of 12 g SID Lys/d currently used on commercial farms) over the first 3 months of gestation without impacting sow' performances. This can be a real advantage when the protein-rich ingredients take up a large proportion of the formulation cost.

Litter characteristics and performances (litter size, piglet weight at weaning, ADG) were not affected by the feeding strategy and it was difficult to show significant differences in maternity performance with such small groups, especially for the last gestation cycle 3, with 9 and 11 individuals for the CF and PF strategy respectively. However, these results are in agreement with Hansen et al. (2021) who carried out an experiment similar to ours with only gilts at the start of the trial. These authors also focused on long-term impacts on piglets, i.e. performances up to slaughter and carcass quality. They did not find any significant differences between piglets born from PF or CF sows, except for the ADG after weaning which was greater due to a greater average daily feed intake in pigs born from PF sows. In contrast, Cloutier et al. (2024) reported a positive effect of precision feeding over 3 cycles on stillbirth rate and total piglet mortality before weaning. According to these authors, PF strategy allowed to satisfy the increasing needs for fetal growth at the end of gestation and thus reduced mortality during farrowing. This was not observed in our trial, performed with mixed parity sows. In our trial, CF sows always had greater SID Lys intakes than PF sows during the first 13 weeks of gestation, and equivalent SID Lys intakes to PF sows for the last 2 weeks in the gestation room. PF sows were fed according to their needs, so CF sows were never deficient in SID Lys, so we couldn't expect lower performance, in particular for stillbirth rate, as reported by Thomas et al. (2021). Amdi et al. (2014) reported that fat primiparous sows (19.0 mm on average) had litters with heavier piglets than thin primiparous sows (14.4 mm on average) whatever the daily quantity allowed (3 groups of feed allowance : 1.8 kg/d, 2.5 kg/d or 3.5 kg/d). Due to difference in BT at farrowing between our 2 feeding strategies, we expected to see similar differences but our CF sows were leaner at farrowing of cycle 3 and consumed more during lactation than PF sows. This kind of compensation lead to similar weaning weights of the litters between the strategies. With a total litter weight difference of 5.5 kg at weaning between our 2 feeding strategies over the 3 gestation cycles and a standard deviation of 9.8, more sows per strategy (i.e., 84 instead of 9 or 11) would have been required to prove a significant difference (power t-test) and the effect on mixed parity sows may have been less important than the one obtained on primiparous sows by Amdi et al. (2014).

Precision feeding, effects on feeding and drinking behavior and on sow health

Sows are fed restrictively during gestation, which may affect their behavior and induces stereotypies (D'Eath et al., 2018). However, feed is delivered below ad libitum to avoid sows becoming over-weight or overfat and exhibit health and welfare problems such as lameness, difficult farrowing with a high stillbirth rate (Zhou et al., 2018; Lavery et al., 2019) or reduced lactation feed intake, associated with more important mobilization of maternal reserves during lactation and reproductive failure after weaning (Koketsu et al., 1996). The aim was to preserve

health and to achieve optimal conditions for farrowing and the upcoming lactation, as well as sow's longevity (D'Eath et al., 2018). A change in feeding or drinking behavior could reflect a decreased health status or welfare (Cornou and Kristensen, 2013; Durand et al., 2021). Reduced feed intake below regular feed allowance and time spent feeding would indicate health issues (Gaillard et al., 2021) and may reduce the average birth weight and increase the number of stillbirths (Vargovic et al., 2021a).

In agreement with other studies (Vargovic et al., 2021b; Gaillard and Dourmad, 2022), sows of both feeding strategies in our experiment consumed their ration in a single feeding visit. Compared to other studies (Olsson et al., 2011; Iida et al., 2017; Vargovic et al., 2021b), our sows spent twice much time on their feeding visits regardless of the feeding strategy. It can be attributed to the feeding system used as our values were in the same range as those obtained by Gaillard and Dourmad (2022) and Durand et al. (2023) with the same equipment, i.e. a single-way automatic feeder. This clearly shows that sows modify their feeding behavior according to automatic feeder settings by reducing consumption time when there is more competition for access to the feeder, i.e. more sows per feeder (Olsson et al., 2011). The influence of this parameter on the characteristics of the feeding behavior is much more important than the type of feeding strategy.

Feed intake and duration of feeding visits are not a reliable indicator for anticipating health disorders, but rather for helping farmers to identify animals in need of care (Vargovic et al., 2021b). Non-feeding behaviors are better indicators to detect a change in health or welfare status, and a large variation from the mean value may indicate an event or problem (Gaillard et al., 2021). Indeed, in the trial performed by Durand et al. (2023) with sows facing a feeding challenge (with only one feeder available instead of two), the number and duration of feeding visits remained stable, while the number and duration of non-feeding visits decreased. In our trial, PF sows made more non-feeding visits but spent less time on non-feeding visits than CF sows, with no apparent relation to any deterioration in health status.

Drinking behavior is often characterized by high inter-individual variability and daily intra-individual variability (Massabie, 2001; Rousselière et al., 2017). The amount of water recorded depends on the type of trough and the type of sow management, and also influences water spillage (Junge et al., 2012). In our trial, PF sows consumed less water than CF sows with values twice greater than those reported by Rousselière et al. (2017) but within the same range as reported by Massabie (2001). We may have overestimated water consumption because of spillage which is known for bowl-type troughs (Junge et al., 2012) and our CF sows may have increased their water intake to appease hunger (Massabie, 2001), which was probably more important than in PF sows who consumed more feed during the trial. As cycles 1 and 3 took

place in summer and spring, it might contribute to the greater amount of water used by the sows (for consumption or to wet themselves and increased their evaporative heat loss), compared to cycle 2 which took place in winter.

We used the welfare quality (2009) variables to characterize sows' state of health or welfare, and its evolution during the study. Depending on the week or gestation, the observers were different, which may have had influenced the results obtained, particularly for the occurrence of bursitis, which is not necessarily reliable between observers (Czycholl et al., 2016), unlike the other parameters monitored (Friedrich et al., 2020). We didn't see any effect of the nutritional strategy on health status over the long-term, but the sows' culling policy in the farm might have hidden a possible effect of the nutritional strategy. Contrary to the results obtained by Díaz et al. (2013), with sows housed in group of 8 during the gestation whether on slatted floor or rubber slat mats, we noted an increase in sow dirtiness during the last 3 weeks of gestation with our sows who were kept in the same stable group of 20 over the entire gestation period on concrete floor. Sow dirtiness is greater at mixing when sows are in a dynamic group, and it may be an indicator of poor well-being due to decreased available space per sow (Zurbrigg and Blackwell, 2006) and competition for resting areas. Being heavier at the end of gestation could influence the mobility of sows, which would lie down in available areas without taking into account of the dirtiness of the floor.

The economic and environmental aspects of precision feeding over several cycles

Based on the individual feed intake of the sows in our trial, PF strategy represented an extra cost of + 11 € (\$12) per gestation and per sow compared to the CF strategy. Using an iso-energetic blend of a gestation diet and a lactation diet, i.e. CF strategy used in our experiment, instead of single conventional gestation diet with the same energy and SID Lys intake saved an average of 2.6 € (\$2.8) per gestation and per sow and are in line with results shown by Moehn et al. (2011) when adequate feeding equipment is available. In our trial, PF sows received 37 kg more feed per gestation on average than the CF sows thus explaining the extra cost for PF sows. This additional intake is mainly an energy intake, because even with this significant difference in feed quantity, PF sows consumed 16% less SID Lys per gestation to meet the individual needs of each PF sow. Assuming a similar intake during gestation with both feeding strategies, the PF strategy would have saved 11 € (\$12) per ton of feed, i.e. around 9 € (\$10) per sow for 3 gestation cycles by increasing the proportion of low Lys diet over the first 12 weeks of each gestation. These values are in line with previous studies

(Stewart et al., 2021; Gaillard and Dourmad, 2022) showing a very slight reduction in feed costs by applying a PF strategy when quantity intakes are equivalent.

A PF adjusted for energy and SID Lys reduced the SID Lys intake but resulted in equivalent cumulative N intake and output per gestation in our trial. The dynamics of intake differed according to sow needs, resulting in a 4% improvement in N efficiency per gestation compared to CF strategy. Several studies (Gaillard et al., 2019; Gaillard et al., 2020; Stewart et al., 2021; Gaillard and Dourmad, 2022) highlighted that PF based on energy and protein helps to reduce N intake and output, which is not the case here. This contrast can be related to the greater feed intake by PF sows in our study, which was not the case in previous studies performed in vivo or in silico with iso-energetic intakes for PF and CF sows. A greater feed intake for PF sows led to an increase in fecal N for PF than CF sows. We hypothesized that CF sows with a negative energy balance from feed and over supplies of amino acids led to an increase in urinary N output (Pedersen et al., 2019; Johannsen et al., 2024). This greater urinary N output compensated lower fecal output for CF compared to PF sows which explained the better retention of PF sows despite equivalent of N intakes and outputs for the 2 feeding strategies.

In our trial, phosphorus output of PF sows was greater than CF sows, in line with the results of Stewart et al. (2021) but in contrast with results of Gaillard and Dourmad (2022). To reduce phosphorus excretion into the environment, the adequacy of phosphorus supplies should be also considered in PF, in addition to energy and amino acids, as simulated by Gaillard et al. (2019).

Conclusion

The PF adjusted for energy and Lys over 3 gestation cycles improved nitrogen efficiency by 4% and reduced Lys intake by 16%, without impacting either performance of sows and litters, feeding and drinking behaviors, or health over the trial follow-up period. Precision feeding enabled to better reach body condition targets at farrowing than conventional feeding, which should improve sow longevity. The reduction in feed costs and N outputs by 3% and 5% respectively with the PF strategy would be even more important that the amino acid concentration of the diet used in the CF strategy is high and associated with an important spillage of amino acids. In our study, the effects of precision feeding on other nutrients but amino acid and N intake, like phosphorus, were nuanced, indeed phosphorus supply was not adjusted to requirements but resulted arithmetically from blending diets based on amino acid requirement, with their specific phosphorus contents. Therefore, accounting for phosphorus requirement in PF, in addition to energy and amino acids, is expected to reinforce the benefit of this strategy at the farm level.

Acknowledgements

This project would not have been possible without funding from INRAE and IFIP for Clément RIBAS' PhD grant. The authors would like to thank the staff of the breeding farm, in particular Josselin Delamarre, Yannick Surel and Daniel Boutin, as well as the trainees for their help during the trial.

References

- Amdi, C., L. Giblin, A. A. Hennessy, T. Ryan, C. Stanton, N. C. Stickland, and P. G. Lawlor. 2013. Feed allowance and maternal backfat levels during gestation influence maternal cortisol levels, milk fat composition and offspring growth. *J. Nutr. Sci.* 2:1–10. doi:10.1017/jns.2012.20.
- Amdi, C., L. Giblin, T. Ryan, N. C. Stickland, and P. G. Lawlor. 2014. Maternal backfat depth in gestating sows has a greater influence on offspring growth and carcass lean yield than maternal feed allocation during gestation. *Animal*. 8:236–244. doi:10.1017/S1751731113002073.
- Bates, D. M., M. Mächler, B. Bolker and. S. Walker. 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *J. Stat. Softw.* 67:1-48. doi:10.18637/jss.v067.i01
- Cloutier, L., B. Sauvé, F. Guay, G. Dumas, C. Gaillard, J. Y. Dourmad, A. Simongiovanni, and P. Gagnon. 2024. Impact de l'alimentation de précision en gestation sur la carrière productive de truies suivies pendant trois cycles reproductifs. *Journées Rech. Porcine*. 56:139-144.
- Cornou, C., and A. R. Kristensen. 2013. Use of information from monitoring and decision support systems in pig production: Collection, applications and expected benefits. *Livest. Sci.* 157:552–567. doi:10.1016/j.livsci.2013.07.016.
- Czycholl, I., C. Kniese, K. Büttner, E. grosse Beilage, L. Schrader, and J. Krieter. 2016. Interobserver reliability of the 'Welfare Quality® Animal Welfare Assessment Protocol for Growing Pigs. *SpringerPlus*. 5:1114. doi:10.1186/s40064-016-2785-1.
- D'Eath, R. B., S. Jarvis, E. M. Baxter, and J. Houdijk. 2018. 7 - Mitigating hunger in pregnant sows. In: M. Špinka, editor, *Advances in Pig Welfare*. Woodhead Pub., Cambridge, England. p. 199–234.
- Díaz, J. A. C., A. G. Fahey, A. L. KilBride, L. E. Green, and L. A. Boyle. 2013. Longitudinal study of the effect of rubber slat mats on locomotory ability, body, limb and claw lesions, and dirtiness of group housed sows. *J. Anim. Sci.* 91:3940–3954. doi:10.2527/jas.2012-5913.
- Dourmad, J. Y., M. Étienne, A. Valancogne, S. Dubois, J. van Milgen, and J. Noblet. 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of sows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 143:372–386. doi:10.1016/j.anifeedsci.2007.05.019.
- Durand, M., J. Y. Dourmad, A. Julienne, M. Couasnon, and C. Gaillard. 2023. Effects of a competitive feeding situation on the behaviour and energy requirements of gestating sows. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 261:1–11. doi:10.1016/j.applanim.2023.105884.
- Durand, M., J. Y. Dourmad, C. Largouët, C. Tallet, and C. Gaillard. 2021. Alimentation de précision des truies gestantes : prise en compte de la santé, du comportement et de l'environnement. *INRAE Prod. Anim.* 34:293–304. doi:10.20870/productions-animales.2021.34.4.5369.
- Friedrich, L., J. Krieter, N. Kemper, and I. Czycholl. 2020. Interobserver reliability of measures of the Welfare Quality® animal welfare assessment protocol for sows and piglets. *Anim. Welf.* 29:323–337. doi:10.7120/09627286.29.3.323.
- Gaillard, C., and J. Y. Dourmad. 2022. Application of a precision feeding strategy for gestating sows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 287:1–13. doi:10.1016/j.anifeedsci.2022.115280.
- Gaillard, C., M. Durand, C. Largouët, J. Y. Dourmad, and C. Tallet. 2021. Effects of the environment and animal behavior on nutrient requirements for gestating sows: Future improvements in precision feeding. *Anim. Feed Sci. Technol.* 279:1–17. doi:10.1016/j.anifeedsci.2021.115034.
- Gaillard, C., R. Gauthier, L. Cloutier, and J. Y. Dourmad. 2019. Exploration of individual variability to better predict the nutrient requirements of gestating sows. *J. Anim. Sci.* 97:4934–4945. doi:10.1093/jas/skz320.
- Gaillard, C., N. Quiniou, R. Gauthier, L. Cloutier, and J. Y. Dourmad. 2020. Evaluation of a decision support system for precision feeding of gestating sows. *J. Anim. Sci.* 98:1–12. doi:10.1093/jas/skaa255.
- Gu, Y., A. P. Schinckel, and T. G. Martin. 1992. Growth, development, and carcass composition in five genotypes of swine. *J. Anim. Sci.* 70:1719–1729. doi:10.2527/1992.7061719x.

- Hansen, L. L., V. Stewart, I. B. Mandell, and L.-A. Huber. 2021. Precision feeding gestating sows: effects on offspring growth performance and carcass and loin quality at slaughter. *Transl. Anim. Sci.* 5:1–13. doi:10.1093/tas/txab227.
- Iida, R., C. Piñeiro, and Y. Koketsu. 2017. Behavior, Displacement and Pregnancy Loss in Pigs under an Electronic Sow Feeder. *J. Agric. Sci.* 9:43–53. doi:10.5539/jas.v9n12p43.
- Johannsen, J. C., M. T. Sørensen, P. K. Theil, T. S. Bruun, C. Farmer, and T. Feyera. 2024. Optimal protein concentration in diets for sows during the transition period. *J. Anim. Sci.* 102: 1-16 doi:10.1093/jas/skae082.
- Junge, M., D. Herd, D. Jezierny, E. Gallmann, and T. Jungbluth. 2012. Water intake and drinking behavior of pregnant sows. IX International Livestock Environment Symposium. 1–6.
- Koketsu, Y., G. D. Dial, J. E. Pettigrew, and V. L. King. 1996. Feed intake pattern during lactation and subsequent reproductive performance of sows. *J. Anim. Sci.* 74:2875–2884. doi:10.2527/1996.74122875x.
- Lavery, A., P. G. Lawlor, E. Magowan, H. M. Miller, K. O'Driscoll, and D. P. Berry. 2019. An association analysis of sow parity, live-weight and back-fat depth as indicators of sow productivity. *Animal.* 13:622–630. doi:10.1017/S1751731118001799.
- Massabie, P. 2001. L'abreuvement des porcs. *Techniporc* 24:9–14.
- van Milgen, J., and J. Y. Dourmad. 2015. Concept and application of ideal protein for pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:1–11. doi:10.1186/s40104-015-0016-1.
- Moehn, S., D. Franco, C. Levesque, R. Samuel, and R. O. Ball. 2011. New energy and amino acid requirements for gestating sows. *Banff Pork Seminar Proceedings.* 22:157-166.
- Niemi, J. K., P. Bergman, S. Ovaska, M.-L. Sevón-Aimonen, and M. Heinonen. 2017. Modeling the costs of postpartum dysgalactia syndrome and locomotory disorders on sow productivity and replacement. *Front. Vet. Sci.* 4:1–12. doi:10.3389/fvets.2017.00181.
- Noblet, J., J. Y. Dourmad, and M. Etienne. 1990. Energy utilization in pregnant and lactating sows: modeling of energy requirements. *J. Anim. Sci.* 68:562–572. doi:10.2527/1990.682562x.
- Noblet, J., X. S. Shi, and S. Dubois. 1993. Metabolic utilization of dietary energy and nutrients for maintenance energy requirements in sows: basis for a net energy system. *Br. J. Nutr.* 70:407–419. doi:10.1079/BJN19930135.
- NRC. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*. 11th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Olsson, A.-Ch., M. Andersson, J. Botermans, D. Rantzer, and J. Svendsen. 2011. Animal interaction and response to electronic sow feeding (ESF) in 3 different herds and effects of function settings to increase capacity. *Livest. Sci.* 137:268–272. doi:10.1016/j.livsci.2010.10.014.
- Pedersen, T. F., C. Y. Chang, N. L. Trottier, T. S. Bruun, and P. K. Theil. 2019. Effect of dietary protein intake on energy utilization and feed efficiency of lactating sows. *J. Anim. Sci.* 97:779–793. doi:10.1093/jas/sky462.
- Pinheiro J. C., and D. M. Bates. 2000. Linear mixed-effects models. In: Springer, editor, *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. Springer, New York, NY. p. 1-270.
- 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 Rech. Porcine.* 48:207-212.
- Quiniou, N., A.-L. Guillou, S. Danilo, S. Boulot, and H. Quesnel. 2018. Conséquences sur la truie et sa portée de la distribution d'aliment de gestation ou de lactation de l'entrée en maternité à la mise bas. *Journées Rech. Porcine.* 50:107-112.
- R Core Team. 2022. *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.2. 2). R Foundation for Statistical Computing.
- Rousselière, Y., A. Hémonic, and M. Marcon. 2017. Monitoring of the individual drinking behavior of healthy weaned piglets and pregnant sows. *Eur. Conf. on Precis. Livest. Farming.* 8:12-14.
- Solà-Oriol, D., and J. Gasa. 2017. Feeding strategies in pig production: Sows and their piglets. *Anim. Feed Sci. Technol.* 233:34–52. doi:10.1016/j.anifeedsci.2016.07.018.
- Stewart, V., R. Q. Buis, B. Christensen, L. L. Hansen, C. F. M. De Lange, I. B. Mandell, and L.-A. Huber. 2021. The effects of precisely meeting estimated daily energy and lysine requirements for gestating sows over three consecutive pregnancies on sow reproductive and lactation performance. *Transl. Anim. Sci.* 5:1–13. doi:10.1093/tas/txab226.
- Thomas, L. L., L. K. Herd, R. D. Goodband, M. D. Tokach, J. C. Woodworth, J. M. DeRouchey, S. S. Dritz, M. A. D. Goncalves, and D. B. Jones. 2021. Effects of increasing standardized ileal digestible lysine during gestation on reproductive performance of gilts and sows. *Animal.* 15:1–8. doi:10.1016/j.animal.2021.100221.

- Vargovic, L., S. Hermes, R. Z. Athorn, and K. L. Bunter. 2021a. Feed intake and feeding behaviour traits of gestating sows are associated with undesirable outcomes. *Livest. Sci.* 249:1–10. doi:10.1016/j.livsci.2021.104526.
- Vargovic, L., S. Hermes, R. Z. Athorn, and K. L. Bunter. 2021b. Feed intake and feeding behavior traits for gestating sows recorded using electronic sow feeders. *J. Anim. Sci.* 99:1–12. doi:10.1093/jas/skaa395.
- Welfare Quality®. 2009. Welfare Quality® assessment protocol for pigs. Welfare Quality® Consortium, Lelystad, The Netherlands.
- Young, M. G., M. D. Tokach, F. X. Aherne, R. G. Main, S. S. Dritz, R. D. Goodband, and J. L. Nelssen. 2004. Comparison of three methods of feeding sows in gestation and the subsequent effects on lactation performance. *J. Anim. Sci.* 82:3058–3070. doi:10.2527/2004.82103058x.
- Zhou, Y., T. Xu, A. Cai, Y. Wu, H. Wei, S. Jiang, and J. Peng. 2018. Excessive backfat of sows at 109 d of gestation induces lipotoxic placental environment and is associated with declining reproductive performance. *J. Anim. Sci.* 96:250–257. doi:10.1093/jas/skx041.
- Zurbrugg, K., and T. Blackwell. 2006. Injuries, lameness, and cleanliness of sows in four group-housing gestation facilities in Ontario. *J. Swine Health Prod.* 14:202–206.

Supplementary material

Table S1. Feed allowance (kg/d) for conventional feeding strategy according to the parity, phase¹ and feeding level

Parity	1			2			3+		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Feeding level									
Small	2.2	2.2	3.1	2.3	2.3	3.2	2.4	2.4	3.1
Medium	2.4	2.4	3.1	2.4	2.4	3.2	2.5	2.5	3.1
High	2.8	2.5	3.1	2.8	2.5	3.2	2.9	2.7	3.3

¹ Phase 1: from insemination to day 35 of gestation, Phase 2: from day 36 to day 85 of gestation, Phase 3: from day 86 to day 107 of gestation.

Table S2. Cumulative intakes observed over 3 cycles in the gestation room for sows followed over 3 cycles

Strategy	CF	PF	SE	P-value ¹
Number of sows	9	11		
Feed, kg	793	902	15	<0.001
SID Lysine, kg	3.73	3.18	0.1	<0.001

CF: conventional feeding; PF: precision feeding.

¹ Student test.

Table S3. Observed and expected body weight (BW) and backfat thickness (BT) at gestation group-housed entrance and at maternity entrance regarding feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles from data collected on sows studied over 3 cycles

Strategy Number of sows	Cycle						RSD ¹	P-value			
	1		2		3			Strategy ²	Cycle ²	Strategy x Cycle ²	Observed vs. Expected ³
	CF 9	PF 11	CF 9	PF 11	CF 9	PF 11					
Parity	1.7	2.7	2.7	3.7	3.7	4.7	0.5	0.476	<0.001	0.533	-
Expected ⁴											
Final BW ⁵ , kg	257	271	284	292	300	305	12	-	-	-	0.661
Final BT, mm	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	3.5	-	-	-	<0.001
Observed											
Initial ⁶ BW, kg	179	199	207	223	220	242	10	0.313	<0.001	0.978	-
Initial ⁶ BT, mm	13.9	14.4	12.9	13.7	12.8	14.5	2.5	0.654	0.117	0.159	-
Final ⁷ BW ⁵ , kg	256	276	276	300	288	320	13	0.565	<0.001	0.101	
Final ⁷ BT, mm	16.9 ^b	17.5 ^b	16.0 ^{ab}	17.9 ^b	14.6 ^a	17.9 ^b	1.4	0.354	0.001	0.004	

CF: conventional feeding; PF: precision feeding.

¹ RSD = residual standard deviation.

² Fixed effects of the variance analysis model, with initial parity of the sow as a covariate.

³ Welch test for BT and Student test for BW.

⁴ Expected value simulated with enhanced version of InraPorc model (Dourmad et al., 2008) updated for gestating sows (Gaillard et al., 2020) with sow data at insemination.

⁵ BW: maternal BW + conceptus BW.

⁶ Initial = at gestation group-housed entrance (3.1 ± 0.5 days of gestation).

⁷ Final = at maternity entrance (106.9 ± 0.7 days of gestation).

^{a, b, c, d} Values within a row that do not share a common superscript are significantly different ($P \leq 0.05$).

Table S4. Expected and observed litter characteristics at birth and performance observed until weaning regarding feeding strategy (CF vs. PF) through the different cycles from data collected on sows studied over 3 cycles

Strategy	Cycle						RSD ¹	P-value			Observed vs. Expected ³
	1		2		3			Strategy ²	Cycle ²	x Cycle ²	
Number of sows	CF	PF	CF	PF	CF	PF					
Expectations at birth, per litter	9	11	9	11	9	11					
Total born piglets	14.1	14.8	15.0	15.2	16.0	15.9	5.0	-	-	-	<0.001
Birth weight, kg	21.3	22.0	23.5	23.7	24.7	24.5	1.4	-	-	-	<0.001
Observations											
At birth											
Alive piglets	15.3	17.5	18.8	16.7	17.2	19.6	4.7	0.721	0.262	0.857	-
Stillborn piglets	0.9	0.9	1.1	1.4	0.8	0.8	1.1	0.843	0.786	0.929	-
Total born piglets	16.2	18.5	19.9	18.1	18.0	20.5	4.6	0.786	0.290	0.839	-
Birth weight, kg/piglet	1.44	1.42	1.43	1.54	1.52	1.40	0.29	0.484	0.381	0.361	-
Birth weight, kg/litter	22.3	25.8	25.2	26.2	26.2	28.6	5.7	0.231	0.055	0.719	-
After cross-fostering											
Initial litter size	11.3	13.2	14.7	12.7	12.6	13.6	2.4	0.430	0.143	0.542	-
Litter size at weaning	12.2	12.4	13.1	12.1	11.2	11.3	1.6	0.880	0.111	0.985	-
Final ⁴ weight, kg/piglet	7.86	8.01	8.74	9.03	8.31	7.97	0.85	0.391	0.159	0.259	-
Final ⁴ weight, kg/litter	95.7	97.2	115.0	109.0	91.8	90.1	19.0	0.925	0.575	0.756	-
Average daily gain from birth to weaning											
Piglet, g/d	234	253	262	273	252	246	42	0.206	0.216	0.185	-
Litter, kg/d	3.00	3.13	3.43	3.35	2.86	2.80	0.59	0.648	0.547	0.521	-

CF: conventional feeding; PF: precision feeding

¹ RSD = residual standard deviation.

² Fixed effects of the variance analysis model, with initial parity of the sow as a covariate.

³ Welch test.

⁴ Final = at weaning.

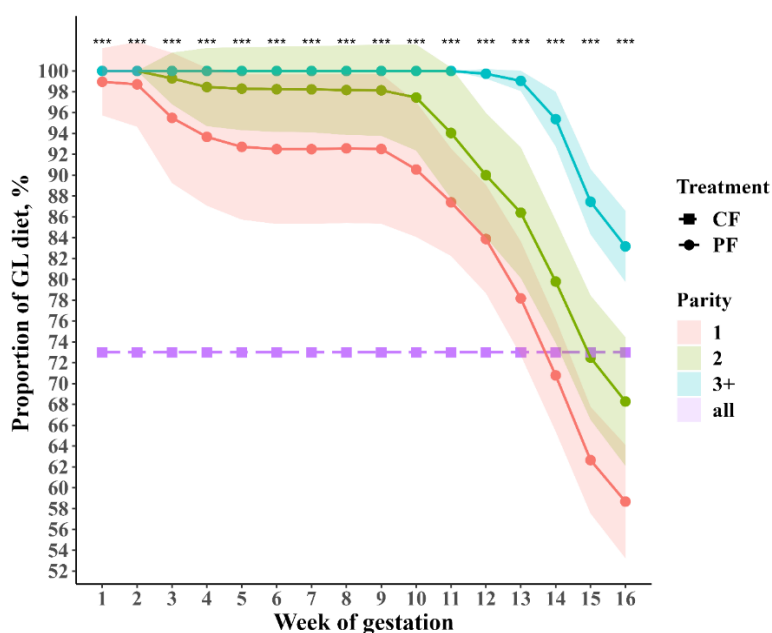


Figure S1. Weekly evolution of the proportion of gestation diet with low Lys content (GL diet) in the feed blend during gestation regarding parity class (1, 2 or 3+) and strategy (CF vs. PF). The 'cloud' corresponds to the average standard deviation. P value of the one way anova test by parity class and week of gestation was performed. (***) = $P < 0.001$ CF: conventional feeding; PF: precision feeding all: all parities from CF strategy are grouped because values are the same for all sows.

6. Application d'une alimentation sur mesure des truies gestantes ajustée en énergie, acides aminés et minéraux sur trois cycles consécutifs et effets sur les performances en maternité, le statut minéral des truies et les rejets environnementaux

Les résultats de cette partie sont issus d'un article publié dans *Animal* en août 2025 (Ribas, C., Gaillard, C., Quiniou, N., 2025. Precision feeding of sows over three consecutive gestations adjusted for energy, amino acids and minerals on sow performances and a marker of bone resorption. *Animal* 19, 101638. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101638>).

Résumé :

Fournir un unique aliment aux truies gestantes n'est pas suffisant pour couvrir la variabilité des besoins individuels et journaliers des truies au cours de la gestation. Un cumul d'apport déséquilibré en minéraux décroît les performances globales du troupeau de truies. Un déficit en minéraux est particulièrement critique pendant la lactation, où la mobilisation des os s'intensifie, et durant la gestation, quand elle devrait se rétablir. Des apports en minéraux en excès influencent les rejets environnementaux et les résultats économiques. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'influence d'une stratégie d'alimentation sur mesure (**PF**) ajustée sur l'énergie, les acides aminés et le P durant trois cycles reproductifs expérimentaux sur les performances productives des truies, la balance nutritionnelle, la santé et le statut osseux. La stratégie PF correspond à un ajustement journalier des apports aux besoins individuels en quantité (énergie) et qualité, incluant les acides aminés (lysine digestible iléale standardisée ; **Lys-DIS**) et les minéraux (digestibilité totale apparente du P ; **ATTD-P**). Deux bandes de 28 truies gestantes Landrace x Large White ont été réparties 7 jours après insémination dans une des deux stratégies alimentaires (PF vs. une stratégie d'alimentation standard avec un unique aliment ajusté sur le besoin individuel en énergie ; **SF**) selon leur rang de portée, leur poids et leur épaisseur de lard dorsal (**ELD**). La stratégie PF a consisté en un mélange de deux aliments iso-énergie nette (**EN** ; 9,0 MJ/kg, 2,6 g/kg ATTD-P avec une teneur basse 3,3 g/kg ou élevée 8,5 g/kg de Lys-DIS, respectivement) avec un alimentateur automatique au niveau individuel et journalier jusqu'au jour 80 de gestation. Durant le dernier mois de gestation, un aliment supplémentaire (4,0 g/kg ATTD-P) a été utilisé dans le mélange pour s'assurer que l'augmentation du besoin en P soit couvert. Au contraire, les truies SF ont été alimentées avec un unique aliment tout au long de la gestation (9,0 MJ/kg EN, 2,6 g/kg ATTD-P et 4,7 g/kg Lys-DIS). L'ingestion de Lys-DIS

sur trois gestations consécutives était 18 % ($P < 0,001$) plus faible pour les truies PF que SF sans réduction des performances à la mise-bas ($P > 0,10$). La stratégie PF réduit les coûts alimentaires de 5 €/t ($P < 0,001$). Seulement durant la dernière semaine de gestation, l'ingéré journalier de ATTD-P était 1,5 g plus élevé pour les truies PF que SF ($P < 0,001$). La stratégie alimentaire n'a pas influencé l'ingestion totale sur la gestation de ATTD-P ou la concentration urinaire de télopeptide C-terminal du collagène de type I (**CTX**), un marqueur de résorption osseuse ($P > 0,10$). Ajuster les apports aux besoins en P de la truie seulement sur le dernier mois de gestation répond mieux aux besoins nutritionnels, n'a pas d'effets long-terme sur les performances à la mise-bas et n'a pas réduit la résorption osseuse comparé à une stratégie SF ajustée sur l'énergie.

Introduction

Due to high variability in requirements among sows and changes that occur during gestation, a standard feeding (**SF**) strategy that supplies only one diet during gestation does not meet the individual and daily nutrient requirements throughout this stage (Solà-Oriol and Gasa, 2017). Thus, precision feeding (**PF**) was developed to supply the appropriate amounts of each nutrient at the right time to meet the individual needs of sows. Automatic feeders that have multiple feed hoppers can supply a mixture of diets whose composition can change daily.

In one study, applying a PF strategy adjusted for total energy and daily amino acid requirements throughout gestation decreased the cost of feed slightly (by 8 €/ton) but N output greatly (by 18.5%) compared to those of a SF strategy (Gaillard and Dourmad, 2022). Over three consecutive gestations in another study, a PF strategy met the objective for backfat thickness (**BT**) at farrowing and increased N-use efficiency without decreasing sow performance compared to a SF strategy with a single diet supplied in smaller amounts throughout gestation (Ribas et al., 2024). As the dynamics of mineral requirements during gestation differ slightly from those of amino acid requirements, considering these nutrients in PF could improve performances and/or environmental impacts (Gaillard et al., 2020). Requirements of P and Ca can be estimated with factorial models recently developed for sows (Bikker and Blok, 2017; Gaillard et al., 2019; Quiniou et al., 2021). Furthermore, a new approach was developed to assess the adequacy of P supplies to sows by analysing P in spot urine samples (Greze-Capdeville and Crenshaw, 2021). Urine samples can also be used to assess the mineral status of sows by analysing bone-mineralisation biomarkers, such as C-terminal telopeptide of type I collagen (**CTX**) (i.e., a marker of bone resorption). During

lactation, bones demineralise greatly due to mineral output exceeding mineral intake. Output of Ca in milk is especially high, which results in bone resorption that leads indirectly to bone P mobilisation (Grez-Capdeville and Crenshaw, 2022). Subsequently, mineral reserves must be recovered after weaning. Bone minerals are recovered especially during early and mid-gestation, when mineral supplies exceed the mean requirements calculated for all sows (Heurtault et al., 2024a). In contrast, bones may be resorbed during late gestation, when Ca and P supplies lie below requirements, which are particularly high during the first parity (Van Riet et al., 2016) and for prolific sows (Dourmad et al., 2021b). Not recovering minerals at the beginning and a mineral deficiency at the end of gestation could weaken bones, which are a body compartment whose minerals are mobilised greatly during lactation. At worst, low bone quality results in lameness or fractures, and thus to early culling (Van Riet et al., 2013). In both gilts (Floradin et al., 2022) and sows (Heurtault et al., 2024a), high bone mobilisation over short periods can be recovered rapidly. However, long-term effects of repeated bone mobilisation on sows' overall bone status, the extent to which bone mineral reserves are recovered and performance at farrowing remain unknown.

The objective of this study was to assess the influence of a PF strategy adjusted for energy, amino acids and minerals on an individual and daily basis during gestation on sow performances at farrowing and during lactation, as well as on sow mineral status, over three consecutive gestations, compared to those of a SF strategy. We hypothesised that the PF strategy would result in lower N output, bone resorption during late gestation and feed costs over the long term than those of the SF strategy, without influencing farrowing performances.

Material and methods

Experimental design and animals

The experiment was performed at the IFIP-Institut du Porc experimental pig station, Romillé, France, from February 2023 to April 2024. It included two batches of 28 mixed-parity crossbred Landrace × Large White gestating sows, with a 3-week delay between inseminations in each batch. The two batches were studied over three reproductive experimental cycles (i.e., gestation plus lactation). Seven days after the first insemination in the first cycle, sows were grouped into 14 pairs based on parity, BW and BT without taking into account the historical data of the multiparous sows in the batch. Within each pair, one sow was allocated to the SF strategy and the other to the PF strategy until the end of the experiment. Some sows were culled between reproductive cycles as part of routine herd management, mainly due to age, health or reproductive issues. These sows were replaced by gilts or sows from batches not

already under study, and which were thus studied for only one or two cycles. The fates of the sows varied during the experiment (Figure 6.1).

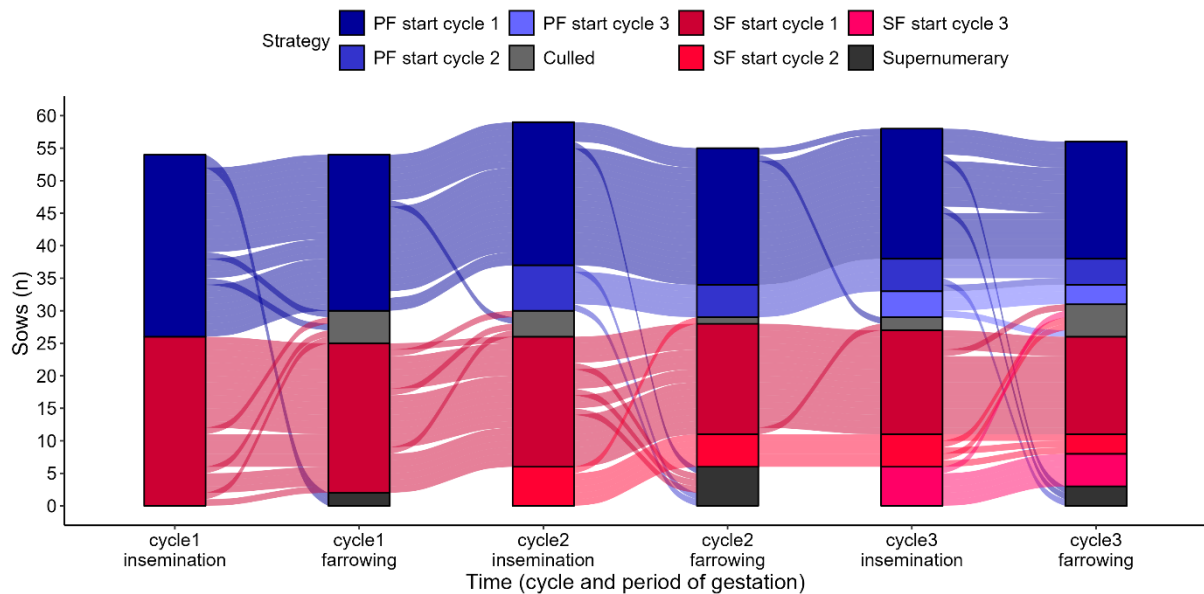


Figure 6.1 : The number of sows in the standard feeding (SF) and precision feeding (PF) strategies throughout the three experimental cycles. Sows are ordered by parity in each group. Culled and supernumerary sows were removed from the experiment.

Modelling requirements

For each gestating sow, an upgraded version of the InraPorc mechanistic model (Dourmad et al., 2008) was used to estimate energy requirements (Gaillard et al., 2019). The total energy requirements during gestation were estimated based on a factorial approach that used individual age, BW and BT at the beginning of gestation and the objectives at farrowing (i.e., litter weight, sows' net BW and BT) as inputs. Maintenance, conceptus and maternal reserves of protein and fat were considered in the mechanistic model. The energy required for physical activity was estimated (Dourmad et al., 2008) assuming that sows spent a mean of 5 h standing per day when kept in individual stalls or 6 h when group-housed, to represent the additional activity that occurs in group housing (Theil et al., 2023). The BW target after farrowing was estimated using historical data from the herd and a calibrated Weibull equation for BW as a function of age at farrowing (Quiniou, 2019). Litter size and litter weight at birth were also estimated using historical data, assuming a litter size of 17 or 18 piglets, weighing 1.35 or 1.45 kg each, for primiparous and multiparous sows, respectively. For PF sows, daily standardised ileal digestible lysine (**SID-Lys**) requirements were estimated using the nutritional model of

Gaillard et al. (2019). The model developed by Quiniou et al. (2021) was used to estimate digestible P requirements, via apparent total tract digestibility (**ATTD**)-P during gestation (Supplementary Table S1).

Housing conditions and feeding equipment

Sows were housed in individual stalls from insemination to day 25 of gestation (on a Friday, 4 weeks after insemination). The daily feed allowance was weighed and delivered manually to an individual trough in two meals per day (except on Sundays, when sows received only one meal). On day 25 of gestation, sows were moved to another room and group-housed in a pen managed in a dynamic way, with a maximum of three batches of sows living together. The second batch arrived in the pen 3 weeks after the first batch.

The gestation pen measured 22.25 m × 9.12 m, had a fully slatted floor and was equipped with two automatic two-way feeders (Selfimat, Asserva, Lamballe, France) and two automatic weighing scales (Asserva, Lamballe, France). Each feeder was equipped with four hoppers to deliver a single diet or a mixture of several diets in individual proportions. Individual requirements were estimated using the nutritional model on a computer connected to the automatic feeders. The feeders supplied portions of 400 g to multiparous sows and 200 g to primiparous sows, with the different diets mixed to meet the individual daily feeding plan loaded automatically at 1200 h each day. If the total daily feed allowance was not an integer multiple of the desired portion (i.e., 400 or 200 g), the number of potential desired portions was rounded up to the nearest integer, which decreased the weight of each portion (e.g., a daily feed allowance of 3.5 kg yielded 9 portions of 389 g). A new portion was supplied if the sow consumed the previous one within 150 s and still needed to consume more that day. The settings and accuracy of the feeders were checked monthly using standard weights to ensure that their accuracy remained within 20 g per portion.

All sows were moved to the farrowing room on day 108 of gestation (on a Thursday, the week before farrowing) and housed in individual stalls. From day 108 of gestation to farrowing, the experimental diets were mixed and delivered manually twice a day. One week after farrowing, the stalls were opened to allow each sow to move inside its pen (2.50 m × 2.70 m). Each farrowing pen was equipped with an automatic feeder (Gestal Quattro, JYGA Technologies Inc., Québec, Canada) to monitor and record the feed delivered after farrowing. Regardless of the housing system, sows had free access to water in a bowl in the gestation and lactation pens.

Diets and feeding strategies

Four experimental gestation diets were formulated to contain 9.0 MJ/kg of net energy (**NE**) and differing contents of SID-Lys (standard: 4.7 g/kg, low: 3.3 g/kg or high: 8.5 g/kg) and ATTD-P (standard: 2.6 g/kg or high: 4.0 g/kg). Diet S was formulated with standard SID-Lys and ATTD-P contents. Diet L_{Lys}-S_P was formulated with a low SID-Lys and standard ATTD-P content. Diet H_{Lys}-S_P was formulated with a high SID-Lys and standard ATTD-P content. Diet H_{Lys}-H_P was formulated with high SID-Lys and ATTD-P contents. The chemical and nutritional characteristics of the ingredients in the diets varied (Tableau 6.1 and Tableau 6.2, respectively). Concentrations of essential amino acids in each diet followed the ideal protein profile for gestating sows, with the minimum ratio expressed as a percentage of SID-Lys according to Van Milgen and Dourmad (2015). A fixed ratio of 3.7 g total Ca per g of ATTD-P was set for all diets.

Diet S was supplied to all sows from insemination to day 25 of gestation, when they were fed manually. From day 25 of gestation to farrowing, sows allocated to the SF strategy received only diet S, whereas those allocated to the PF strategy received a mixture of diets. From days 25-80 of gestation, PF sows received a mixture of diets L_{Lys}-S_P and H_{Lys}-S_P to meet individual amino acid requirements. From day 80 until farrowing, PF sows received a mixture of diets L_{Lys}-S_P, H_{Lys}-S_P and H_{Lys}-H_P in proportions adapted daily to meet individual amino acid and mineral requirements. After farrowing and until weaning, all sows received the standard lactation diet (Tableau 6.1).

Tableau 6.1 – Ingredients in the gestation and lactation diets of sows (on an as-fed basis)

Phase Diet	Gestation				Lactation
	S	L _{Lys} -S _P	H _{Lys} -S _P	H _{Lys} -H _P	Standard
Ingredients (g/kg)					
Barley	268	288	180	171	180
Wheat	180	180	180	184	180
Maize	180	180	180	216	312
Wheat bran	110	110	114	40	40
Sugar beet pulp, dehydrated	100	100	61	55	50
Rapeseed meal	50	39	50	50	20
Soybean meal 48%	27	10	145	145	126
Unhulled sunflower seed meal	28	37	21	62	20
Soya beans, extruded	0	0	0	0	15
Soya bean hulls	0	0	10	0	0
Sugar beet molasses	20	20	20	20	10
Soya bean oil	5	5	5	5	8
Limestone	13.4	13.7	14.1	24.2	11.4
Monocalcium phosphate	3.5	3.7	2.8	10.4	7.6
Salt	4	4	4	4	4
Sodium bicarbonate	4.4	5.1	2	2.6	0
Premix ¹	4	4	4	4	4
L-Lysine 50	1.9	0	4.2	4.2	5.7
Methionine hydroxy analog	0	0	0.9	0.7	0.9
L-Threonine	0.3	0	1.5	1.4	1.2
L-Tryptophane	0	0	0	0	2.3
L-Valine	0	0	0	0	1.4
Phytase	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Abbreviations: S = standard; L_{Lys}-S_P = low SID-Lys and standard ATTD-P content; H_{Lys}-S_P = high SID-Lys and standard ATTD-P content; H_{Lys}-H_P = high SID-Lys and ATTD-P content; SID = standardised ileal digestible; ATTD = apparent total tract digestibility.

¹ The same commercial premix of vitamins and trace minerals was incorporated in all diets. Its composition cannot be detailed publicly due to a confidentiality agreement signed with the supplier, but it supplies at least the amounts of vitamins and trace minerals recommended for sow diets in France (Gaudré and Quiniou, 2009).

From insemination to day 9 of gestation, all sows received a fixed amount of feed. Sows who had weaned the week before received 2.8, 3.2 or 3.5 kg/day depending on whether their BT at weaning was > 20 mm, 16-20 mm or < 16 mm, respectively. Replacement gilts received 2.7 kg/day. From day 80 of gestation to farrowing, primiparous sows received 3.2 kg/day, whereas multiparous sows received 3.5 kg/day. From days 9-80 of gestation, the amount of feed supplied daily was based on the total NE requirement calculated by the nutritional model (Gaillard et al., 2019), divided by 9.0 (i.e., the NE content of all diets), minus the amount of diets already supplied before day 9 of gestation or that would be supplied from day 80 of gestation. After farrowing, the daily feed allowance followed a progressive rationing plan

depending on whether the sow was multiparous or primiparous but similar between treatments and reached an *ad libitum* amount on day 10 of lactation with a daily feed allowance of 7.7 kg and 6.2 kg respectively for multiparous and primiparous. For the first four days after farrowing, the sows received their feed twice a day at the same time as before farrowing. Then and until weaning, sows received their feed in five different meals with a different percentage of the daily feed allowance at each meal (i.e. 15%, 30%, 20%, 25% and 10%). Sows could be fed up to 20% more feed than the feed allowance at each meal.

Tableau 6.2 – Chemical composition of the gestation and lactation diets of sows (on an as-fed basis)

Phase Diet	Gestation				Lactation
	S	L _{Lys} -S _P	H _{Lys} -S _P	H _{Lys} -H _P	Standard
Chemical composition (g/kg) ¹					
DM	875	875	875	877	877
CP	120	112	166	166	150
Ash	60	60	61	77	56
Crude fat	27	27	27	26	34
Crude fibre	67	68	64	64	50
NDF	220	223	204	183	164
ADF	84	84	81	79	61
ADL	21	20	19	21	13
Lysine	6.0	4.5	9.9	9.8	9.7
SID-Lysine	4.7	3.3	8.5	8.5	8.5
Total Ca	9.6	9.6	9.6	14.8	9.8
Total P	5.0	4.9	5.2	6.7	5.5
ATTD-P	2.6	2.6	2.6	4.0	3.3
Total Ca:total P	1.9	2.0	1.8	2.2	1.8
Total Ca:ATTD-P	3.7	3.7	3.7	3.7	3.0
Electrolyte balance (mEq/kg)	220	220	242	239	177
Gross energy (MJ/kg)	15.65	15.61	15.87	15.60	16.04
Digestible energy (MJ/kg)	12.66	12.58	13.04	13.01	13.71
Metabolisable energy (MJ/kg)	12.07	12.01	12.34	12.32	13.07
Net energy (MJ/kg)	9.00	9.00	9.00	9.00	9.80

Abbreviations: S = standard; L_{Lys}-S_P = low SID-Lys and standard ATTD-P content; H_{Lys}-S_P = high SID-Lys and standard ATTD-P content; H_{Lys}-H_P = high SID-Lys and ATTD-P content; SID = standardised ileal digestible; ATTD = apparent total tract digestibility.

¹ The chemical composition of each diet was calculated based on the incorporation rate of each ingredient and its chemical characteristics at the beginning of the experiment. The chemical composition of ingredients was assessed using Evapig® software based on information supplied by the industrial feed-production plant about their chemical composition (i.e., DM, CP, ash, crude fibre and crude fat).

Measurements, samples and data collection

Diets were delivered by an industrial feed-production plant at different times during the experiment, depending on which silos were available to store them on the farm. Samples of each diet from the same delivery were collected weekly and pooled before chemical analyses.

When sows were housed individually, the feed delivered was weighed using a scale (MS Schippers, France) with an accuracy of 5 g. Feed refusals of each sow when housed individually were collected and weighed. From days 25-108 of gestation, each sow's visit to the automatic feeder was recorded using a radio frequency identification ear tag. The feeder automatically detected when a sow did not consume the entire portion of feed in the bowl. When this occurred, the portion's weight was divided equally between that sow and the next sow at the feeder.

Sow BW and BT were measured manually at the beginning of gestation (i.e. 7 days after insemination, assuming that they corresponded to those at the beginning of gestation), 1 month before farrowing (ca. day 80 of gestation), during transfer from the gestation room to the farrowing room (ca. day 108 of gestation), at farrowing (BW: after farrowing, BT: the Monday before farrowing) and at weaning (BW: at weaning, ca. 27 days after farrowing, BT: the day before weaning). An individual mobile scale (Maréchalle, France) was used that required immobilising the sow for a few seconds. The BT was measured using an ultrasound device (Imago-L, IMV-Imaging, France) equipped with a linear probe at the P2 site (i.e., 6.5 cm on either side of the midline, at the level of the last rib). Within 24 h of farrowing, piglets were identified with an ear tag. Their birth state (alive, stillbirth or mummified) was recorded, and they were weighed individually. Within the first 24 h of life, some piglets were cross-fostered with a nurse sow that followed the same feeding strategy and had farrowed less than 48 h earlier in order to adapt the size of the suckled litter to the number of functional teats. From week 2 of lactation onwards, piglets had access to creep feed. Piglets were weighed on the day before weaning (ca. 4 weeks of age). When a piglet died before weaning, the day was recorded, and the piglet was weighed.

For group-housed gestating sows, a trained observer assessed their health status each week, especially their gait, to identify potential lameness. Urine samples were collected on day 80 of gestation (i.e., before individualised P supply to PF sows) and day 108 of gestation (i.e., upon arriving in the farrowing room). On day 79 of gestation, sows were sorted out of the group pen in the afternoon after the meal and moved to individual stalls. The next morning, urine samples were collected, and the sows were weighed. Sows were then sent back to the group pen, immediately before the diet was supplied (i.e., at 1200 h). A total of 15 ml of urine was collected between 0730 h and 1030 h and immediately cooled until analysis. At the INRAE laboratory (Saint-Gilles, France), the samples were centrifuged (at 2 500 g for 10 min at 4°C), and the supernatant was aliquoted into 1.5 ml micro-tubes and then stored at -20°C until chemical analyses. The same procedure was applied for day 108 of gestation.

Chemical analyses

All analyses were performed in duplicate at the same INRAE laboratory (Saint-Gilles, France), and samples were analysed again in duplicate when their initial intra-sample CV exceeded 5%. The results corresponded to the average of duplicates. Overall, 33 diet samples were analysed chemically. After grinding the feed to a diameter of 1 mm, each sample was heated at 103°C for 3 h to determine DM, followed by incineration to determine the ash content according to the French standard NF ISO 5984:2022. Energy content was analysed using a bomb calorimeter (IKA C6000, Staufen, Germany) according to the ISO 9831:1998 standard. Crude fibre was analysed according to the Weende method (NF V 03-040:1993), and NDF, ADF and ADL were analysed according to the Van Soest method (NF V 18-122:2013) using a fibre analyser (ANKOM DELTA, ANKOM Technology, Macedon, NY, USA). Crude fat was analysed after extracting it with petroleum ether (NF ISO 6492:2011) using an extraction unit (Soxtec 8000, FOSS, Hillerød, Denmark). The CP content ($\text{total N} \times 6.25$) was analysed according to the Dumas method (AOAC 7024) using a macro-combustion analyser (FP828, LECO, Mönchengladbach, Germany). Total Ca and P were analysed according to the NF EN 15621:2017 standard using an inductively coupled plasma optical emission spectrometer (5110 ICP-OES, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA) after being microwaved and digested in a nitric acid solution. Results obtained from chemical analysis were compared with those formulated.

From the 65 sows that completed at least one experimental cycle, 280 urine samples were analysed. Urinary creatinine was analysed according to Jaffé's method using a discrete analyser (Gallery, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) and was used as a standard to consider urine dilution due to spot sampling. Urinary Ca and P were analysed using the same inductively coupled plasma optical emission spectrometer (5110 ICP-OES) after being digested in a 69% nitric acid solution. Urine samples for 10 sows of each feeding strategy that completed all three cycles were used to analyse urinary CTX using an ELISA kit (Urine CrossLaps® (CTX-I) EIA, Immunodiagnostic Systems Ltd., Boldon, UK; detection: 50 ng/ml, inter-assay variation: 3.3-10.2%; intra-assay variation: 4.4-8.3%). The mean dilution and recovery rates tested for three urine samples were 110% and 109%, respectively.

Calculations

Total feed intake per gestation equalled the sum of feed supplied from insemination to farrowing (i.e., the feed supplied manually before the sow was group-housed and after arriving in the farrowing room manually weighed for the PF sows, the feed supplied manually on urine-sampling days and that supplied by the automatic feeders when group-housed).

Sow BW immediately before farrowing equalled sow BW after farrowing plus the weight of the conceptus (Dourmad et al., 1997). Last month BW gain equalled sow BW immediately before farrowing minus that on day 80 of gestation. The BW or BT gain during gestation and the entire cycle equalled the BW or BT at farrowing and at weaning, respectively, minus that at insemination.

The sows that farrowed at least once during the experiment were kept for analysis. At birth, alive and stillborn piglets were used to calculate litter size, litter weight and mean birth weight per piglet. The average daily gain (**ADG**) of the litter was calculated based on the BW gain of piglets alive at weaning and that of piglets that died before weaning, divided by the duration of lactation. The ADG per piglet equalled the ADG of the litter divided by the suckled litter size (i.e., number of weaned piglets and dead piglets considered in proportion to time).

Feed costs equalled the mean cost of the feeds consumed during the experiment. The price of the $L_{Lys}-S_P$, S gestation, standard lactation, $H_{Lys}-H_P$ and $H_{Lys}-S_P$ diets at the time of the experiment was 279, 289, 336, 339 and 344 €/ton, respectively.

Amount of N and P intake of each sow was calculated as a function of the total intake of the feeds during gestation and their CP (total N $\times$ 6.25) or total P content (Tableau 6.2). Maternal retention of N and P during gestation equalled final amounts minus initial amounts using equations of Dourmad et al. (2008, 2021a) as a function of sow BW and BT. Faecal N and P output was calculated based on the ATTD of N or P obtained from the diet. Urinary N and P output equalled N or P absorption (total intake minus faecal output) minus retention. The efficiency of N and P use equalled N and P retention divided by N and P intake, respectively.

Statistical analyses

Statistical analyses were performed using R software (v. 4.4.1) (R Core Team, 2024). A linear mixed model with fixed and random effects was used to test effects of the feeding strategy (SF vs. PF) and experimental cycle (1, 2 or 3) on several variables: sow characteristics (BW and BT), litter characteristics (litter size, piglets born alive, mean birth weight, weaning weight and ADG of the litter and piglets), cumulative intake during gestation (feed, N, SID-Lys and ATTD-P) and components of the N and P balances. To this end, the `lme` function of the *nlme* package (Pinheiro and Bates, 2000) was used with the feeding strategy, the experimental cycle and their interaction as fixed effects and the sow as a random effect (Supplementary Material S1). The parity of the sow at the beginning of the experiment (1, 2, 3 or 4+) was used as a covariate. An autocorrelation structure of order 1 (`corAR1` function) was used to consider correlations between results of consecutive gestations of a given sow using the following equation:

$$Y_t = \phi Y_{t-1}$$

with Y_t the observed performance at discrete time t and ϕ an autocorrelation parameter, which was estimated.

The sow was considered the experimental unit. Tukey's test for multiple comparisons of means was used to perform pairwise comparisons. To assess the effect of the feeding strategy on count data (e.g., number of stillborn piglets, frequency of lameness, duration), these data were normalised via Poisson transformation in a generalised linear mixed model using the `glmer` function of the *lme4* package (Bates et al., 2015). The same fixed and random effects were used as those for the linear mixed model. Assumptions of regression models (i.e., linearity, normal distribution of errors, homoscedasticity of errors and independence of errors due to the autocorrelation structure) were assessed for each model.

The RSD of results was calculated as follows:

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(n - p)}}$$

with n the sample size, p the number of parameters to estimate, Y_i the observed value and $\hat{Y}_i$ the predicted value.

To compare observations to predictions (BW on day 80 of gestation, BW and BT at farrowing, litter size and mean birth weight) a Student's t -test or a Welch's t -test was used depending on whether the variances were equal or not, respectively, for both feeding strategies. Differences were considered significant at $P < 0.05$ and a trend at P of 0.05 to < 0.10 .

Results

Nutritional analysis and experimental design

Analysed gross energy and DM contents of the four diets were similar to those formulated. Overall, analysed and formulated CP (in absolute value) differed by 2-7% (i.e., considered acceptable at the time of delivery) (Supplementary Table S2). Analysed dietary P and Ca contents of diets S, L_{Lys}-S_P, H_{Lys}-S_P and H_{Lys}-H_P were slightly lower than those formulated (P: -0.3, -0.1, -0.3 and -0.7 g/kg, respectively; Ca: -0.8, -0.8, -0.9 and -2.1 g/kg, respectively). However, the analysed total Ca:total P ratio of these diets was slightly ($\leq 10\%$) lower than that predicted when formulating the diet, which indicated that the feeding strategies were implemented accurately.

During the experiment, 165 gestations were initiated in 77 sows, of which three SF and eight PF sows were culled as supernumerary (due to lack of space in the farrowing room), five SF and two PF sows were culled before farrowing due to health issues (mainly severe lameness), one SF and one PF sows were removed from the experiment because insemination failed and two SF sow died (the first after a difficult farrowing and the second for unknown reasons during gestation). In addition, three SF and two PF sows were not inseminated when they returned to oestrus after weaning due to poor lactation performances (a routine decision). Ultimately, the study analysed 143 experimental cycles (gestation plus lactation) of 65 sows, of which 15 SF and 18 PF sows completed all three successive experimental cycles, 5 SF and 7 PF sows completed only two experimental cycles, and 13 SF and 7 PF sows completed only one experimental cycle (Figure 6.1). Here, we present results for all sows that completed at least one experimental cycle. Their results for cycles 1 and 2 did not differ significantly from those for the sows that completed all three experimental cycles (Supplementary Tables S3-S6).

Feed and nutrient intake

From insemination to the beginning of group housing, feed intake did not differ between the two feeding strategies ($P = 0.50$; Tableau 6.3). Feed intake during gestation increased as the number of experimental cycles increased, with 22 and 29 kg more feed consumed during cycles 2 and 3, respectively, than that during cycle 1 ($P < 0.001$). Nitrogen intake did not differ between feeding strategies ($P = 0.49$), but was 0.3 kg greater during cycles 2 and 3 than that during cycle 1 ($P < 0.001$). The interaction between the feeding strategy and the cycle influenced SID-Lys intake significantly during gestation ($P = 0.005$). The SF sows consumed 18% more SID-Lys in cycle 1 and 26% more in cycles 2 and 3 than PF sows did. Over all three gestations, the feeding strategy did not influence ATTD-P intake ($P = 0.19$) although ATTD-P intake was 0.05 kg greater during cycles 2 and 3 than that during cycle 1 ($P < 0.001$). According to individual estimated requirements, until day 80 of gestation, ATTD-P intake exceeded the requirements for both feeding strategies, but from day 80 of gestation, 5 PF and 39 SF sows were not supplied enough ATTD-P. By adjusting the amount supplied in order to meet requirements during the last month of gestation, daily ATTD-P intake was 1.5 g greater for PF sows than for SF sows, but only during the last week of gestation ($P < 0.001$; Figure 6.2). During lactation, feed intake did not differ between feeding strategies ($P = 0.43$), even though SF sows consumed a mean of 9, 4 and 10 kg more than PF sows did during cycles 1, 2 and 3, respectively.

Tableau 6.3 – Feed and nutrient intake at different periods by feeding strategy (SF vs. PF) for the sows that completed at least one experimental cycle

Strategy	Experimental cycle						P-value			
	1		2		3		RSD	Strategy	Cycle	Strategy × Cycle
	SF	PF	SF	PF	SF	PF				
Number of sows	33	32	20	25	15	18				
From insemination to day 24 of gestation ¹										
Duration (days)	23.9	23.8	23.6	23.6	24.0	24.0	1.08	0.98	0.96	0.96
Feed intake (kg)	80	81	84	85	86	86	9.6	0.50	< 0.001	0.78
From day 25 of gestation to farrowing ²										
Duration (days)	89.0	89.9	90.2	89.6	90.1	90.2	1.24	0.86	0.68	0.80
Feed intake (kg)	305	312	323	330	330	335	31.1	0.34	< 0.001	0.96
N intake (kg)	5.85	5.89	6.21	6.13	6.34	6.18	0.459	0.49	< 0.001	0.37
SID-Lys intake (kg)	1.43 ^b	1.21 ^c	1.52 ^a	1.22 ^c	1.55 ^a	1.22 ^c	0.076	< 0.001	< 0.001	0.005
ATTD-P intake (kg)	0.79	0.82	0.84	0.87	0.86	0.88	0.088	0.19	< 0.001	0.95
After farrowing (sow) ³										
Duration of lactation (days)	27.1	26.6	27.3	27.4	27.3	26.9	1.34	0.73	0.76	0.92
Lactation diet (kg)	167	158	190	186	189	179	24.0	0.43	< 0.001	0.85

Abbreviations: SF = standard feeding; PF = precision feeding; SID = standardised ileal digestible; ATTD-P = apparent total tract digestibility of P.

¹ Before being group-housed, all sows received the S gestation diet.

² SF sows received the S gestation diet, whereas PF sows received a mixture of L_{Lys}-SP and H_{Lys}-SP until day 80 of gestation and then a mixture of L_{Lys}-SP, H_{Lys}-SP and H_{Lys}-HP until farrowing.

³ After farrowing, all sows received a standard lactation diet.

^{a,b,c} Values within a row with different superscripts differ significantly at $P < 0.05$.

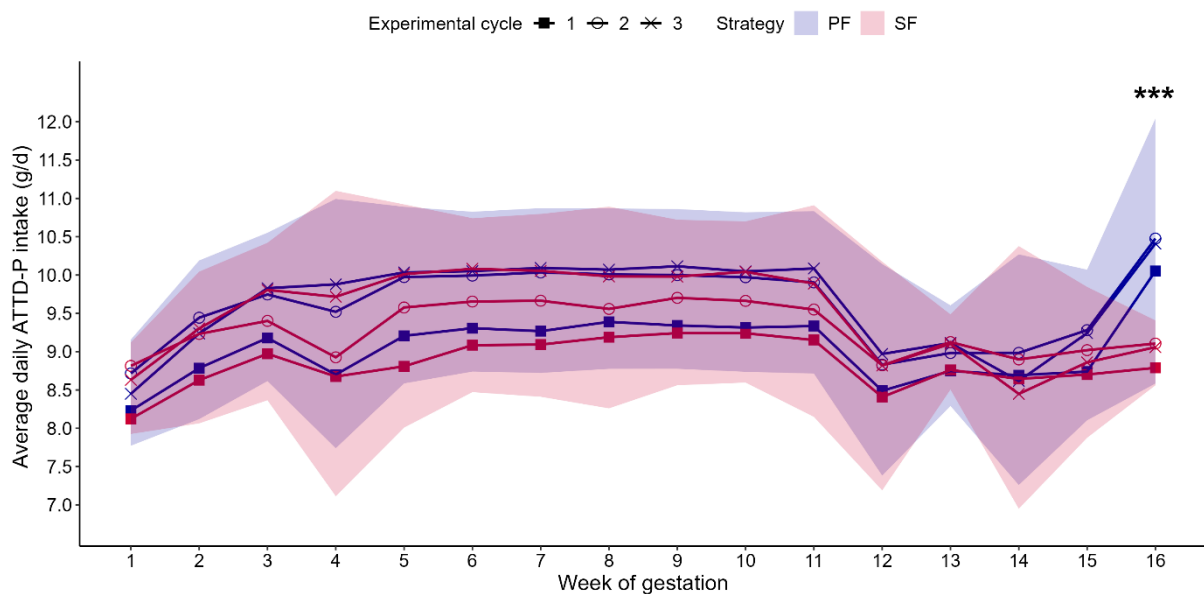


Figure 6.2 : The mean apparent total tract digestibility (ATTD) of P intake by sows per week during gestation over the three experimental cycles by feeding strategy (standard feeding (SF) vs. precision feeding (PF)). Shaded areas correspond to the mean SD of the three experimental cycles for each feeding strategy. ***: $P < 0.001$.

Performance of sows and litters

Parity, age at insemination and BW and BT at insemination did not differ between feeding strategies ($P > 0.10$; Tableau 6.4). As the mean parity increased as the number of experimental cycles increased, BW and BT at insemination also increased (i.e., by 27 kg and 0.6 mm, respectively, from cycle 1 to cycles 2 and 3 ($P = 0.01$)). On day 80 of gestation, BW ($P = 0.98$) and BT ($P = 0.33$) did not differ between feeding strategies, and observed BW did not differ from predicted BW ($P = 0.74$). However, during the last month of gestation, PF sows gained 8 kg more BW than SF sows did during cycle 3 only (strategy $\times$ cycle interaction, $P = 0.03$). After farrowing, observed BW did not differ between feeding strategies ($P = 0.25$) but was significantly greater (by 17 kg) than predicted BW ($P < 0.001$). A trend was observed in the effect of the feeding strategy $\times$ cycle interaction on sow BT at farrowing ($P = 0.05$). Observed BT did not differ from predicted BT ($P = 0.54$). During cycle 3 only, BT at farrowing was 1.0 mm greater for PF sows than for SF sows and differed significantly from that during cycles 1 and 2 ($P = 0.05$). Gestation BW gain did not differ between feeding strategies ($P = 0.87$) and was 8 kg lower during cycle 3 than that during cycle 2 ($P = 0.02$). Neither the feeding strategy nor cycle influenced BW or BT loss during lactation ($P > 0.10$) or BT loss during the entire reproductive cycle (gestation plus lactation) ($P > 0.10$).

At farrowing (Tableau 6.5), the feeding strategy did not influence the litter size, number of piglets born alive or stillborn per litter, litter weight, mean birth weight or within-litter CV of birth weight ($P > 0.10$), but the experimental cycle did ($P < 0.05$). At cycles 2 and 3, litter size was 1.6 total born piglet larger than those during cycle 1 ($P = 0.003$). The number of piglets born alive ($P = 0.02$) and stillborn ($P = 0.003$) increased by + 1.2 and + 0.6 in cycles 2 and 3, respectively compared to cycle 1. Litter weight was 1.7 kg greater during cycles 2 and 3 than that during cycle 1 ($P = 0.01$). As the litter size increased from cycles 1 to 2 to 3, mean birth weight decreased (1.48, 1.45 and 1.40 kg, respectively, $P = 0.04$). Within-litter CV of birth weight during cycles 2 and 3 was greater than that during cycle 1 (24% vs. 21%, respectively, $P = 0.007$).

At weaning, neither the feeding strategy nor cycle influenced litter size or mean weaning weight ($P > 0.10$), but the cycle did influence litter weight (5 kg lower during cycle 3 than that during cycles 1 and 2, $P = 0.05$). Neither the feeding strategy nor the experimental cycle influenced the ADG of piglets, but the cycle did influence the ADG of the litter (0.1 kg/day lower during cycle 3 than that during cycles 1 and 2, $P = 0.03$).

Tableau 6.4 – Observed and predicted BW and backfat thickness (BT) at the beginning of gestation, one month before farrowing, at the beginning of maternity and at weaning by feeding strategy (SF vs. PF) for sows that completed at least one experimental cycle

Strategy	Experimental cycle						RSD	P-value			Observed vs. Predicted ¹
	1		2		3			Strategy	Cycle	Strategy × Cycle	
	SF	PF	SF	PF	SF	PF					
Number of sows	33	32	20	25	15	18					
Parity	1.9	1.8	3.2	3.0	4.5	4.2	0.58	0.82	< 0.001	0.93	-
Age at insemination (days)	526	531	718	710	913	878	5.0	0.89	< 0.001	0.41	-
Predicted											
Middle ² BW (kg)	270	268	297	295	317	313	8.43	-	-	-	0.74
Final ³ BW (kg)	250	252	277	278	296	294	15.2	-	-	-	< 0.001
Final ³ BT (mm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.2	2.54	-	-	-	0.54
Observed											
Initial ⁴ BW (kg)	204	201	237	229	256	252	22.3	0.26	< 0.001	0.82	-
Initial ⁴ BT (mm)	15.1	14.9	15.7	15.2	16.0	16.4	1.77	0.83	0.01	0.94	-
Middle ² BW (kg)	266	266	306	306	317	309	17.5	0.98	< 0.001	0.65	-
Middle ² BT (mm)	19.3	19.2	20.1	19.9	20.9	21.7	1.67	0.33	< 0.001	0.15	-
BW before farrowing (kg)	300	298	337	330	347	348	20.7	0.57	< 0.001	0.55	-
Final ³ BW (kg)	266	264	302	295	311	311	20.0	0.25	< 0.001	0.32	-
Final ³ BT (mm)	19.3 ^b	19.1 ^b	20.3 ^{ab}	20.0 ^a	20.7 ^{ab}	21.7 ^a	1.46	0.16	< 0.001	0.05	-
Weaning BW (kg)	235	232	270	265	279	275	17.2	0.19	< 0.001	0.41	-
Weaning BT (mm)	15.1	14.7	16.3	16.1	16.2	16.8	1.47	0.20	< 0.001	0.15	-
Change in BW and BT											
Last month BW gain (kg)	32 ^{ab}	33 ^{ab}	26 ^c	24 ^c	31 ^b	39 ^a	13.2	0.11	0.20	0.03	-
Last month BT gain (mm)	0.0	-0.1	0.2	0.0	-0.2	0.0	1.69	0.58	0.99	0.62	-
Gestation BW gain (kg)	62	64	65	66	55	59	14.6	0.87	0.02	0.55	-
Gestation BT gain (mm)	4.3	4.2	4.6	4.8	4.8	5.4	2.15	0.46	0.12	0.26	-
Lactation BW loss (kg)	30	32	33	30	32	35	8.6	0.85	0.72	0.46	-
Lactation BT loss (mm)	4.4	4.3	3.9	3.9	4.5	5.0	1.77	0.70	0.40	0.56	-
Cycle BW gain (kg)	32	31	33	36	23	24	17.6	0.98	0.02	0.82	-
Cycle BT gain (mm)	-0.0	-0.2	0.6	0.9	0.2	0.4	2.61	0.65	0.20	0.63	-

Abbreviations: SF = standard feeding; PF = precision feeding; BT = backfat thickness.

¹ Student's t-test for middle BW and Welch's t-test for final BW and final BT.

² BW and BT of the sow on day 80 of gestation.

³ BW and BT of the sow after farrowing.

⁴ BW and BT of the sow 1 week after insemination.

^{a,b,c} Values within a row with different superscripts differ significantly at $P < 0.05$.

Tableau 6.5 – Observed and predicted litter characteristics at birth and performance observed until weaning by feeding strategy (SF vs. PF) for the sows that completed at least one experimental cycle

Strategy	Experimental cycle							P-value			
	1		2		3		RSD	Strategy	Cycle	Strategy × Cycle	Observed vs. Predicted ¹
	SF	PF	SF	PF	SF	PF					
Number of sows	33	32	20	25	15	18					
Expectations at birth (litter)											
Litter size	17.6	17.7	18.0	18.0	18.0	18.0	4.07	-	-	-	0.20
Birth weight (kg)	1.42	1.42	1.45	1.45	1.45	1.45	0.226	-	-	-	0.46
Observed at birth											
Litter size	16.9	18.1	18.5	18.2	20.3	19.6	4.56	0.17	0.003	0.20	-
Piglets born alive	16.0	16.7	17.0	16.8	18.3	17.9	3.87	0.27	0.017	0.27	-
Stillborn piglets	0.9	1.3	1.5	1.4	2.0	1.7	1.04	0.95	0.003	0.46	-
Litter weight (kg)	24.1	25.8	25.4	26.3	27.3	27.8	6.03	0.15	0.01	0.43	-
Birth weight (kg)	1.49	1.46	1.41	1.49	1.36	1.44	0.227	0.36	0.04	0.17	-
Within-litter CV of birth weight (%)	20.4	20.9	24.9	22.9	24.6	23.7	8.77	0.60	0.007	0.45	-
Observed at weaning											
Litter size	12.6	12.8	12.8	12.6	12.4	12.6	2.49	0.77	0.92	0.81	-
Litter weight (kg)	107	105	107	106	102	101	15.3	0.74	0.046	0.93	-
Weaning weight (kg)	7.96	7.85	8.07	7.99	8.16	8.11	1.170	0.56	0.75	0.75	-
Average daily gain											
Litter (kg/day)	3.13	3.16	3.20	3.11	3.07	3.01	0.400	0.80	0.03	0.59	-
Piglet (g/day)	234	235	241	235	247	242	29.7	0.97	0.97	0.82	-

Abbreviations: SF = standard feeding; PF = precision feeding.

¹ Welch's *t*-test.

Mineral and health status of sows

Urinary Ca concentration did not differ between feeding strategies ($P = 0.75$; Figure 6.3A) but on day 80 of gestation, it was 3-4 times as high as that measured 1 week before farrowing ($P = 0.03$; Figure 6.3A). The SD of urinary Ca concentration on day 80 of gestation was 2-3 times as high as that measured 1 week before farrowing. Urinary P concentration did not differ between feeding strategies on day 80 or 108 of gestation ($P = 0.74$; Figure 6.3B). Urinary P concentration was greater on day 80 of gestation during experimental cycle 3 than that on other days (+ 6 mg/mmol of creatinine, $P = 0.002$; Figure 6.3B). On urine-sampling days, the urinary Ca:P ratio did not differ between feeding strategies ($P = 0.55$), but it was lower 1 week before farrowing than that on day 80 of gestation during cycles 1 and 2 ($P = 0.02$; Figure 6.3C). The opposite was observed during experimental cycle 3, which had a mean urinary Ca:P ratio of 1.45 on day 80 of gestation and 2.50, 1 week before farrowing. The SD of the urinary Ca:P ratio for urine-sampling dates with greater ratios was 2-3 times as high as that for urine-sampling dates with lower ratios. Urinary CTX concentration did not differ between feeding strategies among cycles or among urine-sampling days during the same experimental cycle ($P > 0.10$; Figure 6.3D).

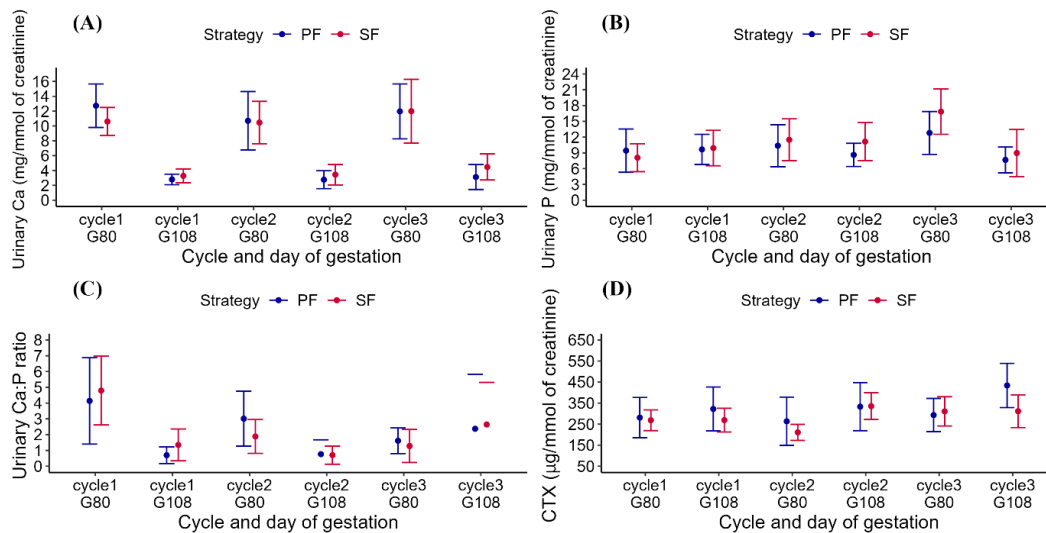


Figure 6.3 : Mean ($\pm$ confidence interval) of urinary Ca concentration (A), urinary P concentration (B), urinary Ca:P ratio (C) and concentration of C-terminal telopeptide of type I collagen (CTX; D) on days 80 (G80) and 108 (G108) of gestation of the experimental cycles by feeding strategy (standard feeding (SF) vs. precision feeding (PF)). 280 urine samples were analysed for Ca and P concentration. For CTX, urine samples for 10 sows of each feeding strategy that completed all three cycles were analysed, i.e. 120 urine samples.

The frequency of lameness did not differ between the PF and SF feeding strategies (21% and 27%, respectively, $P = 0.25$). The frequency of lameness differed significantly among experimental cycles, with a mean of 22% during cycles 1 and 2 and 29% during cycle 3 ($P = 0.002$).

Feed costs and nitrogen and phosphorus balances

Total feed cost per gestation did not differ between feeding strategies ($P = 0.43$; Tableau 6.6), but it did as the number of experimental cycles increased ($P < 0.001$). During the gestation of PF sows, the mean contributions of diets S, L_{Lys-S_P} , H_{Lys-S_P} and H_{Lys-H_P} to total feed intake were 22%, 72%, 5% and 1%, respectively. Compared to SF sows (which received 100% of diet S), PF sows consumed the least-expensive diet (L_{Lys-S_P}) the most, which decreased their total feed cost by 2, 4 and 5 €/ton during experimental cycles 1, 2 and 3, respectively ($P < 0.001$; Figure 6.4).

Tableau 6.6 – Effect of the feeding strategy (SF vs. PF) on feed costs and nutrient balances during gestation for the sows that completed at least one experimental cycle

Strategy	Experimental cycle						RSD	P-value		
	1		2		3			Strategy	Cycle	Strategy × Cycle
	SF	PF	SF	PF	SF	PF				
Number of sows	30	32	20	25	15	18				
Percentage of diet consumed (%)										
S	100	22	100	21	100	22	0.1	< 0.001	0.98	0.87
L _{lys} -S _p	0	70	0	73	0	74	0.2	< 0.001	0.26	0.24
H _{lys} -S _p	0	7	0	4	0	3	0.4	< 0.001	< 0.001	0.89
H _{lys} -H _p	0	1	0	2	0	1	0.4	< 0.001	0.70	0.65
Feed cost										
Total feed intake (€)	111	113	118	118	120	120	11.6	0.43	< 0.001	0.63
Days 25-80 of gestation ¹ (€)	54	54	58	58	60	59	7.9	0.87	< 0.001	0.97
Last month of gestation (€)	34	36	36	36	35	36	2.4	0.04	0.20	0.53
Feed (€/ton)	289 ^a	287 ^b	289 ^a	285 ^c	289 ^a	284 ^d	1.6	0.004	< 0.001	< 0.001
N balance										
Total intake (kg)	7.37	7.44	7.81	7.77	8.00	7.83	0.775	0.46	< 0.001	0.42
Intake, days 25-80 of gestation ¹ (kg)	3.61	3.49	3.85	3.73	4.01	3.73	0.511	0.42	< 0.001	0.82
Intake, last month of gestation (kg)	2.26	2.40	2.36	2.43	2.31	2.39	0.170	< 0.001	0.53	0.18
Retention ² (kg)	1.45	1.53	1.54	1.55	1.24	1.34	0.350	0.43	0.001	0.96
Faecal output ³ (kg)	1.35	1.35	1.43	1.43	1.46	1.45	0.143	0.91	< 0.001	0.96
Urinary output ⁴ (kg)	4.57	4.55	4.86	4.79	5.30	5.04	0.282	0.73	< 0.001	0.26
Efficiency of use ⁵ (% of intake)	19.8	20.7	19.7	19.9	15.4	17.1	3.39	0.45	< 0.001	0.86
P balance										
Total intake (kg)	1.92	1.96	2.03	2.06	2.08	2.09	0.207	0.43	< 0.001	0.81
Retention ² (kg)	0.29	0.30	0.29	0.29	0.23	0.25	0.068	0.34	< 0.001	0.91
Faecal output ³ (kg)	0.92	0.92	0.98	0.97	1.00	0.98	0.096	0.79	< 0.001	0.71
Urinary output ⁴ (kg)	0.71	0.73	0.77	0.80	0.85	0.86	0.064	0.56	< 0.001	0.99
Efficiency of use ⁵ (% of intake)	15.0	15.7	14.2	14.2	11.0	11.8	2.60	0.33	< 0.001	0.85

Abbreviations: SF = standard feeding; PF = precision feeding; S = standard; L_{lys}-S_p = low SID-Lys and standard ATTD-P content; H_{lys}-S_p = high SID-Lys and standard ATTD-P content; H_{lys}-H_p = high SID-Lys and ATTD-P content; SID = standardised ileal digestible; ATTD = apparent total tract digestibility.

¹ The period when PF sows were supplied a daily mixture of L_{lys}-S_p and H_{lys}-S_p.

² Retention calculated using equations of Dourmad et al. (2008, 2021a) and BW and BT at insemination and farrowing.

³ Faecal output calculated based on non-digestible N and P in feed intake.

⁴ Urine output equals intake – (retention + faecal output).

⁵ Efficiency of use equals retention/intake.

^{a,b,c,d} Values within a row with different superscripts differ significantly at P < 0.05.

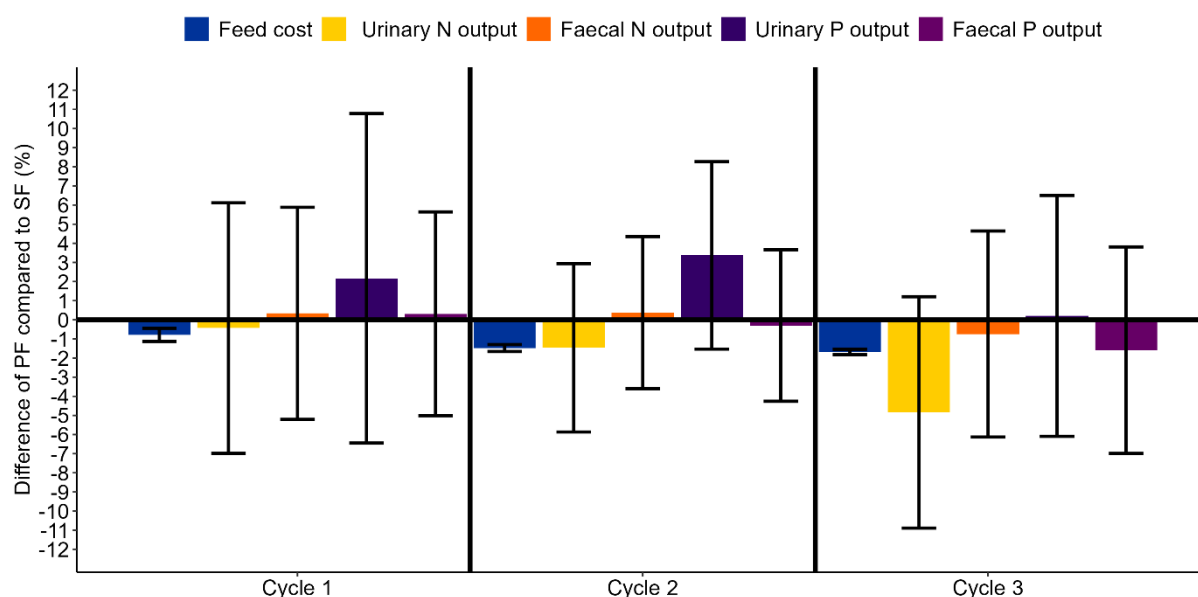


Figure 6.4 : Percentage difference ($\pm$ confidence interval) in feed cost and urinary and faecal N and P output (in percentage points) of precision feeding (PF) sows compared to those of standard feeding (SF) for the three experimental cycles.

Components of the N balance during gestation did not differ between feeding strategies ($P > 0.10$; Tableau 6.6). The N-use efficiency during each cycle did not differ between feeding strategies ($P = 0.45$), but it did decrease as the number of cycles increased, due to greater intake but a similar or lower retention ($P < 0.001$).

The P balance during gestation did not differ between feeding strategies ($P > 0.10$). The P-use efficiency decreased from 15.4% during cycle 1 to 14.2% during cycle 2 to 11.4% during cycle 3 ($P < 0.001$). The P intake did not differ between cycles 2 and 3, but was 0.10 kg greater than that during cycle 1 ($P < 0.001$). The P retention did not differ between cycles 1 and 2, but was 17% greater than that during cycle 3 ($P < 0.001$). As the number of cycles increased, urinary P output increased ($P < 0.001$), whereas faecal P output was 6% greater during cycles 2 and 3 than that during cycle 1 ($P < 0.001$).

Discussion

Body composition of the sow throughout gestation

This study explored the influence of daily and individualised PF adjusted for energy, amino acids, and minerals on multiple components of the performance of gestating sows. At farrowing, sow BW did not differ between feeding strategies, which was expected due to their similar energy supplies. However, it was greater than the BW at farrowing predicted by the model, i.e. with the calibrated Weibull equation, for the experimental cycles studied. Underestimating sow BW results in underestimating maintenance requirements as well as

requirements related to body protein and lipid deposition. For a given energy supply, underestimating maintenance requirements decreases the amount of nutrients available for production. Subsequently, maternal reserves at farrowing may have decreased due to the requirements of foetal growth, which are prioritised (Theil et al., 2023). In addition, mean litter weight was 1% heavier than that in the historical data from the herd, probably due to the ongoing pressure of genetic selection for high-quality litters. In the present study, 50% of the litters were within the predicted average litter weight plus or minus 11%. The more the observed litter weight deviated from the predictions, the more imprecise the estimation of nutrient requirements became, particularly for the amino acids. In this study, an 11% deviation from the predicted litter weight translated into a 33 g difference in SID-Lys intake over the gestation, i.e. close to 0.3 g per day (Gaillard et al., 2019). However, maternal reserves were not influenced, as sow BT at farrowing was similar to that predicted and to that observed for BW on day 80 of gestation, even though BW gain during the last month was higher than that predicted, which indicated an increase in maternal protein deposition. These results highlight the need to adjust performance targets periodically to reflect these trends (Dourmad et al., 2021b).

Physical activity is a major source of variability in energy requirements among gestating sows (Gaillard et al., 2021). By assuming that sows had 5-6 h of physical activity per day, we may have overestimated their mean amount of activity during the last month of gestation, which would partly explain their greater observed BW gain with no change in BT and the heavier litter weight at farrowing. For a 250 kg sow, overestimating physical activity by 1 h requires supplying an additional 1 MJ of metabolisable energy per day (Noblet et al., 1993), which represents nearly 10 kg of additional feed during gestation. Considering each sow's physical activity could improve estimates of individual energy requirements. Interestingly, during the last month of gestation, sows did not experience a large BT gain or loss, which suggests that the feeding strategy supplied enough nutrients, meeting both the slight increase in maintenance requirements and the exponential increase in foetal growth requirements during this critical period (McPherson et al., 2004). The 42 MJ of ME and a minimum of 3.2 kg of feed per day that sows received during the last month of gestation lay within the optimal range recommended by Feyera et al. (2021) to decrease piglet mortality by minimising farrowing duration and maximising colostrum yield, without decreasing litter weight at birth (Langendijk et al., 2023).

Effects of a precision feeding strategy on sow performance, nutrient balances and feed costs

The PF strategy in the present study did not influence farrowing performances over the three consecutive gestations, as found by other studies (Stewart et al., 2021; Ribas et al., 2024). Ribas et al. (2024) found that sow BT at farrowing was reduced over the long term with a single diet compared with a PF strategy. This difference may be explained by the fact that our SF sows were supplied with an individually adjusted feed quantity estimated with the same model as used for the PF sows, which differentiates it from the conventional feeding applied in Ribas et al. (2024). Those authors applied a conventional feeding strategy to avoid a deficiency of amino acids for most of the herd at the end of gestation when requirements were at their highest. Such feeding strategy leads to an excess of amino acids in the first part of gestation (Solà-Oriol and Gasa, 2017). By applying a PF strategy designed to decrease excess SID-Lys intake, the present study decreased it by 18-26%, which is similar to results simulated by Gaillard et al. (2020) or observed at the farm level by Gaillard and Dourmad (2022). However, the PF strategy did not result in significantly lower N output than that of the SF strategy because the SID-Lys:CP ratio varied among the four diets (from 3.0-5.1%).

The PF strategy decreased feed costs slightly (by 4 €/ton), assuming that the amounts supplied per strategy were the same as that for SF sows supplied excess amino acids from insemination to day 84 of gestation. Thus, these results agree with those of previous studies (Gaillard and Dourmad, 2022; Ribas et al., 2024). Considering P when adjusting supplies to PF sows during the last month of gestation did not decrease feed costs further.

Long-term adequacy of phosphorus supplies using a precision feeding strategy

Most dietary P comes from inorganic sources, unless phytases are incorporated in the feed and release P from phytates in the ingredients (Zhai et al., 2021). However, inorganic sources of P are limited and non-renewable (Cordell et al., 2009). Previous studies of PF focused mainly on energy and amino acids, but minerals are as important and have different dynamics of requirements during gestation than amino acids do (Gaillard et al., 2020). As Becker et al. (2024) highlighted, studies still differ greatly in their estimates of P and Ca requirements for gestating sows because fewer studies have focused on sows than on growing and finishing pigs. The mineral digestibility for growing and finishing pigs cannot be used to accurately formulate diets for gestating sows because digestibility differs for the latter (Lee et al., 2021) depending of the stage of gestation (Lee et al., 2019).

Digestible P can also be expressed as standardised total tract digestibility (**STTD**) or ATTD as used in the present study, in feed tables and estimated requirements. The STTD-P is additive in mixed diets, but this is not always the case for ATTD-P, which was originally established and is still used in European feed tables for several reasons. A recent review (Stein, 2024) highlighted a lack of data on STTD-P in feed supplied to sows, and endogenous loss of P varies greatly among experiment and among amount of P supplied for sows, unlike for growing pigs, which limits its use (Bikker et al., 2017). In the present study, the supply of ATTD-P was adjusted to meet requirements only during the last month of gestation. The adjustment was made during this period to limit the risk of fractures, due to limited knowledge regarding the bone mineralisation required to compensate for bone mobilisation during the previous lactation. To develop a PF strategy adjusted based on ATTD-P over the whole gestation period, it will be necessary to account for the amount of minerals potentially mobilised from bones during the previous lactation, both in primiparous (for whom data are beginning to emerge; Heurtault et al., 2024a) and in multiparous sows. During the first two months so, dietary P were predicted to well exceed P requirements for most sows in the herd. These high supplies were designed to enable sows to restore their bone mineral reserves (Giesemann et al., 1998) and prevent deficiencies that could decrease the mineral content of piglets (Cloutier et al., 2024) during early gestation. We assumed that the PF strategy would prevent deficiencies during late gestation (i.e., the most critical stage for bone metabolism (Van Riet et al., 2016)), unlike the SF strategy. Comparing predicted ATTD-P requirements to dietary ATTD-P supplies indicated that all SF and PF sows were supplied excess P until day 80 of gestation but that 36 SF and 2 PF sows did not receive enough ATTD-P from days 80-108 of gestation, which increased to 46 SF and 6 PF sows (i.e., 68% and 8% of each, respectively) during the week before farrowing. The greatest dietary ATTD-P content (4 g/kg in H_{Lys-Hp}) exceeded the highest predicted requirement by our model in our study (3.9 g/kg). However, the daily mixture prioritised SID-Lys requirements over ATTD-P requirements. Using an additional hopper with a L_{Lys-Hp} diet would have met the ATTD-P requirements of the remaining 8% of PF sows.

The present study also examined P deficiencies based on the urinary Ca:P ratio, as recommended by Grez-Capdeville and Crenshaw (2021), who considered that mineral requirements were met when this ratio ranged from 0.5 to 1.5. An excess of P is assumed under 0.5, whereas a deficiency is assumed above 1.5, assuming a constant total Ca:total P ratio in the diet of 1.25. Based on these thresholds, on day 80 of gestation, 26 SF and 35 PF sows had experienced P deficiency, 24 SF and 21 PF sows had met their P requirements, and 18 SF and 19 PF sows had received excess P. On day 108 of gestation, the corresponding

numbers were 12 SF and 6 PF sows with P deficiency, 13 SF and 21 PF sows with P requirements met, and 44 SF and 48 PF sows supplied excess P. Overall, urinary Ca and P outputs did not differ between feeding strategies. Urinary P did not change significantly over time, except for the one sampling time mentioned. ATTD-P intake differed significantly between feeding strategies only during the last week of gestation, which limited the ability of the two urine samples per experimental cycle to identify this effect. In contrast, urinary Ca output was 3-4 times as large 1 month before farrowing as that 1 week before farrowing, when it was close to 0. Based on these results, we hypothesise that 1 month before farrowing, sows were supplied excess Ca due to the ATTD-P contents of the diets. Excess Ca is known to decrease P absorption in growing pigs (Stein et al., 2011; Létourneau-Montminy et al., 2012; Hu et al., 2023) and is assumed to do the same in sows. However, the amount of Ca supplied seemed to be limiting 1 week before farrowing, according to the low urinary Ca output, and could have been increased along with the amount of P supplied at that time. The total Ca:ATTD-P ratio of 3.7 in the gestation diets was 0.5 g/g higher than that of Heurtault et al. (2024a). This ratio was based on a constant ATTD-Ca of 45% (Quiniou et al., 2021), but ATTD-Ca might increase due to a faster deposition rate of Ca than P in the foetus during late gestation (Bikker and Blok, 2017). Future studies should assess Ca and P mobilisation during the previous lactation, Ca use and their effects on the optimal Ca:P ratio to develop mineral PF for gestating sows.

Daily ATTD-P intake may have been greater than expected due to coprophagy, as group-housed sows (days 25-108 of gestation) may have consumed each other's faeces. Thus, with up to 52% of P intake excreted (Poulsen et al., 1999), coprophagy may result in more absorbed P. In contrast, P intake from drinking water was low, as the water had a low P concentration, in agreement with French regulations. However, Ca intake from the water (not measured) may have been high, as its Ca concentration may have been up to 400 mg/l. Thus, a sow drinking 10 l of water per day would receive up to an additional 4 g of Ca per day, which would increase the total Ca:total P ratio from cumulative feed and water intake. However, the effect was lower in the present study, in which the Ca concentration of the water was usually less than 100 mg/l (ARS Bretagne, 2017).

Long-term effects of precision feeding on the mineral status

The analysis of urinary CTX indicated that the PF strategy did not result in lower bone resorption than that of the SF strategy. In previous studies, bone resorption monitored by serum CTX increased during the last month of gestation (Van Riet et al., 2016) and was more pronounced close to peripartum and then during lactation (Cools et al., 2014). A standard for

urinary CTX concentration in gestating sows has not been quantified. In previous studies, serum CTX concentration differed greatly among sows but differed significantly between feeding strategies only when P intake was 50% of P requirements compared to P supplies adjusted to meet requirements for gestating or lactating sows (Lee et al., 2020; Grez-Capdeville and Crenshaw, 2022; Heurtault et al., 2024a). The lack of sensitivity of this biomarker meant that the present study could not differentiate feeding strategies by their effect on bone resorption. A limitation of our study is the use of a single bone resorption marker (CTX) measured only on two sampling days per experimental cycle. Monitoring of mineral status in sows could be improved by using a bone accretion marker (e.g. osteocalcin or C-terminal propeptide of type I collagen; Shetty et al., 2016) in addition to the resorption biomarker, with more regular sampling during gestation and lactation. Imaging data, such as bone mineral density measured by dual energy x-ray absorptiometry (if the equipment is available), would provide a direct means of monitoring mineral status (Heurtault et al., 2024b), thereby strengthening the results obtained.

Bone mineral content can change even in high-parity sows, as complete ossification in sows is a slow process that ends at 6-7 years of age (Guintard, 2024). Prolonged Ca deficiency can result in lameness, and prolonged P deficiency can result in a low growth rate (Van Riet et al., 2013). In the present study, the frequency of lameness and BW gain may not have differed between feeding strategies due to sows' high ability to adapt to nutritional challenges (Theil et al., 2023), which enables them to recover bone mineral reserves after a short period of deficiency (Floradin et al., 2022). Therefore, gestation is a crucial period of recovery for all body compartments, including bones, whose minerals were mobilised to compensate for nutritional imbalances during the previous lactation. These results indicate that sows were able to recover bone mineral reserves within the first 2 months of gestation under both feeding strategies. However, during the last month of gestation, neither bone resorption nor urinary P concentration decreased when feed quality was increased to meet the daily ATTD-P requirement better than the SF strategy. During the last month of gestation, Bikker and Blok (2017) and Grez-Capdeville and Crenshaw (2022) recommended a daily supply of 7.4 g of STTD-P for primiparous sows weighing 222 kg or 6.0 g of STTD-P for multiparous sows, respectively. In the present study, ATTD-P requirements ranged from 5.6-13.6 g/day, with an overall mean of 8.7 g/day (i.e., 7.9 and 8.8 g/day for primiparous and multiparous sows, respectively). With a feed allowance of 3.5 kg/day for multiparous sows and an ATTD-P content of 2.6 g/kg in diet S, ATTD-P requirements were met for most gestating sows, and the decreased supplies in excess did not decrease their performances or longevity.

Conclusion

Applying a PF strategy decreased SID-Lys intake by 18% over the three consecutive gestations and did not influence sow body composition or farrowing performances. Feed costs were 4€/ton lower, and adjusting P supplies during the last month of gestation did not decrease feed costs further. The results did not support the hypothesis that adjusting P supplies with a fixed dietary Ca:P ratio during the last month of gestation decreases bone resorption or urinary P output. However, the PF strategy increased the number of sows supplied the required amount of P one week before farrowing. To fine-tune mineral PF, bone mineral reserves should be considered when estimating mineral requirements in order to adjust mineral intake at the beginning of gestation, which would decrease excess P without compromising a sow's integrity throughout its productive career. Future studies could also focus on the benefits of adjusting the dietary Ca:P ratio during gestation.

Ethics approval

The experimental protocol was reviewed and approved by the Ethics Committee in Animal Experimentation (Rennes, France, APAFiS reference no. 40427). The experiment was conducted in accordance with French legislation on commercial pig production and experimental animal care.

Data and model availability statement

Most of the data used in this study are available in INRAE's official repository: <https://doi.org/10.57745/POJ8UV> (Ribas et al., 2025). Other data are available upon request from the corresponding author. The model used in this study was not deposited in an official repository.

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors did not use artificial-intelligence-assisted technologies in the writing process.

Author ORCIDs

Clément Ribas: <https://orcid.org/0009-0006-7739-7028>.

Charlotte Gaillard: <https://orcid.org/0000-0002-7896-2520>.

Nathalie Quiniou: <https://orcid.org/0000-0002-2970-8235>.

Declaration of interest

None.

Acknowledgements

The authors thank Didier Pilorget, Kelig Rocher, Sylvie Lechaux, Angélique Debroise, Lisa Chopin, Romain Richard, Loréna Girre and Johan Thomas for taking care of the animals and collecting data during the experiment, as well as all those who helped to sample urine. Many thanks also go to the staff of the INRAE laboratory – Sophie Dare, Raphaël Comte, Cécile Perrier, Maryline Lemarchand and Nathalie Bonhomme – for support during analysis of the samples.

Financial support statement

This study would not have been possible without financial support from INRAE and IFIP for Clément Ribas' Ph.D. grant. The experiment was funded by the SOMOVE project (No. 7376619) as part of the CASDAR programme Connaissances 2022.

References

- Agence Régionale de Santé (ARS) Bretagne, 2017. Qualité des eaux destinées à la consommation humaine en Bretagne -BILAN 2016. ARS Bretagne, Rennes, France. Retrieved on 16 December 2024 from <https://www.bretagne.ars.sante.fr/soif-de-sante-qualite-des-eaux-destinees-la-consommation-humaine-edition-2017>
- Bates, D.M., Mäechler, M., Bolker, B., Walker, S., 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67, 1–48. doi:10.18637/jss.v067.i01
- Becker, L.L., Gebhardt, J.T., Tokach, M.D., Woodworth, J.C., Goodband, R.D., DeRouchey, J.M., 2024. A review of calcium and phosphorus requirement estimates for gestating and lactating sows. *Translational Animal Science* 8, txae087. doi:10.1093/tas/txae087
- Bikker, P., Blok, M.C., 2017. Phosphorus and calcium requirements of growing pigs and sows. CVB documentation report, no. 59. Wageningen Livestock Research, Wageningen, The Netherlands. <https://doi.org/10.18174/424780>.
- Bikker, P., van der Peet-Schwering, C.M.C., Gerrits, W.J.J., Sips, V., Walvoort, C., van Laar, H., 2017. Endogenous phosphorus losses in growing-finishing pigs and gestating sows. *Journal of Animal Science* 95, 1637–1643. doi: 10.2527/jas2016.1041
- Cloutier, L., Galiot, L., Sauvé, B., Pierre, C., Guay, F., Dumas, G., Gagnon, P., Létourneau Montminy, M.-P., 2024. Impact of Precision Feeding During Gestation on the Performance of Sows over Three Cycles. *Animals* 14, 1–20. doi:10.3390/ani14233513
- Cools, A., Maes, D., Decaluwé, R., Buyse, J., van Kempen, T.A.T.G., Liesegang, A., Janssens, G.P.J., 2014. Ad libitum feeding during the periparturient period affects body condition, reproduction results and metabolism of sows. *Animal Reproduction Science* 145, 130–140. doi:10.1016/j.anireprosci.2014.01.008
- Cordell, D., Drangert, J.-O., White, S., 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change, Traditional Peoples and Climate Change* 19, 292–305. doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009
- Dourmad, J.Y., Étienne, M., Noblet, J., Causeur, D., 1997. Prédiction de la composition chimique des truies reproductrices à partir du poids vif et de l'épaisseur de lard dorsal. *Proceedings of the 29th Journées Recherche Porcine*, 4-6 February 1997, Paris, France, pp.255-262.
- Dourmad, J. Y., Etienne, M., Noblet, J., Dubois, S., Boudon, A., 2021a. Contenu corporel en minéraux des truies reproductrices. *Proceedings of the 53rd Journées Recherche Porcine*, 1-4 February 2021, Paris, France, pp. 203–204.
- Dourmad, J. Y., Étienne, M., Valancogne, A., Dubois, S., van Milgen, J., Noblet, J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of sows. *Animal Feed Science and Technology* 143, 372–386. doi:10.1016/j.anifeedsci.2007.05.019

- Dourmad, J. Y., Gauthier, R., Gaillard, C., 2021b. Évolution des concepts nutritionnels et des méthodes d'alimentation des truies reproductrices : historique et perspectives. *INRAE Productions Animales* 34, 111–126. doi:10.20870/productions-animales.2021.34.2.4861
- Feyera, T., Skovmose, S.J.W., Nielsen, S.E., Vodolazska, D., Bruun, T.S., Theil, P.K., 2021. Optimal feed level during the transition period to achieve faster farrowing and high colostrum yield in sows. *Journal of Animal Science* 99, skab040. doi:10.1093/jas/skab040
- Floradin, P., Létourneau-Montminy, M.P., Pomar, C., Schlegel, P., 2022. Development of bone mineralization and body composition of replacement gilts fed a calcium and phosphorus depletion and repletion strategy. *Animal* 16, 100512. doi:10.1016/j.animal.2022.100512
- Gaillard, C., Dourmad, J. Y., 2022. Application of a precision feeding strategy for gestating sows. *Animal Feed Science and Technology* 287, 1–13. doi:10.1016/j.anifeedsci.2022.115280
- Gaillard, C., Durand, M., Largouët, C., Dourmad, J. Y., Tallet, C., 2021. Effects of the environment and animal behavior on nutrient requirements for gestating sows: Future improvements in precision feeding. *Animal Feed Science and Technology* 279, 1–17. doi:10.1016/j.anifeedsci.2021.115034
- Gaillard, C., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J. Y., 2019. Exploration of individual variability to better predict the nutrient requirements of gestating sows. *Journal of Animal Science* 97, 4934–4945. doi:10.1093/jas/skz320
- Gaillard, C., Quiniou, N., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J. Y., 2020. Evaluation of a decision support system for precision feeding of gestating sows. *Journal of Animal Science* 98, 1–12. doi:10.1093/jas/skaa255
- Gaudré, D., Quiniou, N., 2009. What mineral and vitamin levels to recommend in swine diets? *Revista Brasileira de Zootecnia* 38, 190–200. doi:10.1590/S1516-35982009001300019
- Giesemann, M.A., Lewis, A.J., Miller, P.S., Akhter, M.P., 1998. Effects of the reproductive cycle and age on calcium and phosphorus metabolism and bone integrity of sows. *Journal of Animal Science* 76, 796–807. doi:10.2527/1998.763796x
- Greze-Capdeville, M., Crenshaw, T.D., 2022. Estimation of phosphorus requirements of sows based on 24-h urinary phosphorus excretion during gestation and lactation. *British Journal of Nutrition* 128, 377–388. doi:10.1017/S0007114521003421
- Greze-Capdeville, M., Crenshaw, T.D., 2021. Evaluation of calcium to phosphorus ratio in spot urine samples as a practical method to monitor phosphorus intake adequacy in sows. *Journal of Animal Science* 99, 1–7. doi:10.1093/jas/skab335
- Guintard, C., 2024. Ossification et santé osseuse chez le porc: de la croissance à la pathologie ostéoarticulaire. In "Y a Un Os! T'as Mal Où ? Proceedings of the 2024 congress of Association française de Médecine Vétérinaire Porcine (AFMVP), 5-6 December 2024, Rennes, France, article 1.
- Heurtault, J., Hiscocks, S., Létourneau-Montminy, M.P., Schlegel, P., 2024a. Dynamics of bone mineralization in primiparous sows as a function of dietary phosphorus and calcium during lactation. *Animal* 18, 101130. doi:10.1016/j.animal.2024.101130
- Heurtault, J., Maïkoff, G., Létourneau-Montminy, M.P., Schlegel, P., 2024b. Method: Body composition assessment of sows using dual-energy X-ray absorptiometry. *Animal - Open Space* 3, 100079. doi:10.1016/j.anopes.2024.100079
- Hu, Y., Hendriks, W., Baal, J. van, Resink, J.-W., Rodehutsord, M., Krimpen, M.M.V., Bikker, P., 2023. The impact of dietary calcium content on phosphorus absorption and retention in growing pigs is enhanced by dietary microbial phytase supplementation. *British Journal of Nutrition* 129, 955–966. doi:10.1017/S0007114522001039
- Langendijk, P., Fleuren, M., Page, G., 2023. Review: Targeted nutrition in gestating sows: opportunities to enhance sow performance and piglet vitality. *Animal* 17, 100756. doi:10.1016/j.animal.2023.100756
- Lee, S.A., Bedford, M.R., Stein, H.H., 2021. Comparative digestibility and retention of calcium and phosphorus in normal- and high-phytate diets fed to gestating sows and growing pigs. *Animal Feed Science and Technology* 280, 115084. doi:10.1016/j.anifeedsci.2021.115084
- Lee, S.A., Lagos, L.V., Bedford, M.R., Stein, H.H., 2020. Increasing calcium from deficient to adequate concentration in diets for gestating sows decreases digestibility of phosphorus and reduces serum concentration of a bone resorption biomarker. *Journal of Animal Science* 98, 1–8. doi:10.1093/jas/skaa076

- Lee, S.A., Lagos, L.V., Walk, C.L., Stein, H.H., 2019. Basal endogenous loss, standardized total tract digestibility of calcium in calcium carbonate, and retention of calcium in gestating sows change during gestation, but microbial phytase reduces basal endogenous loss of calcium. *Journal of Animal Science* 97, 1712–1721. doi:10.1093/jas/skz048
- Létourneau-Montminy, M.P., Jondreville, C., Sauvant, D., Narcy, A., 2012. Meta-analysis of phosphorus utilization by growing pigs: effect of dietary phosphorus, calcium and exogenous phytase. *Animal* 6, 1590–1600. doi:10.1017/S1751731112000560
- McPherson, R.L., Ji, F., Wu, G., Blanton, J.R., Jr., Kim, S.W., 2004. Growth and compositional changes of fetal tissues in pigs. *Journal of Animal Science* 82, 2534–2540. doi:10.2527/2004.8292534x
- Noblet, J., Shi, X.S., Dubois, S., 1993. Energy cost of standing activity in sows. *Livestock Production Science* 34, 127–136. doi:10.1016/0301-6226(93)90041-F
- Pinheiro, J.C., Bates, D.M., 2000. *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. Springer, New York, NY, USA.
- Poulsen, H.D., Jongbloed, A.W., Latimier, P., Fernández, J.A., 1999. Phosphorus consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands and Denmark. *Livestock Production Science* 58, 251–259. doi:10.1016/S0301-6226(99)00013-5
- Quiniou, N., 2019. Modélisation de l'évolution moyenne du poids vif après la mise bas selon l'âge chez des truies croisées Large White × Landrace. In *Journées Rech. Porcine. Proceedings of the 51st Journées Recherche Porcine*, 5-6 February 2019, Paris, France, pp. 123–128.
- Quiniou, N., Boudon, A., Dourmad, J. Y., Moinecourt, M., Priymenko, N., Narcy, A., 2021. Modélisation du besoin en calcium de la truie reproductrice et variation du rapport phosphocalcique des aliments selon le niveau de performance. *INRAE Productions Animales* 34, 61–78. doi:10.20870/productions-animales.2021.34.1.4723
- R Core Team, 2024. *R: A language and environment for statistical computing*, version 4.4.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ribas, C., Blanc, A., Simon, M., Thomas, J., Quiniou, N., Gaillard, C., 2025. Data paper: Behavioural and production data of sows fed tailored diets over three consecutive gestations. *Animal - Open Space* 4, 100105. doi:10.1016/j.anopes.2025.100105
- Ribas, C., Quiniou, N., Gaillard, C., 2024. On farm precision feeding of gestating sows based on energy and amino acids on farrowing performances and feeding behavior over 3 consecutive gestations. *Journal of Animal Science* 102, 13. doi:10.1093/jas/skae201
- Shetty, S., Kapoor, N., Bondu, J.D., Thomas, N., Paul, T.V., 2016. Bone turnover markers: Emerging tool in the management of osteoporosis. *Indian Journal of Endocrinology and Metabolism* 20, 846–852. doi:10.4103/2230-8210.192914
- Solà-Oriol, D., Gasa, J., 2017. Feeding strategies in pig production: Sows and their piglets. *Animal Feed Science and Technology* 233, 34–52. doi:10.1016/j.anifeedsci.2016.07.018
- Stein, H.H., 2024. Review: Aspects of digestibility and requirements for minerals and vitamin D by growing pigs and sows. *Animal* 18 (suppl. 1), 101125. doi:10.1016/j.animal.2024.101125
- Stein, H.H., Adeola, O., Cromwell, G.L., Kim, S.W., Mahan, D.C., Miller, P.S., 2011. Concentration of dietary calcium supplied by calcium carbonate does not affect the apparent total tract digestibility of calcium, but decreases digestibility of phosphorus by growing pigs. *Journal of Animal Science* 89, 2139–2144. doi:10.2527/jas.2010-3522
- Stewart, V., Buis, R.Q., Christensen, B., Hansen, L.L., De Lange, C.F.M., Mandell, I.B., Huber, L.-A., 2021. The effects of precisely meeting estimated daily energy and lysine requirements for gestating sows over three consecutive pregnancies on sow reproductive and lactation performance. *Translational Animal Science* 5, 1–13. doi:10.1093/tas/txab226
- Theil, P.K., Krogh, U., Bruun, T.S., Feyera, T., 2023. Feeding the modern sow to sustain high productivity. *Molecular Reproduction and Development* 90, 517–532. doi:10.1002/mrd.23571
- van Milgen, J., Dourmad, J. Y., 2015. Concept and application of ideal protein for pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 6, 1–11. doi:10.1186/s40104-015-0016-1
- 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. doi:10.1016/j.livsci.2013.06.005
- Van Riet, M.M.J., Millet, S., Liesegang, A., Nalon, E., Ampe, B., Tuytens, F. a. M., Maes, D., Janssens, G.P.J., 2016. Impact of parity on bone metabolism throughout the reproductive cycle in sows. *Animal* 10, 1714–1721. doi:10.1017/S1751731116000471
- Zhai, H., Cowieson, A.J., Pappenberger, G., Zhang, J., Wu, J., 2021. The effect of short-term phytase supplementation on the apparent total tract digestibility of calcium and phosphorus and the reproductive performance of late gestation and lactating sows fed diets without mineral phosphorus. *Journal of Animal Science* 99, skab194. doi:10.1093/jas/skab194

Supplementary material

Supplementary Material S1.

Statistical models used in R software (v. 4.4.1)

Packages downloaded

```
library(stats)
```

```
library(lme4)
```

```
library(nlme)
```

```
library(car)
```

```
options(contrasts = c("contr.sum", "contr.sum"))
```

Normal variable repeated during an experimental cycle

```
Model1 <- lme(variable ~ initial parity + feeding strategy * experimental cycle, random=~1 | Sow, na.action=na.omit, correlation = corAR1(0.6, form=~ experimental cycle | Sow), data = dataframe, method = "ML")
```

```
Anova(Model1, type=3)
```

Count variable repeated during an experimental cycle

```
Model2 <- glmer(variable ~ initial parity + feeding strategy * experimental cycle + (1 | Sow), data = dataframe, family = poisson(link = "log"))
```

```
Anova(Model2, Type="II")
```

To compare observed and predicted variables

equal variance

```
t.test(dataframe$measured_variable, dataframe$expected_variable, paired=FALSE, var.equal = TRUE)
```

not equal variance

```
t.test(dataframe$measured_variable, dataframe$expected_variable, paired=FALSE, var.equal = FALSE)
```

Supplementary Table S1 Main equations that describe the P use of gestating sows as a function of the day of gestation (t).

Pool		Equations
Maintenance (g/day)	(1)	$P_m(t) = 0.010 \times (BW_{sow}(t) + BW_{conceptus}(t)) \times 0.96$ $BW_{sow}(t)$ = sow BW without conceptus over time in the nutritional model as a function of BW at insemination, target BW at farrowing and nutrient supplies $BW_{conceptus}(t)$ = litter weight $\times \exp [8.74519 - 1.59844 \times \exp (-0.05407 (t - 45)) + 0.00006 \times ME(t) \times t + 0.09745 \times \text{litter size}] / \exp [8.74519 - 1.59844 \times \exp (-0.05407 (\text{gestation duration} - 45)) + 0.00006 \times ME(t) \times \text{gestation duration} + 0.09745 \times \text{litter size}]$
Maternal retention (g/day)	(2)	$P_{mr}(t) = 5.5 \times (BW_{sow}(t) - BW_{sow}(t-1))$
Foetus retention (g/day)	(3)	$P_{foetus}(t) = (BW_{foetus}(t) \times P_{content\ foetus}(t)) - (BW_{foetus}(t-1) \times P_{content\ foetus}(t-1)); t \geq 10$ $BW_{foetus}(t)$ = litter weight $\times \exp [8.72962 - 4.07466 \times \exp (-0.03318 (t - 45)) + 0.00154 \times ME(t) \times t + 0.06774 \times \text{litter size}] / \exp [8.72962 - 4.07466 \times \exp (-0.03318 (\text{gestation duration} - 45)) + 0.00154 \times ME(t) \times \text{gestation duration} + 0.06774 \times \text{litter size}]$ $P_{content\ foetus}(t) = 6.2 \times (0.0565 \times t - 0.736) / (0.0565 \times \text{gestation duration} - 0.736)$
Placenta retention (g/day)	(4)	$P_{placenta}(t) = 0.016 \times (PROT_{placenta}(t) - PROT_{placenta}(t-1))$ $PROT_{placenta}(t) = \exp [7.34264 - 1.40598 \times \exp (-0.0625 \times (t - 45)) + 0.00759 \times t + 0.06339 \times \text{litter size}] / 23.8$
ATTD-P requirements (g/day)		$ATTD-P(t) = P_m(t) + P_{mr}(t) + P_{foetus}(t) + P_{placenta}(t)$

Abbreviations: ME(t) = daily metabolisable energy intake; $P_m(t)$ = daily P requirements for maintenance; $P_{mr}(t)$ = daily P requirements for maternal retention; $P_{foetus}(t)$ = daily P requirements for foetus retention; $P_{placenta}(t)$ = daily P requirements for placenta retention; ATTD = apparent total tract digestibility.

Supplementary Table S2 Analysed chemical composition of the four gestation diets for sows (on an as-fed basis).

Diet	Gestation			
	S	LLys-SP	HLys-SP	HLys-HP
Number of samples	19	8	3	3
DM (g/kg fresh feed)	881	878	881	883
Other components (g/kg)				
CP	122	120	171	160
Ash	52	51	54	64
Crude fat	24	24	25	24
Crude fibre	58	59	55	53
NDF	176	177	171	153
ADF	69	71	71	65
ADL	14	15	15	14
Total Ca	8.8	8.8	8.7	12.7
Total P	4.7	4.8	4.9	6.0
Total Ca:Total P	1.9	1.8	1.8	2.1
Gross energy (MJ/kg)	15.83	15.79	16.11	15.86

Abbreviations: S = standard; LLys-SP = low SID-Lys and standard ATTD-P content; HLys-SP = high SID-Lys and standard ATTD-P content; HLys-HP = high SID-Lys and ATTD-P content; SID = standardised ileal digestible; ATTD = apparent total tract digestibility.

Supplementary Table S3 Feed and nutrient intake at different periods by feeding strategy (SF vs. PF) for the sows that completed all three consecutive experimental cycles.

Strategy	Experimental cycle						RSD	P-value		
	1		2		3			Strategy	Cycle	Strategy × Cycle
	SF	PF	SF	PF	SF	PF				
Number of sows	15	18	15	18	15	18				
From insemination to day 24 of gestation ¹										
Duration (days)	24.0	23.9	23.5	23.6	24.0	24.0	0.08	0.98	0.98	0.98
Feed intake (kg)	83	83	84	86	86	86	8.3	0.81	0.009	0.81
From day 25 of gestation to farrowing ²										
Duration (days)	89.1	89.8	90.0	89.4	90.1	90.2	0.20	0.93	0.80	0.91
Feed intake (kg)	320	318	326	331	330	335	24.5	0.99	0.002	0.64
N intake (kg)	6.14	5.96	6.26	6.14	6.34	6.18	0.369	0.65	0.005	0.90
SID-Lys intake (kg)	1.50 ^a	1.21 ^b	1.53 ^a	1.22 ^b	1.55 ^a	1.22 ^b	0.067	< 0.001	0.04	0.10
ATTD-P intake (kg)	0.83	0.84	0.85	0.87	0.86	0.88	0.070	0.72	0.003	0.70
After farrowing (sow) ³										
Duration of lactation (days)	26.7	26.3	27.5	27.4	27.3	26.9	0.28	0.76	0.64	0.99
Lactation diet (kg)	168	159	188	189	189	179	22.7	0.55	< 0.001	0.98

Abbreviations: SF = standard feeding; PF = precision feeding; SID = standardised ileal digestible; ATTD-P = apparent total tract digestibility of P.

¹ Before being group-housed, all sows received the S gestation diet.

² SF sows received the S gestation diet, whereas PF sows received a mixture of L_{Lys}-S_P and H_{Lys}-S_P until day 80 of gestation and then a mixture of L_{Lys}-S_P, H_{Lys}-S_P and H_{Lys}-H_P until farrowing.

³ After farrowing, all sows received a standard lactation diet.

^{a,b} Values within a row with different superscripts differ significantly at $P < 0.05$.

Supplementary Table S4 Observed and predicted BW and backfat thickness (BT) at the beginning of gestation, one month before farrowing, at the beginning of maternity and at weaning by feeding strategy (SF vs. PF) for sows that completed all three consecutive experimental cycles.

Strategy	Experimental cycle						RSD	P-value			Observed vs. Predicted ¹
	1		2		3			Strategy	Cycle	Strategy × Cycle	
	SF	PF	SF	PF	SF	PF					
Number of sows	15	18	15	18	15	18					
Parity	2.5	2.2	3.5	3.2	4.5	4.2	0.51	0.74	< 0.001	0.84	-
Age at insemination (days)	619	584	766	731	913	878	1.7	0.90	< 0.001	0.31	-
Predicted											
Middle ² BW (kg)	282	278	302	297	317	313	8.5	-	-	-	0.88
Final ³ BW (kg)	284	282	283	280	296	294	16.0	-	-	-	< 0.001
Final ³ BT (mm)	20.1	20.0	20.0	20.0	20.0	20.2	2.41	-	-	-	0.09
Observed											
Initial ⁴ BW (kg)	216	210	239	231	256	252	21.9	0.55	< 0.001	0.75	-
Initial ⁴ BT (mm)	15.1	15.2	15.7	15.6	16.0	16.4	1.69	0.99	0.01	0.73	-
Middle ² BW (kg)	277	271	317	312	317	309	16.9	0.86	< 0.001	0.83	-
Middle ² BT (mm)	20.1	19.8	20.3	20.1	20.9	21.7	1.54	0.35	< 0.001	0.10	-
BW before farrowing (kg)	314	307	340	334	347	348	20.1	0.45	< 0.001	0.33	-
Final ³ BW (kg)	282	273	305	299	311	311	18.9	0.22	< 0.001	0.21	-
Final ³ BT (mm)	20.0 ^b	20.0 ^b	20.4 ^{ab}	20.1 ^b	20.7 ^{ab}	21.7 ^a	1.33	0.36	< 0.001	0.04	-
Weaning BW (kg)	247	239	272	269	279	275	17.4	0.44	< 0.001	0.56	-
Weaning BT (mm)	15.4	15.1	16.6	16.5	16.2	16.8	1.42	0.54	< 0.001	0.21	-
Change in BW and BT											
Last month BW gain (kg)	38 ^a	38 ^a	23 ^c	22 ^c	31 ^b	39 ^a	11.2	0.14	0.11	0.03	-
Last month BT gain (mm)	-0.1	0.2	0.0	0.0	-0.2	0.0	1.53	0.80	0.61	0.96	-
Gestation BW gain (kg)	66	64	66	68	55	59	11.2	0.44	< 0.001	0.21	-
Gestation BT gain (mm)	5.0	4.8	4.7	4.5	4.8	5.4	2.02	0.43	0.61	0.29	-
Lactation BW loss (kg)	35	34	33	30	32	36	8.4	0.43	0.67	0.24	-
Lactation BT loss (mm)	4.6	4.8	3.8	3.6	4.5	5.0	1.68	0.80	0.94	0.61	-
Cycle BW gain (kg)	31	29	34	38	23	24	14.7	0.83	0.02	0.67	-
Cycle BT gain (mm)	0.3	-0.1	0.9	0.9	0.2	0.4	2.27	0.47	0.59	0.50	-

Abbreviations: SF = standard feeding; PF = precision feeding; BT = backfat thickness.

¹ Student's *t*-test for middle BW and Welch's *t*-test for final BW and final BT.

² BW and BT of the sow on day 80 of gestation.

³ BW and BT of the sow after farrowing.

⁴ BW and BT of the sow 1 week after insemination.

^{a,b,c} Values within a row with different superscripts differ significantly at $P < 0.05$.

Supplementary Table S5 Observed and predicted litter characteristics at birth and performances observed until weaning by feeding strategy (SF vs. PF) for the sows that completed all three consecutive experimental cycles.

Strategy	Experimental cycle							P-value			
	1		2		3		RSD	Strategy ×			Observed vs. Predicted ¹
	SF	PF	SF	PF	SF	PF		Strategy	Cycle	Cycle	
Number of sows	15	18	15	18	15	18					
Expectations at birth (litter)											
Litter size	17.9	17.8	18.0	18.0	18.0	18.0	4.05	-	-	-	0.04
Birth weight (kg)	1.44	1.43	1.45	1.45	1.45	1.45	0.244	-	-	-	0.93
Observed at birth											
Litter size	16.7	18.1	19.5	18.6	20.3	19.6	4.06	0.24	0.002	0.23	-
Piglets born alive	15.7	17.1	18.0	17.3	18.3	17.9	3.38	0.23	0.01	0.22	-
Stillborn piglets	1.0	1.0	1.5	1.3	2.0	1.7	1.13	0.47	0.007	0.74	-
Litter weight (kg)	24.0	26.0	25.9	26.6	27.3	27.8	4.96	0.15	0.003	0.41	-
Birth weight (kg)	1.53	1.50	1.35	1.47	1.36	1.44	0.209	0.63	0.02	0.25	-
Within-litter CV of birth weight (%)	22.4	21.6	25.9	24.2	24.6	23.7	7.4	0.80	0.15	0.97	-
Observed at weaning											
Litter size	12.1	12.9	12.9	12.3	12.4	12.6	2.25	0.35	0.99	0.48	-
Litter weight (kg)	110	109	106	104	102	101	13.9	0.91	0.009	0.95	-
Weaning weight (kg)	8.31	8.01	8.14	8.12	8.16	8.11	0.958	0.34	0.88	0.53	-
Average daily gain											
Litter (kg/day)	3.28	3.29	3.16	3.08	3.07	3.01	0.361	0.89	0.002	0.67	-
Piglet (g/day)	249	242	242	239	247	242	26.2	0.49	0.85	0.78	-

Abbreviations: SF = standard feeding; PF = precision feeding.

¹ Welch's *t*-test.

Supplementary Table S6 Effect of the feeding strategy (SF vs. PF) on feed costs and nutrient balances during gestation for the sows that completed all three consecutive experimental cycles.

Strategy	Experimental cycle						RSD	P-value		
	1		2		3			Strategy	Cycle	Strategy × Cycle
	SF	PF	SF	PF	SF	PF				
Number of sows	15	18	15	18	15	18				
Percentage of diet consumed (%)										
S	100	22	100	21	100	22	0.1	< 0.001	0.96	0.83
L ₁₀₀ -S ₂₁	0	71	0	73	0	74	0.2	< 0.001	0.30	0.19
H ₁₀₀ -S ₂₁	0	6	0	4	0	3	0.4	< 0.001	< 0.001	0.78
H ₁₀₀ -H ₂₁	0	1	0	2	0	1	0.5	< 0.001	0.80	0.74
Feed cost										
Total feed intake (€)	117	115	119	119	120	120	9.4	0.91	0.003	0.96
Days 25-80 of gestation ¹ (€)	57	55	59	58	60	59	7.2	0.58	< 0.001	0.86
Last month of gestation (€)	35	36	35	36	35	36	2.1	0.47	0.73	0.70
Feed (€/ton)	289 ^a	286 ^b	289 ^a	285 ^c	289 ^a	284 ^d	1.2	< 0.001	< 0.001	< 0.001
N balance										
Total intake (kg)	7.75	7.56	7.88	7.78	8.00	7.83	0.546	0.81	0.005	0.84
Intake, days 25-80 of gestation ¹ (kg)	3.82	3.54	3.90	3.75	4.01	3.79	0.471	0.27	< 0.001	0.99
Intake, last month of gestation (kg)	2.33	2.42	2.35	2.44	2.31	2.39	0.147	0.11	0.37	0.86
Retention ² (kg)	1.53	1.51	1.57	1.62	1.24	1.34	0.290	0.60	< 0.001	0.34
Faecal output ³ (kg)	1.42	1.38	1.44	1.44	1.48	1.45	0.130	0.65	< 0.001	0.75
Urinary output ⁴ (kg)	4.80	4.84	4.87	4.72	5.30	5.04	0.255	0.91	< 0.001	0.28
Efficiency of use ⁵ (% of intake)	19.7	20.1	19.9	20.8	15.4	17.1	2.9	0.77	< 0.001	0.30
P balance										
Total intake (kg)	2.02	2.00	2.05	2.07	2.08	2.09	0.188	0.99	< 0.001	0.86
Retention ² (kg)	0.30	0.30	0.29	0.31	0.23	0.25	0.055	0.68	< 0.001	0.36
Faecal output ³ (kg)	0.97	0.94	0.98	0.98	1.00	0.98	0.08	0.64	0.002	0.91
Urinary output ⁴ (kg)	0.75	0.76	0.78	0.78	0.85	0.86	0.053	0.56	< 0.001	0.78
Efficiency of use ⁵ (% of intake)	14.7	14.9	14.3	14.8	11.0	11.8	2.1	0.75	< 0.001	0.40

Abbreviations: SF = standard feeding; PF = precision feeding; S = standard; L₁₀₀-S₂₁ = low SID-Lys and standard ATTD-P content; H₁₀₀-S₂₁ = high SID-Lys and standard ATTD-P content; H₁₀₀-H₂₁ = high SID-Lys and ATTD-P content; SID = standardised ileal digestible; ATTD = apparent total tract digestibility.

¹ The period when PF sows were supplied a daily mixture of L₁₀₀-S₂₁ and H₁₀₀-S₂₁.

² Retention calculated using equations of Dourmad et al. (2008, 2021a) and BW and BT at insemination and farrowing.

³ Faecal output calculated based on non-digestible N and P in feed intake.

⁴ Urine output equals intake - (retention + faecal output).

⁵ Efficiency of use equals retention/intake.

^{a, b, c, d} Values within a row with different superscripts differ significantly at *P* < 0.05.

7. Une base de données de production de truies gestantes logées en groupe et ayant une alimentation sur mesure sur le long terme

Les résultats de cette partie sont issus d'un article accepté dans *Animal Open Space* en juillet 2025 (Ribas, C., Blanc, A., Simon, M., Thomas, J., Quiniou, N., Gaillard, C., 2025. Data paper: behavioural and production data of sows fed tailored diets over three consecutive gestations. *Animal – Open Space* 4, 100105. <https://doi.org/10.1016/j.anopes.2025.100105>).

Résumé :

Cette base de données a été créée pour mieux comprendre l'effet long-terme d'une alimentation sur mesure (**PF**, *i.e.*, l'apport d'un mélange individualisé d'aliments pour répondre aux besoins individuels estimés) sur les performances des truies gestantes, comparées à des truies nourries selon une stratégie d'alimentation conventionnelle (*i.e.*, l'apport d'un aliment unique tout au long de la gestation). Deux expérimentations ont été réalisées avec des apports aux truies PF individualisés journalièrement quand elles étaient en groupe, selon les besoins en énergie et acides aminés (essai 1) et additionnellement sur les besoins en minéraux durant le dernier mois de gestation (essai 2). Les truies ont été logées en groupe du jour 3 (essai 1) ou 25 (essai 2) jusqu'au jour 108 de gestation. Les données ont été collectées sur les truies suivies de une à trois gestations consécutives provenant de 58 (essai 1) ou 77 (essai 2) truies. Les cases de gestation étaient équipées avec des alimentateurs et abreuvoirs automatiques permettant de suivre le comportement alimentaire et d'abreuvement, avec une balance automatique pour mesurer le poids et des caméras pour suivre le comportement et la localisation des truies à l'échelle individuelle et journalière. Un logiciel d'analyse automatique de vidéos a permis l'étude à l'échelle du groupe de l'activité physique des truies, sur trois différents stades de gestation. L'activité physique a été enregistrée individuellement avec des accéléromètres pour quelques truies. Les interactions sociales, la catégorie d'activité, et la localisation dans la salle ont été caractérisées à l'échelle individuelle sur des périodes spécifiques à partir d'analyses manuelles de vidéos. L'épaisseur de lard dorsal (**ELD**) a été mesurée manuellement avec un appareil à ultrason portable. La propreté, les griffures et boiteries ont été notées de manière hebdomadaire durant la gestation. Chaque salle de gestation était équipée avec des appareils qui permettaient le suivi de la température ambiante, l'humidité relative et d'autres critères tels que le bruit ou la concentration en méthane. A la mise-bas, la taille et le poids de la portée ont été mesurés. Les données ont été utilisées pour analyser les effets

des stratégies alimentaires sur le comportement alimentaire, la variation de poids et d'ELD durant la gestation, l'état de santé, les interactions sociales quand les truies étaient en groupe et les caractéristiques de portée à la mise-bas. La base de données contient une grande quantité de données incluant le contenu nutritionnel des aliments et leur consommation, les comportements, les paramètres d'ambiance et les performances des truies en gestation en groupe permettant l'utilisation d'approches de fouille de données. La base de données longitudinales peut être utilisée pour corrélérer le comportement alimentaire avec l'activité physique ou les paramètres d'ambiance. Les phénotypes communs (poids, ELD) collectés à des stades clés différents de la gestation pourraient être utilisés pour agrandir les bases de données existantes pour avoir une plus grande puissance statistique.

Specifications Table

Subject	<i>Nutrition</i>
Specific subject area	Performances and behaviours of gestating sows fed long-term precision feeding strategies.
Type of data	MariaBD database structured in 20 tables containing three areas of data: sow data and experiment characteristics, sensors and automatons measures, and manual measures.
How data were acquired	Data were collected in two different gestation units. Feed intake and feeding visits were recorded thanks to two automatic feeders in each gestating pen. Two automatic drinkers recorded water intake and visit characteristics (time, duration). Physical activity was tracked with accelerometers on the sows' ears and with camera. Social interaction, activity and pen location were assessed through manual video analysis. Ambient condition was recorded with a temperature and humidity device, and an additional multiple sensor device for the trial 2. The sows were weighed with an automatic scale when group-housed and with a manual scale at least two times during the gestation. Backfat thickness was measured at the P2 site with an ultrasound portable device at least two times: at the start of insemination and exit of the gestation room. Health data (lameness, scratches and cleanliness) were collected weekly during gestation. Characteristics of the litter were recorded at birth manually in the farrowing room.

Data format	Data are available under two formats: .SQL (database structure and data of each table) and .CSV files (data of each table).
Parameters for data collection	135 sows from two farms were studied over one to three consecutive gestations. Each sow was allocated either to a conventional feeding strategy (i.e. a unique diet throughout the gestation) or a precision feeding strategy (i.e. a blend of different diets to adapt nutrient supplies to requirements estimated daily with a nutritional model on an individual basis).
Description of data collection	All data collected by sensors and automatons during the experiment were first checked for outliers (removed when detected) and organised as a relational database. Consistency of manual data were checked for minimum and maximum values, date and time format. Unicity of data was checked with the cross-referencing of two tables through the foreign key between tables.
Data source location	Trial 1 - Pig Physiology and Phenotyping Experimental Facility (UE3P, INRAE, https://doi.org/10.15454/1.5573932732039927E12), Saint-Gilles (35590), France Trial 2 - IFIP-Institut du Porc, Romillé (35850), France
Data accessibility	Repository name: <i>Recherche Data Gouv</i> , <i>Data INRAE, Pegase</i> Data identification number: https://doi.org/10.57745/POJ8UV
Related research article	Ribas, C., Quiniou, N., Gaillard, C., 2024. On farm precision feeding of gestating sows based on energy and amino acids on farrowing performances and feeding behavior over 3 consecutive gestations. Journal of Animal Science, 102, skae201, https://doi.org/10.1093/jas/skae201 . (results of trial 1). Another publication is in preparation concerning the results of trial 2.

Value of the Data

This database presents a range of performances from gestating sows fed either with a precision feeding strategy (i.e. adjusted daily and individually) or a conventional feeding strategy (i.e. fixed diet). It contains individual feed intake, feeding and drinking behaviours, BW and backfat thickness, farrowing and lactation data, health status, social interactions, activities and pen location by manual video analysis and physical activity recorded by accelerometers and analysed by automatic video analysis.

Sows were followed from one to three consecutive gestations providing rich longitudinal database. Detailed dietary characteristics and daily individual feed intake are available. It allows for example the exploration of correlation between feeding behaviour data and others parameters like physical activity. Feeding behaviour during gestation can also be influenced by the ambient parameters which are available in the database.

The large dataset may be used to unsupervised data mining approaches. Feeding visits and non-feeding visits are available to characterise sow feeding behaviour. Similar data are available to study the drinking behaviour.

This database provides a large number of phenotypes commonly studied in sow. It can contribute to future research in gestating sows' behaviour, and nutrition fields. Combined with datasets from other experiments, it can also be used to improve the statistical power in statistical analyses.

Data Description

The dataset is composed of 20 tables structured as a relational database with SQL standards (Tableau 7.1), separated into three different types of data:

- 1) sow data and the experiment characteristics: farm, sow, cycle, batch, pen and feed_content in the diet
- 2) data collected with sensors and automatons: sensor, feed_visit, feed_measure, water_measure, weight_measure, environmental_measure, activity_accelerometers, automatic_activity_video_detailed_measure, automatic activity_video_aggregated_measure
- 3) data collected manually and other types of data: litter_characteristics, health of the sow, performances_sow, video_analysis_focus, video_analysis_scan

Tableau 7.1 – Description of the 20 tables of the database of gestating sows fed tailored¹ diets

Table's name	Primary key ²	Foreign keys ³	Data type ⁴	Number of columns	Number of rows
Sow data and experiment characteristics					
1.1. Farm	ID_farm	none	raw	4	2
1.2. Sow	ID_sow	ID_farm	raw	3	135
1.3. Cycle	ID_exp_sow	ID_sow; ID_batch	raw	7	285
1.4. Batch	ID_batch	ID_farm; ID_pen	raw	5	12
1.5. Pen	ID_pen	none	raw	4	3
1.6. Feed_content	ID_diet	none	raw	17	9
Sensors and automatons measures					
2.1. Sensor	ID_sensor	ID_pen	raw	6	46
2.2. Feed_visit	ID_visit_feeder	ID_exp_sow; ID_sensor	processed	7	119 000
2.3. Feed_measure	ID_feed_feeder	ID_visit_feeder; ID_diet	processed	4	347 196
2.4. Water_measure	ID_visit_water	ID_exp_sow; ID_sensor	processed	8	177 668
2.5. Weight_measure	ID_visit_weight	ID_exp_sow; ID_sensor	processed	6	138 288
2.6. Environmental_measure	ID_environmental_measure	ID_sensor	processed	15	243 327
2.7. Activity_accelerometers	ID_activity_accelerometer	ID_exp_sow	processed	8	45 466
2.8. Automatic_activity_video_detailed_measure	ID_automatic_video_detailed	ID_batch	raw	13	551 300
2.9. Automatic_activity_video_aggregated_measure	ID_automatic_video_aggregated	ID_batch	raw	14	7 939
Manual measures					
3.1. Litter_characteristics	ID_maternity	ID_exp_sow	raw	16	250
3.2. Health	ID_health_measure	ID_exp_sow	raw	14	5 109
3.3. Performances_sow	ID_perf_measure	ID_exp_sow	raw	6	827
3.4. Video_analysis_focus	ID_video_analysis_focus	ID_sensor; ID_exp_sow	raw	12	11 222
3.5. Video_analysis_scan	ID_video_analysis_scan	ID_sensor; ID_exp_sow	raw	10	7 300

¹Precision feeding strategy (i.e., delivery of an individualised mix of different diets to meet estimated individual requirements) compared to a conventional

feeding strategy (i.e., delivery of a single diet throughout gestation) was applied.

²Primary keys are unique for each table.

³Foreign keys are meant to link the different tables of the database.

⁴The data cleaning procedure for processed data is available in the main text.

The tables farm, batch and pen gather all the information regarding the farms. The number of batches per farm (farm), the dates of entry and exit of each batch from the gestation pen (batch) and the type of gestation pen with a dynamic or a static group (pen) are available. Feed_content table contains the nutritional composition of the formulated diets used in gestation and lactation during the two trials. The sows' birth date, parity, treatment, batch and additional information about their gestating cycle are contained in tables sow and cycle. Sensor table provides characteristics of the sensors (manufacturer, identifier) used during the trials. Feed_visit, feed_measure and water_measure list all the visits to the automatons (sow id, date and time of entry and date and time of exit, amount of feed or water ingested). Weight_measure contains the sow BW measured automatically each day. Environmental_measure gather the room's environmental parameters such as relative humidity and ambient temperature measured every 20 minutes, and luminosity, noise and gas concentrations measured every 15 minutes. Activity_accelerometer, automatic_activity_video_detailed_measure and automatic_activity_video_aggregated_measure contain the physical activity of sows in the pen. Activities are expressed as time spent per posture such as standing or lying down, measured respectively by the accelerometers and by video analysis. For the latter, an automatic video analysis software measures for a tracking period of 2 hours per day over three key stages of gestation the posture, location in the gestating pen and key points (nose, neck and tail) of each sow. Data were obtained every half-second for the detailed measures, and every hour for aggregated measures. The criteria recorded manually (backfat thickness, BW,

animal care. Two batches of 20 Landrace x Large White sows were initially involved in the study. Around three days after insemination, the sows were housed in group pen (7.5 m × 8.0 m) with concrete floor and daily straw provision. Each pen housed a maximum of 20 sows, and feeding was managed by two automatic feeders (Gestal 3G, JYGA Technologies Inc, Québec, Canada) that mixed two diets in individualised proportions. The sows also had free access to water via two drinking troughs with integrated scales (Aqualab, Asserva, Lamballe, France). Ventilation rate in the gestation room was set to regulate temperature around 21°C. The sows were transferred to farrowing rooms about 1 week before the expected farrowing date (106.9 ± 0.7 days). Ambient temperature and relative humidity were recorded with an EL-USB-2-LCD data logger in each gestating pen at a height of 1.8 m (Lascar Electronics, United Kingdom, precision ± 0.55 °C and ± 2.25 % relative humidity). Three ceiling-mounted cameras (Hikvision DS-2CD2145FWD-I-S) provided a continuous day and night recording. At the start of the trial, sows weighed 199 kg on average with an average backfat thickness (BT) of 15.4 mm and an average parity of 2.8. A more detailed explanation of the experimental design was provided previously (Ribas et al., 2024).

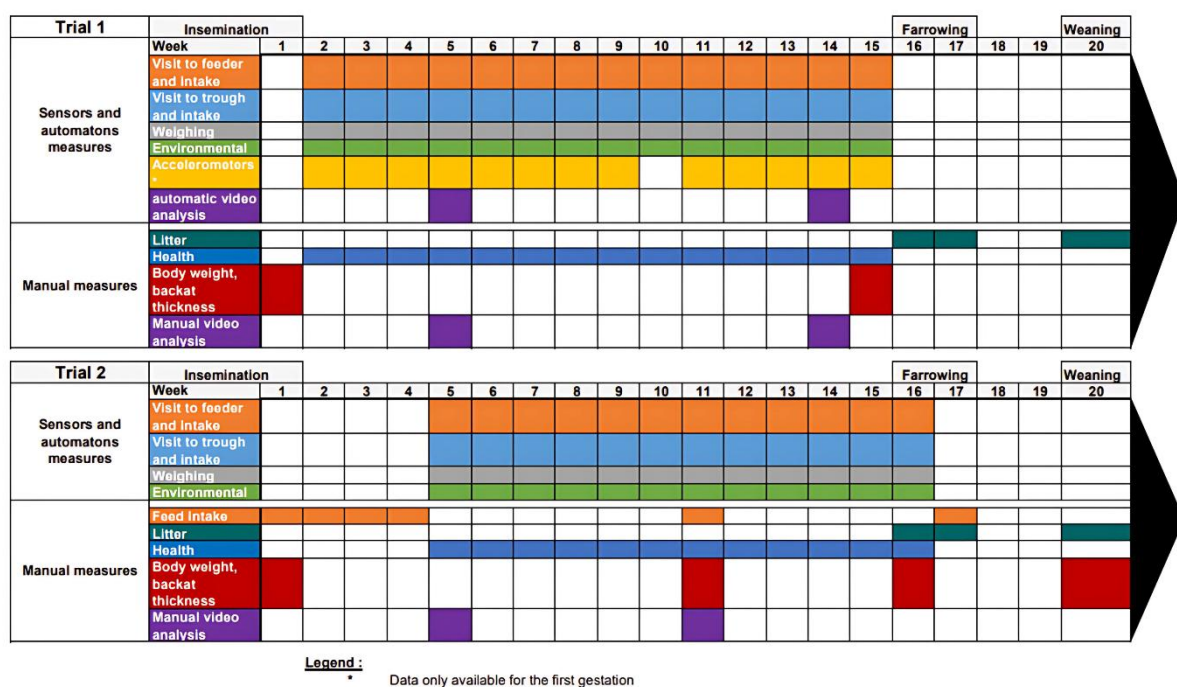


Figure 7.2 : Summary of the experimental design and data collection on gestating sows for the two trials. Only one gestation-lactation cycle is represented but the data collection is similar between cycles unless otherwise stated.

Trial 2 was conducted at the IFIP-Institut du Porc in Romillé, France, between February 2023 and April 2024 and approved by the Ethics Committee in Animal Experimentation (APAFiS #40427). It involved two groups of 24 primiparous and multiparous Landrace x Large White

sows, monitored over three consecutive gestation cycles. Initially, sows were housed individually from insemination until day 25 of gestation with manual feeding and free access to water. At day 25, they were moved to a dynamic group-housed pen (22.25 m x 9.12 m) with fully slatted flooring. The gestating pen was equipped with two automatics drinking troughs (Aqualab, Asserva, Lamballe, France) and two automatic feeders (Selfimat, Asserva, Lamballe, France) with four hoppers to provide individualised mixtures based on one to four diets. The pen was also equipped with two automatic weighing scales (Asserva, Lamballe, France) located on the automatic feeder exit path. About one week before farrowing, the sows were transferred to the farrowing unit. Ventilation in the gestating pen was set to maintain a temperature of 22°C. Two IOT devices (CLS-AIR MODULE, Cynomys, Genova, Italy) were fixed on the gestation walls at 1.5 m above the ground. They recorded ambient temperature, relative humidity, ammonia, hydrogen sulphide, carbon dioxide, methane, luminosity, particulate matter, and noise every 30 seconds and send the average value to a cloud platform every 20 minutes. Ambient temperature and relative humidity were also recorded with five EL-USB-2-LCD data loggers located in all area of the group-housed gestating pen (Lascar Electronics, United Kingdom, precision ± 0.55 °C and ± 2.25 % relative humidity). Six ceiling-mounted cameras (Hikvision Fish-eye - DS-2CD63C5G0E-IVS) provided a continuous day and night recording. At the start of the trial, sows weighed 206 kg on average with a BT of 13.7 mm and an average parity of 3.0.

Feeding protocols

In both trials, the sows were allocated to one of two feeding strategies (precision feeding, **PF** vs. conventional feeding, **CF**) based on their parity (1, 2, or 3+), BW, and backfat thickness measured at P2 position 3 to 7 days after the first insemination. The same feeding strategy was maintained throughout the experiment unless the sow was culled for health or performance reasons. Then, culled sows were replaced by replacement gilts that completed only one or two gestations.

In trial 1, two gestation diets (GL and GH) were formulated on an iso-net energy basis (9.8 MJ/kg) with different amino acid concentrations (considering lysine as the limiting amino acid). The standardised ileal digestible lysine (**SID Lys**) content of GL and GH diet was 3.3 and 8.5 g/kg of feed respectively. For the PF strategy, diet proportions were adjusted daily based on the estimated SID Lys requirement of each sow. In contrast, CF sows received a fixed 73% GL and 27% GH blend. Feeding allowances was supplied according to a 3-phase u-curve feeding pattern, i.e. the daily feed supplied was constant within each phase and the second phase had a lower daily feed supplied than the others. First phase between insemination and

day 35 of gestation was used to let sows recover their maternal reserves used during previous lactation. The second phase was between days 36 and 85 of gestation where feeding supplies were close to energy maintenance requirements. The third phase after 86 days of gestation for both strategies increased feed allowance by 500 g/day from previous phase to follow the increase in energy requirement for fetal growth.

In trial 2, four experimental gestation diets were formulated to be iso-net energy (9.00 MJ/kg), with different levels of SID Lys (low: 3.3 g/kg or high: 8.5 g/kg) and apparent total tract digestible phosphorus (**ATTD P**; standard: 2.6 g/kg or high: 4.0 g/kg). Diet formulated for a low lysine and a standard phosphorus content was called LLys_SP, the diet with a high lysine and a standard phosphorus level was called HLys_SP, and the diet with a high lysine and high phosphorus level was called HLys_HP. These diets were delivered only to PF sows during gestation, depending on their individual nutrient requirements. Before the day 80 of gestation, the blend was decided based on the amino acids requirements whereas after the day 80 and up to farrowing, the daily and individual ATTD P requirement was also taken into account. In contrast, CF sows received a standard diet throughout gestation which was iso-energy with PF diets and contained 4.7 g/kg of feed of SID Lys and 2.6 g/kg of feed of ATTD P. As for trial 1, feeding allowances was set to follow a 3-phase u-curve feeding pattern. However, the first phase was between insemination and day 9 of gestation, the second one between day 10 and day 80 of gestation and afterwards the third phase up to farrowing.

Data collection, and pretreatment

In trial 1, each sow was equipped with radiofrequency identification (**RFID**) ear tags to be detected and identified by the feed and water dispensers and the automatic weighing scales. As pre-processing of raw data, visits to feeders or drinkers with no recorded duration or overlapping data were excluded. Sows were weighed automatically (Asserva, Lamballe, France) and their backfat thickness measured manually at P2 position with a portative ultrasound device (Imago, ECM, France) 3 days after insemination and around day 107 of gestation. Weekly health checks were conducted by trained observers in the pen, using the Welfare Quality® protocol to assess health and welfare indicators (i.e. bursitis score, absence of manure on the body, lameness, wounds count on the body and absence of disease). At farrowing, the number of born alive or stillborn piglets were recorded, and they were weighed. Some piglets were cross-fostered based on functional teats available without taking into account the sow feeding strategy. Piglets were given creep feed from week 3 onwards and weighed the day before weaning. Piglet mortality and BW gain were recorded to calculate the average daily gain for the litter.

Trained observers manually analysed video recordings to track individual social behaviour (positive and negative social interaction, exploration), location, and physical activity (sitting, lying, standing, drinking, eating) on two days during a specific 2-hour period (days 30 and 103, from 00:00h to 02:00h). Each sow was equipped, during the first gestation cycle, with an ear tag accelerometer (Actisow, RF-Track, Rennes, France), which continuously monitored their physical activity, unless the device broke which occurred quite often and early (67% of devices out of service at the end of first gestation). Physical activities were also analysed automatically at a group level (on days 30 and 103, from 00:00h to 02:00h) from video recordings using an image analysis software developed by Dilepix (Rennes, France, Gaillard and Simon, 2024). This time slot was selected because access to the individual daily ration at the automatic feeders was renewed every day at midnight for trial 1.

Data from automatons and sensors were preprocessed to remove raw data that was not linked to the sows involved in the trial, as well as data for which the sensor identifier was not available. Daily sensor files were aggregated into a relational database. Accelerometer data were excluded if the total recorded duration per hour did not equal 60 minutes plus or minus one minute, or if duplicate entries were found representing 0.3% of raw data removed. Identification codes from automatons and sensors were all linked to each sow's experiment number.

In trial 2, individual sow visits to the automatic feeder were tracked using RFID ear-tags. Visits to the feeder and to the drinking trough were measured and cleaned as done for the trial 1. Weekly health assessments, particularly lameness through sow's gait, were performed by the same trained observer during all the trial. Feed weighed and supplied manually before the entrance in group-housed gestation room and after the transfer to the farrowing room for PF were also recorded and aggregated in the database. Sows were weighed automatically between day 25 and day 108 of gestation and had their BW and backfat thickness measured manually at key stages: 1 week after insemination, on day 80, on day 107 when transferred to the farrowing room, on Monday before farrowing, and the day before weaning. Automatic average BW was cleaned for outliers thanks to 3 days rolling average to check its inter-day within-sow consistency. If the daily BW differed by more than 20 kg from the rolling average over the previous 3 days, the associated data was excluded from the database. Piglet data, including birth weight and status at birth, were recorded. Cross-fostering was used to adapt the size of the litter to the number of functional teats with piglets from sows with the same feeding strategy. Piglets were given creep feed from week 2 onwards and weighed the day before weaning. For the CLS-AIR MODULES, data were merged at the minute time-scale. Ammonia values above 100 ppm were removed as well as relative humidity values below 0 %, ambient temperature values below - 5°C, hydrogen sulphide values above 50 ppm, methane

values above 2 % of the volume and luminosity values above 600 lux. These exclusion thresholds have been established on the basis of a graphical view of the data. Trained observers also manually analysed video recordings of this experiment to track individual social behavior, location, occupation, and physical activity on 2 days during two specific 2-hour periods (days 30 and 80, from 12:00h to 14:00h and from 18:00h to 20:00h). In contrast to trial 1, these time slots were selected because ration was renewed at midday.

Ethics approval

Ethical approval concerning the French legislation on experimental animal care was approved by the Ethics Committee in Animal Experimentation in Rennes, France (APAFiS #24663 and #40427).

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors did not use any artificial intelligence assisted technologies in the writing process.

Author ORCIDs

Clément Ribas: <https://orcid.org/0009-0006-7739-7028>.

Anna Blanc: <https://orcid.org/0009-0006-8634-7620>.

Mathieu Simon: AI company, do not have an ORCID.

Johan Thomas: <https://orcid.org/0009-0009-8405-0155>.

Nathalie Quiniou: <https://orcid.org/0000-0002-2970-8235>.

Charlotte Gaillard: <https://orcid.org/0000-0002-7896-2520>.

Author contributions

CR: Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Investigation, Resources, Data Curation, Visualization, Formal analysis; AB: Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Investigation, Data Curation; MS: Writing - Review & Editing, Investigation, Resources, Data Curation, Methodology, Software; JT: Writing - Review & Editing, Resources, Investigation; NQ: Writing - Review & Editing, Resources, Investigation, Funding acquisition, Project Administration; CG: Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Data Curation, Funding acquisition, Conceptualization, Supervision, Project Administration.

Declaration of interest

None.

Acknowledgements

The authors would like to thank all the trainees involved in the manual videos analyses, and the technical staffs involved in trials 1 and 2, for taking care of animals and for their contribution in data collection, and maintenance of the automatons and sensors.

Financial support statement

This study would not have been possible without the financial support from INRAE and IFIP for Clément Ribas' PhD grant. The experimental phase of trial 2 was funded by the SOMOVE project (No. 7376619) as part of the CASDAR Connaissances 2022.

References

- Gaillard, C., Simon, M., 2024. Improvement of an algorithm performance to estimate the physical activity of group-housed sows based on videos. Paper presented at the 75th Annual Meeting of the European Association for Animal Production, 1-5 September 2024, Florence, Italy.
- Ideamerit s.r.o., 2025. Luna Modeler: a powerful data modeling tool, version 8.5.1. Ideamerit s.r.o., Havířov, Czech Republic.
- Ribas, C., Quiniou, N., Gaillard, C., 2024. On farm precision feeding of gestating sows based on energy and amino acids on farrowing performances and feeding behavior over 3 consecutive gestations. *Journal of Animal Science* 102, 13. doi:10.1093/jas/skae201.

8. Simulation d'une alimentation sur mesure sur la carrière des truies et leur longévité

Les résultats de cette partie ont été soumis pour publication le 26/09/2025.

Résumé :

Les truies modernes sont plus lourdes que celles d'il y a 30 ans utilisées pour établir les équations liant l'énergie, les protéines, et les lipides corporels au poids (**PV**) et à l'épaisseur de lard dorsal (**ELD**). Ces équations parmi d'autres sont utilisées dans les modèles nutritionnels pour estimer les besoins individuels journaliers dans le cadre d'une stratégie d'alimentation sur mesure (**PF**). En utilisant la calibration de ces équations et une approche par simulation, l'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact de quatre stratégies alimentaires différentes sur six gestations consécutives sur les performances des truies sur le long-terme. Une base de données de 3 098 gestations de 1 121 truies contenant le rang de portée, le PV, l'ELD, l'ingéré quotidien et les performances de portée a été utilisée pour calibrer les équations de composition chimique corporelle dans un modèle nutritionnel. Pendant la gestation, une stratégie d'alimentation conventionnelle (**CF**, même quantité pour toutes les truies par rang de portée) a été comparée à une stratégie d'alimentation standard (**SF**) ajustée sur les besoins individuels en énergie (quantité variable par truie), et de deux stratégies PF ajustées sur les besoins en énergie et en acides aminés (**AA** ; **PF_{AA}** quantité variable d'aliment par truie et teneur en lysine variable par truie et par jour) et additionnellement sur les besoins en phosphore (**P** ; **PF_{AA-P}**, quantité variable d'aliment par truie et contenu en lysine et en P variable par truie et par jour). La base de données a été divisée en un jeu de données d'entraînement (pour ajuster les équations de composition chimique corporelle de la littérature) et un jeu de données d'évaluation (pour évaluer les différences entre PV et ELD prédits et observés à la mise-bas après calibration des équations). Pour les équations calibrées, la racine de l'erreur quadratique moyen (**RMSE**) du PV et ELD des truies était respectivement de 10 kg et 1,7 mm. Comparés aux paramètres avant calibration, le RMSE du PV des truies augmente de 3 kg tandis que le RMSE de l'ELD diminue de -5,2 mm. A la sixième mise-bas, l'ELD des truies CF était 2 mm plus faible que l'objectif fixé et que l'ELD avec les autres stratégies alimentaires ($P < 0,001$). La variabilité de l'ELD dans le troupeau était 19 % plus élevée avec une stratégie CF qu'avec les stratégies SF, **PF_{AA}** et **PF_{AA-P}** ($P < 0,001$). Sur six gestations consécutives, les coûts alimentaires ont été réduits de 17 et 26 €, tandis que l'efficacité d'utilisation de N et P a été augmentée respectivement de 3,3 et 0,5 % et de 1,6 et 3,0 %, avec les stratégies **PF_{AA}** et

PF_{AA-P} , comparées à la stratégie CF ($P < 0,001$). Pour conclure, à partir de résultats *in silico*, nourrir les truies individuellement selon leur besoin en énergie permet de mieux atteindre les objectifs d'ELD à la mise-bas avec la succession des cycles. Ajuster l'apport nutritionnel au besoin individuel de la truie, en considérant les AA seuls ou en combinaison avec le P, réduit les coûts alimentaires et améliore l'efficacité d'utilisation des nutriments sur le long-terme.

Introduction

The aim of precision feeding strategies for gestating sows is to provide the nutritional quantity and quality required to meet the individual and daily nutritional requirements of each animal (Brossard et al., 2023) and so achieve objective target body condition at farrowing. An optimal range of body weight per parity and fat reserves should be considered (Muro et al., 2023) to minimise the risk of peripartum issues inherent in sows, that are too fat (prolonged farrowing, more stillbirths; Oliviero et al., 2010) or too thin (lighter piglets at birth, lower milk production; Langendijk et al., 2023).

Previous researchers (Stewart et al., 2021; Gaillard and Dourmad, 2022; Cloutier et al., 2024) have reported the benefits of precision feeding adjusted for energy and amino acids (PF_{AA}) to reduce N intake (from -12 to -25% per gestation), N excretion (from -6% to -19% per gestation), and feed costs (-3 € per gestation) compared with a conventional feeding strategy (CF) performed with a single diet during the whole gestation. Over three consecutive cycles, this strategy made it possible to achieve the target backfat thickness (BT) at three consecutive farrowings, unlike the CF strategy with 4.4 mm less than the objective at the last farrowing, without any significant impact on sow productive performances (Ribas et al., 2024).

Nutritional requirements can be estimated using a nutritional model developed for gestating sows, that takes into account the parity or age, the individual body weight (BW) and BT at insemination (Gaillard et al., 2019). Using available equations, energy (Whittemore and Yang, 1989; Everts and Dekker, 1995; Dourmad et al., 1997), protein (Miller et al., 2018) and lipid reserves can be predicted from BW and BT measured on empty sows. These body reserves evolve during gestation, depending on nutrients supplied to achieve the BW and BT targets set at farrowing. Existing equations (Quiniou, 2019) can be used to set BW target according to sow age at farrowing. A common BT target is usually used for all sows. However, with genetic selection for growth and leanness in fattening pigs, sows have become increasingly heavier and leaner than sows from 30 years ago (Bergsma et al., 2009, 2024). By simulating gestations

with the nutritional model and the use of real farm data, it is possible to calibrate the parameters of existing equations.

Thus, the objective of this study was, firstly, to calibrate an equation for linking chemical composition with BW and BT and another equation linking BW to sow age, both calibrations based on data from a farm collected over the last decade. Secondly, the purpose was to evaluate the impact of PF strategies, using a simulation approach based on farm data, on the body characteristics throughout the productive career, feed costs and nutrient balances. We made the assumption that updating the parameters of the equations allows for a better adjustment of the model to the current body composition of sows. We also hypothesised that PF strategy using the calibrated equations reduces feed costs and N and P excretions while maintaining optimal body condition through successive farrowing compared to CF.

Material and methods

This study was conducted in two parts. The first part involved calibrating the parameters of two equations using a database from a farm. The second part simulated four feeding strategies over six successive cycles using a nutritional model incorporating the calibrated equations and by using the same database.

Animals, feeding, housing and measurements used as database

Sows' performances were collected under commercial conditions at the experimental facility of Schothorst Feed Research B.V., Lelystad, The Netherlands from May 2012 to March 2023. It included 3,098 gestations from 1,121 crossbred Landrace × Large White (TN20 or TN70 from Topigs Norsvin genetic) sows. Data of sows followed for at least five gestations were grouped together in a restricted database (databased “5+”) representing 991 gestations from 178 sows.

Gestating sows were housed in dynamic groups of 150 individuals, with pens equipped with four automatic feeders each, and multiple hoppers making it possible to allocate different feeding plans between gilts and multiparous sows. Quantities of feed and the type of feed supplied, either a conventional diet (97% of the data) or an experimental diet, depending on whether the sows were followed during a feeding trial, were collected. Only conventional diet were subsequently retained. Under conventional feeding plan, sows were supplied with a single diet, that varied in quantity according to three gestation phases (insemination to day 42 of gestation, day 42 to 84, and day 85 until farrowing). Primiparous sows received 2.40, 2.75 and 2.90 kg/d of feed, regarding the respective phases, whereas multiparous sows received 2.90, 2.75 and 3.20 kg/d. The objective of BT at farrowing was set at 18 mm. After the transfer to the farrowing room (ca. 1 week before expected farrowing date), sows were housed in

farrowing crates (0.60 × 2.50 m) in individual pens (2.25 × 2.50 m), equipped with a feeding trough and a feeder. The feed was available on request through pushing a metal bar in the feeder up to the daily maximum amount allowed by the feeding plan.

Within the first 24 h of life, piglets' sex, BW and status (alive, stillbirth or mummified) were recorded. If required, cross fostering was done within 48 h after birth and per parity to balance the litter size to 12–14 piglets. For genetic purpose, sows without health issues were kept until parity 5 and the greater parities culled out according to thresholds based on sow performances. For the first insemination of gilts, during the transfer from the gestation room to the farrowing room (ca. 1 week before expected farrowing date), and on piglets weaning day (ca. 4 weeks after farrowing), each sow was weighed (ZM201, Avery Weigh-Tronix, Fairmont, USA) and its BT (Renco Lean-Meater, Minneapolis, USA) was measured at position P2, *i.e.* 6.5 cm on either side of the midline at the level of the last rib. Sow performances were summarised per parity in Tableau 8.1.

Tableau 8.1 – Description of the database collected at an experimental farm averaged by parity

Parity	Number of gestations	Litter size	Piglet birth weight (kg)	Litter weaning weight (kg)	Initial ¹		Final ²		Loss during lactation	
					BW (kg)	BT (mm)	BW (kg)	BT (mm)	BW (kg)	BT (mm)
1	629	14.8	1.22	80.6	162	16.3	193	19.8	-20	-4.6
2	512	14.5	1.42	98.8	175	15.2	214	19.4	-20	-4.7
3	550	15.9	1.41	102.6	193	14.7	228	19.1	-17	-4.5
4	494	16.8	1.34	102.0	210	15.2	240	19.6	-16	-4.3
5	378	17.0	1.34	103.8	221	14.9	247	19.5	-14	-4.2
6	264	17.2	1.31	103.9	231	15.9	256	20.3	-16	-4.0
7	180	16.2	1.34	109.0	240	16.3	262	20.8	-13	-4.4
8	91	16.3	1.32	104.9	249	17.0	268	21.4	/	/
all	5.0	3,098	15.8	98.1	198	15.5	228	19.7	- 17	- 4.4

Abbreviations: BW = body weight; BT = backfat thickness

¹ BW and BT measured at insemination and at weaning of the previous cycle for gilt and sows respectively.

² BW and BT measured during the transfer from the gestation room to the farrowing room (ca. 1 week before expected farrowing date).

Model description

The sow nutritional model used in the current study was previously described by Gaillard et al. (2019). It corresponds to an upgraded version of the InraPorc mechanistic model (Dourmad et al., 2008), implemented under Python programming language, version 3.6 and still available for version 3.9 (Python Software, 2020). The model is used to estimate individual nutritional requirements for each day of gestation. The sow is considered as the sum of chemical compartments, *i.e.* body protein, body lipid and associated water and ash and full uterus. In practice, body lipid, body protein and body energy (23.8 kJ/g protein, 39.5 kJ/g lipid) are predicted from empty body weight (**EBW**) and BT (Eq.1; Dourmad et al., 2008). Using the current data for sows, BW and BT measured at weaning were used as initial BW and BT for

the subsequent gestation, which started mainly five days after weaning. For gilts, BW and BT measured at insemination were used.

Eq.1

$$\text{body content} = a + b * EBW + c * BT$$

With:

body content : energy content in MJ or protein content in kg or fat content in kg

EBW : empty body weight of the sow in kg calculated as $0.96 * BW$

BT : backfat thickness at P2 site in mm

a, b, c : parameters to fit

During gestation, these body reserves change from an initial state to a final one, depending on the objectives set at farrowing, usually based on a common BT objective for all sows. The objective for individual sow BW depends on age and the historical litter performance within the farm. To set a BW target, a Weibull equation adjusted to the herd data is calibrated (Eq.2; Quiniou, 2019). With the current database, sows were weighed when transferred to the farrowing room, not after farrowing. Therefore, final BW corresponds to this weighing minus the weight of the conceptus (Eq.3; Dourmad et al., 1997).

Eq.2

$$\text{Sow BW}(t) = a * (1 - \exp(- (b/1000 * t)^c))$$

With:

Sow BW: maternal BW in kg

t : sow age in days

a, b, c : parameters to fit

Eq.3

$$\text{Conceptus weight} = 0.3 + 1.329 * \text{litter weight}$$

With:

*Conceptus weight: weight of conceptus in kg**litter weight : weight of the litter (alive and stillborn) at birth in kg*

Changes in body composition during lactation were averaged according to litter weight gain per parity (Tableau 8.1) and were implemented in the new lactation function of the nutritional model. The known effects of lactating sow intake (Gauthier et al., 2021) and individual litter performances (Gauthier et al., 2022) on changes in body composition could not be taken into account in the simulation due to a lack of parameters. For this reason, the results will focus exclusively on the gestating sow. The percentage of each feed in the blend was calculated as such to achieve the nutritional quality required to meet individual daily requirements, either only in amino acids (**AA**) or both AA and minerals depending on the feeding strategy implemented. The optimal solution for each day and each sow was obtained using constrained linear optimisation with the pulp package (Mitchell et al., 2011).

Fitting data

A multivariate regression analysis with the `curve_fit` function from SciPy library (Virtanen et al., 2020) was used to calibrate the parameters of Eq.1 and Eq.2. It ran the Trust Region Reflective algorithm (Branch et al., 1999) and the Levenberg-Marquardt algorithm (Moré, 1978) for Eq.1 and Eq.2, respectively, towards the minimum sum of squares of the differences, *i.e.* residuals. Optimisation stopped when the change in cost function was below 10^{-4} to maintain optimisation that lasts for a maximum of one day. If this condition was never met, it stopped after 2,000,000 evaluations. Initial parameters for the optimisation were those described by Dourmad et al. (1997) and Gaillard et al. (2020) for Eq.1 and Eq.2, respectively. Parameters of each body chemical compartments, *i.e.* a total of nine parameters, were fitted to minimise the difference between final observed BW and BT with final predicted BW and BT. Final predicted BW and BT were obtained from the chemical composition of the sow after a simulation of a gestation with the nutritional model. The Weibull equation was fitted on observed sow BW at the arrival in the farrowing unit minus the weight of the conceptus to calibrate the parameters. To avoid overfitting, parameters of Eq.2 were calibrated according a K-fold cross validation scheme from the Scikit-learn library (Pedregosa et al., 2011). Briefly, it consisted in dividing the dataset into K groups and fitting the parameters K times using K-1 groups of data to train and the remaining

group of data was used to evaluate the prediction error. The performance of each validation was then evaluated by averaging the mean absolute error (**MAE**) and the root mean squared error (**RMSE**) for the K equations calibrated. The metrics MAE and RMSE were calculated as follows:

$$\text{MAE} = 1/n * \sum_{k=0}^{n-1} |y_k - \widehat{y}_k|$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{1/n * \sum_{k=0}^{n-1} (y_k - \widehat{y}_k)^2}$$

With:

n : number of samples

y_k : the k – th observed value

$\widehat{y}_k$: the k – th predicted value

The lower the value, the more accurately the model represented the data. Two-, five-, ten-, twenty-, and leave-one-out (number of samples) folds were evaluated (Tableau 8.2).

Tableau 8.2 – Root mean squared error (RMSE) and mean absolute error (MAE) used as metrics to quantify and compare the quality of predictions of the BW according to the sow age¹ with different K-folds cross-validation on two datasets: all the gestations available *i.e.* 3,098 gestations or gestations from sows followed at least over 5 cycles (5+) *i.e.* 991 gestations

	all				5+			
	N _{train}	N _{test}	RMSE	MAE	N _{train}	N _{test}	RMSE	MAE
Control ²	-	3,098	23.0	17.7	-	991	22.6	18.5
K-folds cross validations								
2	1,549	1,549	21.7	17.7	495	496	17.3	13.9
3	2,065	1,033	19.7	15.7	660	331	17.7	14.4
4	2,323	775	19.3	15.4	743	248	16.7	13.4
5	2,478	620	18.9	15.0	792	199	16.7	13.4
10	2,788	310	18.4	14.5	891	100	16.3	13.0
20	2,943	155	18.1	14.3	941	50	16.1	12.9
Leave-one-out	3,097	1	17.7	14.0	990	1	15.9	12.7

Abbreviations: BW= body weight; N_{train} = number of samples used at each validation to train the model; N_{test} = number of samples used at each validation to test the model

¹ Prediction of BW according to age with a Weibull function (Sow BW(age) = a · (1 – exp (- (b / 1000 · t)^c))) with a, b, and c parameters to fit; Quiniou, 2019).

² Prediction of BW according to Weibull function of Gaillard et al. (2020).

Simulated feeding strategies

Five simulated gestation diets (Tableau 8.3) were formulated to contain 9.0 MJ/kg of net energy and different contents of standardised ileal digestible lysine (**SID-Lys**; standard: 4.7 g/kg, low: 3.3 g/kg or high: 8.5 g/kg) and apparent total tract digestible phosphorus (**ATTD-P**; standard: 2.6 g/kg, low: 1.8 g/kg or high: 4.0 g/kg). Their chemical and nutritional characteristics were calculated with Evapig software (Dourmad et al., 2011) from a list of French raw materials. Simulations were performed with a 3-phase feeding plan, similar to the one used on the farm where the data comes from. Four feeding strategies were simulated:

- a CF strategy with a single standard diet (**S**), similar to the one used on the farm, and the feeding levels used on the farm,
- a standard feeding (**SF**) strategy using the S diet but with feeding levels modulated with regard to individual estimated energy requirements,
- a strategy adjusted on energy (like SF) but also on individual and daily AA requirements (based on SID-Lys), called **PF_{AA}** strategy, implemented through a customised mixture of low SID-Lys (**L_{Lys}-S_P**) and high (**H_{Lys}-S_P**) SID-Lys content diets.
- a strategy based on energy and AA (like **PF_{AA}**) but also on phosphorus requirement, called **PF_{AA-P}**, implemented through a blend with diets already used in the **PF_{AA}** strategy, and a low (**L_{Lys}-L_P**) or high (**H_{Lys}-H_P**) SID-Lys and ATTD-P diets.

Daily individual requirements of SID-Lys and ATTD-P were based on equations from Gaillard et al. (2019) and Quiniou et al. (2021), respectively, implemented in the nutritional model.

Gestation length was set at 115 days for all the sows. Sow's body loss during 28 days of lactation depended on the average daily gain of the litter per parity. Simulations were run over six successive cycles of gestation-lactation from first insemination as gilt to weaning after the 6th lactation to compare the four feeding strategies applied during gestation on body condition of the sow, nutrient intake, feed cost, and nutrient excretion. As requirements were estimated in hindsight, final observed BW, BT, and litter weight at farrowing for each parity of each sow were used as the objective for the simulation. If data from the sow at the insemination was available, it was used as the starting point for the gestation. Otherwise, the body condition from the simulation of the previous gestation - lactation cycle and the average production performance for that parity from the database were used. Calibrated parameters obtained from the database in the first part of this study were used as parameters of Eq.1 and Eq.2 in the model.

Tableau 8.3 – Ingredient, chemical composition and price of simulated gestation diets with Evapig software (on as fed basis)

Diet	S	L _{Lys} -S _P	H _{Lys} -S _P	L _{Lys} -L _P	H _{Lys} -H _P
Ingredient composition (g/kg)					
Barley	301	288	180	327	171
Wheat	222	180	180	304	184
Maize	80	180	180	30	216
Wheat bran	100	110	114	110	40
Soybean meal 48%	50	10	145	0	145
Rapeseed meal	37	39	50	0	50
Unhulled sunflower seed meal	50	37	21	60	62
Soya bean hulls	0	0	10	0	0
Soya bean oil	8	5	5	5	5
Sugar beet pulp, dehydrated	100	100	61	120	55
Sugar beet molasses	20	20	20	20	20
Limestone	12.6	13.7	14.1	10.5	24.2
Monocalcium phosphate	4.0	3.7	2.8	0	10.4
Salt	4	4	4	4	4
Sodium bicarbonate	6.4	5.1	2.0	5.0	2.6
Premix ¹	4	4	4	4	4
L-Lysine 50	0	0	4.2	0	4.2
Methio hydroxy analog	0	0	0.9	0	0.7
L-Threonine	0.5	0	1.5	0	1.4
Phytase ²	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Chemical Composition (g/kg)					
DM	879	875	875	877	877
CP	147	112	166	128	166
Ash	60	60	61	52	77
Crude fat	27	27	27	24	26
Crude fibre	65	68	64	66	64
Lysine	6.0	4.5	9.9	4.5	9.8
SID-Lys	4.7	3.3	8.5	3.3	8.5
Total Ca	8.0	9.6	9.6	6.5	14.8
Total P	5.1	4.9	5.2	3.9	6.7
ATTD-P	2.6	2.6	2.6	1.8	4.0
Electrolyte balance (mEq/kg)	246	220	242	209	239
Metabolisable energy (MJ/kg)	12.25	12.01	12.34	12.16	12.32
Net energy (MJ/kg)	9.00	9.00	9.00	9.01	9.00
Price (€/ton)	243	231	260	226	267

Abbreviations: ATTD-P = apparent total tract digestible phosphorus; SID-Lys = standardised ileal digestible lysine; S = standard gestation diet; L_{Lys}-S_P = low SID-Lys and standard ATTD-P content; H_{Lys}-S_P = high SID-Lys and standard ATTD-P content; L_{Lys}-L_P = low SID-Lys and ATTD-P content; H_{Lys}-H_P = high SID-Lys and ATTD-P content

¹ The same premix of vitamins and trace minerals was incorporated in all diets. It supplies at least the amounts of vitamins and trace minerals recommended for sow diets in France (Gaudré and Quiniou, 2009).

² 0.75 g of ATTD-P for 500 UI of phytase.

Calculations of nutrient intake, feed costs, and nutrient balance

Nutrient intake per sow was calculated for each feeding strategy as the sum of each diet consumed during the six gestations simulated.

The prices of the S, L_{Lys}-S_P, H_{Lys}-S_P, L_{Lys}-L_P, and H_{Lys}-H_P were 243, 231, 260, 226, and 267 €/ton (Tableau 8.3), respectively according to diet content and price of each raw material used for each diet in March 2025 for France (IFIP, 2025).

For the six simulated gestations, total feed intake from all diets of each sow was used to calculate N intake as a function of CP ingested (total N $\times$ 6.25) and P intake as a function of total P content ingested (Tableau 8.3). Maternal retention of N and P over the six gestations equaled the sum of maternal retention for each gestation simulated using sow BW and BT and equations of Dourmad et al. (2008, 2021). Urinary N and P outputs equaled N or P absorptions (total intake minus faecal output) minus retentions. Based on the ATTD of N or P obtained from the diets, faecal N and P outputs were calculated. The efficiencies of N and P used equaled N and P retentions divided by N and P intakes, respectively.

Statistical analyses

Statistical analyses were performed using R software (v. 4.4.1; R Core Team, 2024). The influence of the feeding strategy (CF, SF, PF_{AA}, and PF_{AA-P}) on cumulative nutrient intake (feed, N, SID-Lys, and ATTD-P), feed costs, and N and P balances (retentions, fecal and urinary outputs) over the six gestations was analysed using a linear mixed effects model (lmer function of the *lme4* package; Bates et al., 2015). The feeding strategy was set as fixed effect and the sow, which is the experimental unit, as the random effect. Tukey's test for multiple comparisons of means was used to perform pairwise comparisons.

To evaluate the effect of the feeding strategy on count data (percentage of diet consumed), these data were analysed with a generalised linear mixed model (glmer function and family binomial of the *lme4* package; Bates et al., 2015). The same fixed and random effects were used as those for the linear mixed model.

To assess the effect of the feeding strategy on body composition of the sow at farrowing throughout the cycles of gestation, the gestation cycle and its interaction with the feeding strategy were added to the linear mixed model as fixed effects.

Assumptions of regression models (i.e., linearity, normal distribution of errors, homoscedasticity of errors and independence of errors) were assessed for each model.

The RSD of results was calculated as follows:

$$RSD = \sqrt{\sum_{k=0}^{n-1} (y_k - \hat{y}_k)^2 / (n - p)}$$

With:

n : number of samples

p : number of parameters to estimate

y_k : the k – th observed value

$\hat{y}_k$: the k – th predicted value

Significant differences were considered if $P \leq 0.05$ and trends with P from 0.05 to < 0.10 .

Results

Parameters calibration of sow BW (Eq.2) and body chemical compartments (Eq.1)

For sow BW, the leave-one out cross validation on 5+ data resulted in the best metrics with a RMSE of 15.9 and a MAE of 12.7 kg (Tableau 8.2). Except for the 3-fold cross-validation for the 5+ database, increasing the number of K groups reduced the MAE and RMSE values. By using the Weibull equation without calibration as control, the RMSE of predicted BW of our current data was increased by 6.7 and MAE by 5.8. Every cross validation ran in this study resulted in more accurate equation than the control. For the Eq.2, calibrated a , b and c parameters with lowest RMSE and MAE were 347, 1.638, and 0.459, respectively (Tableau 8.4). This equation fitted our database better than other equations previously adjusted in other farms (Figure 8.1).

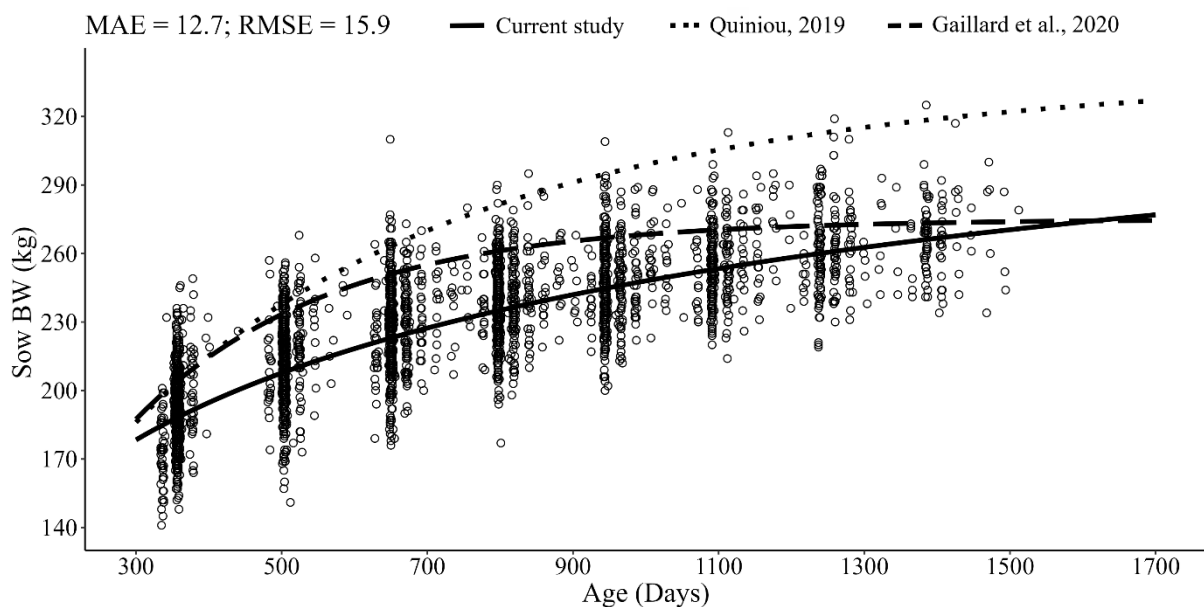


Figure 8.1 : Sow body weight (BW) according to age. Solid line is the Weibull equation calibrated on the data of the current study. Dashed line corresponds to adjusted equation from Gaillard et al. (2020) and dotted line from those of Quiniou (2019).

For body chemical compartments, parameters were adjusted on data of 5+ parity sows (991 gestations) and evaluated with all other gestations not used to fit the equations (*i.e.*, 2107 gestations). The calibrated equations resulted for evaluated data for final BW and BT after simulating the gestation in a RMSE and MAE of 9.9 and 7.8 kg for BW, and 1.7 and 1.3 mm for BT, respectively. Compared to Eq.1 without parameter calibration on the same evaluated data, RMSE and MAE of BW were increased by 2.9 and 2.2 kg whereas RMSE and MAE of BT were decreased by -5.2 and -4.6 mm, respectively. For the Eq.1, calibrated *a*, *b* and *c* were -810 MJ, 8.0 MJ/kg and 70.0 MJ/mm, respectively, for energy content, -4.95 kg, 0.211 kg/kg and -0.10 kg/mm, respectively, for body protein, and -49.7 kg, 0.329 kg/kg, and 5.05 kg/mm for body fat (Tableau 8.4). Parameters for BW and energy content and body protein (*i.e.*, 8.0 MJ/kg and 0.211 kg/kg, respectively) were calibrated with a standard error more than a thousand times greater than the mean value.

Nutrient intake, feed costs and body characteristics change throughout six successive cycles

Cumulative feed intake throughout six successive simulated gestations was influenced by the feeding strategy (Tableau 8.5; $P < 0.001$). Over six gestations, adjusting intake on energy requirements in SF, PF_{AA} and PF_{AA-P} strategies increased the amount of feed supplied by 15 kg compared to the CF strategy. Nutrient intake was significantly dependent on the feeding strategy applied ($P < 0.001$). Compared to the CF strategy, N intake was 0.6% greater for SF, 21 and 11% lower for PF_{AA} and PF_{AA-P} strategies, respectively. Over the six gestations, a sow with a CF strategy consumed 0.6% less than one with a SF strategy but consumed 31% more SID-Lys than sows with a PF_{AA} or a PF_{AA-P} strategy did. Intake of ATTD-P was lower for the CF strategy compared with SF and PF_{AA} but only represented a small difference of 0.8% ($P < 0.001$). Adjusting ATTD-P supplies to the requirements reduced the intake by 40% for the PF_{AA-P} strategy compared with the other feeding strategies ($P < 0.001$). Through six gestations, sows with a PF_{AA} strategy consumed mainly the L_{Lys}-S_P diet (94.9% of total intake) whereas those with the PF_{AA-P} strategy mainly consumed the L_{Lys}-L_P diet (94.6% of total intake). The H_{Lys}-S_P diet was the second most consumed diet, *i.e.* 5.1% and 4.8% for PF_{AA} and PF_{AA-P} strategies, respectively. For the PF_{AA-P} strategy, L_{Lys}-S_P and H_{Lys}-H_P represented only 0.3% of total intake each.

Tableau 8.4 – Adjusted prediction of sow net body weight according to the age of sows and prediction of energy, protein, or fat content of sows as function of empty body weight and backfat thickness (adapted from Dourmad 1998). For the current study, values are presented as the mean $\pm$ the standard error

		Calibrated parameters ¹			RMSE	Authors
		a	b	c		
Maternal BW (kg)	275	3.824	0.980	Not specified		Gaillard et al., 2020
	340	2.506	0.815	16.2		Quiniou, 2019
	347 $\pm$ 1	1.638 $\pm$ 0.001	0.459 $\pm$ 0.001	15.9		Current study
Energy (MJ)	-870	12.6	54.2	186		Whittemore and Yang, 1989
	-408	8.9	68.1	126		Everts and Dekker, 1995
	-1,074	13.7	45.9	198		Dourmad et al, 1997
	-810 $\pm$ 1	8.0 $\pm$ 51935	70.0 $\pm$ 0.2	Not calculable ²		Current study
Protein (kg)	-2.3	0.186	-0.22	1.8		Whittemore and Yang, 1989
	1.7	0.175	-0.38	1.4		Everts and Dekker, 1995
	2.3	0.178	-0.33	1.9		Dourmad et al, 1997
	4.1	0.17	-0.23	Not specified		Miller et al., 2018
	-4.95 $\pm$ 2.13	0.211 $\pm$ 229223	-0.10 $\pm$ 0.01	Not calculable ²		Current study
Fat (kg)	-20.4	0.205	1.48	5.2		Whittemore and Yang, 1989
	-10.4	0.110	2.00	3.1		Everts and Dekker, 1995
	-26.4	0.221	1.33	6.1		Dourmad et al., 1997
	-8.7	0.187	0.850	3.3		Gill, 2006
	-20.7	0.27	0.77	Not specified		Miller et al., 2018
	-49.7 $\pm$ 0.1	0.329 $\pm$ 0.001	5.05 $\pm$ 0.50	Not calculable ²		Current study

Abbreviations: BT = backfat thickness; BW = body weight; EBW = empty body weight; RMSE = root mean squared error

¹ Model as maternal BW (t) = a · (1 – exp (– (b / 1000 · t)^c)) and as Y = a + b · EBW + c · BT for body content with EBW = 0.96 · BW, respectively).

² Without data of body chemical compartments, it is not possible to calculate the RMSE.

Feed costs over a gestation differed significantly among feeding strategies ($P < 0.001$, Tableau 8.5). Compared to the CF strategy, PF_{AA} and PF_{AA-P} strategies reduced feed costs by 3 and 4 € per gestation, respectively, whereas the SF strategy increased them by almost 1 € per gestation. Throughout six successive gestations, feed costs ranged between 400 and 530 € per sow for the PF_{AA} and PF_{AA-P} strategies, respectively. It represented an average saving of 17 € and 26 € with PF_{AA} and PF_{AA-P} strategies, respectively, compared with a CF strategy which feed costs averaged 483 € ($P < 0.001$). Only adjusting nutritional supplies on energy with the S diet in the SF strategy resulted in a 6 € increase in feed costs over six gestations compared to the CF strategy.

Tableau 8.5 – Effects of the feeding strategy on feed and nutrient intake and feed costs throughout six successive gestations

	Strategy				RSD	<i>P</i> Strategy
	CF	SF	PF _{AA}	PF _{AA-P}		
Feed intake (kg/sow)	1,989 ^a	2,003 ^b	2,005 ^b	2,005 ^b	34	<0.001
Feed intake (kg/gestation)	331 ^a	334 ^b	334 ^b	334 ^b	6	<0.001
N intake (kg/sow)	46.8 ^c	47.1 ^d	36.8 ^a	41.7 ^b	0.7	<0.001
SID-Lys intake (kg/sow)	9.35 ^b	9.41 ^c	7.16 ^a	7.16 ^a	0.16	<0.001
ATTD-P (kg/sow)	5.17 ^b	5.21 ^c	5.21 ^c	3.71 ^a	0.08	<0.001
Percentage of diet consumed in gestation (%)						
S	100 ^b	100 ^b	0 ^a	0 ^a	0.1	<0.001
LLys-SP	0 ^a	0 ^a	94.9 ^b	0.3 ^a	0.9	<0.001
HLys-SP	0 ^a	0 ^a	5.1 ^b	4.8 ^b	1.3	<0.001
LLys-LP	0 ^a	0 ^a	0 ^a	94.6 ^b	0.9	<0.001
HLys-HP	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0.3 ^b	0.2	<0.001
Feed cost (€/sow)	483 ^c	487 ^d	466 ^b	457 ^a	8	<0.001
Feed cost (€/gestation)	80.5 ^c	81.1 ^d	77.7 ^b	76.1 ^a	1.3	<0.001

Abbreviations: ; ATTD-P = apparent total tract digestible phosphorus; SID-Lys = standardised ileal digestible lysine; CF = conventional feeding strategy with a unique diet throughout gestation; SF = standard feeding strategy with supplied adjusted to individual energy requirements; PF_{AA} = precision feeding strategy with energy and SID-Lys supplied adjusted to individual requirements; PF_{AA-P} = precision feeding strategy with energy, SID-Lys and ATTD-P supplied adjusted to individual requirements

^{a,b,c,d} Values within a row with different superscripts differ significantly at $P < 0.05$.

At farrowing, sow BW differed significantly among feeding strategies across cycles (Figure 8.2; $P < 0.001$). Sows fed with the CF strategy had greater BW at the end of gestation during the first and second cycles, but lower BW during the fifth and sixth cycles, compared with the other feeding strategies ($P = 0.003$). During the second and the third gestations, sow BW at farrowing was greater for sows with SF or PF_{AA} than sows with the PF_{AA-P} strategy ($P = 0.004$). In all cases, averages varied slightly between strategies (3 kg) regardless of the cycle. The feeding strategy applied during gestation had an impact on BT at farrowing throughout the cycle of gestation (Figure 8.3; $P < 0.001$). At farrowing, BT was significantly greater for sows fed CF than those of sows fed with other strategies from the first to the third gestations ($P = 0.004$). On the contrary, it was significantly lower in the sixth cycle ($P < 0.001$) and did not differ with the other strategies in the fourth ($P = 0.23$) and fifth cycles ($P = 0.11$). For all strategies, the SD increased between the first and sixth gestation. However, it rose from 3.1 to 3.8 for the CF strategy, while for the other strategies the SD stabilised at 3.2 from the fourth gestation onwards.

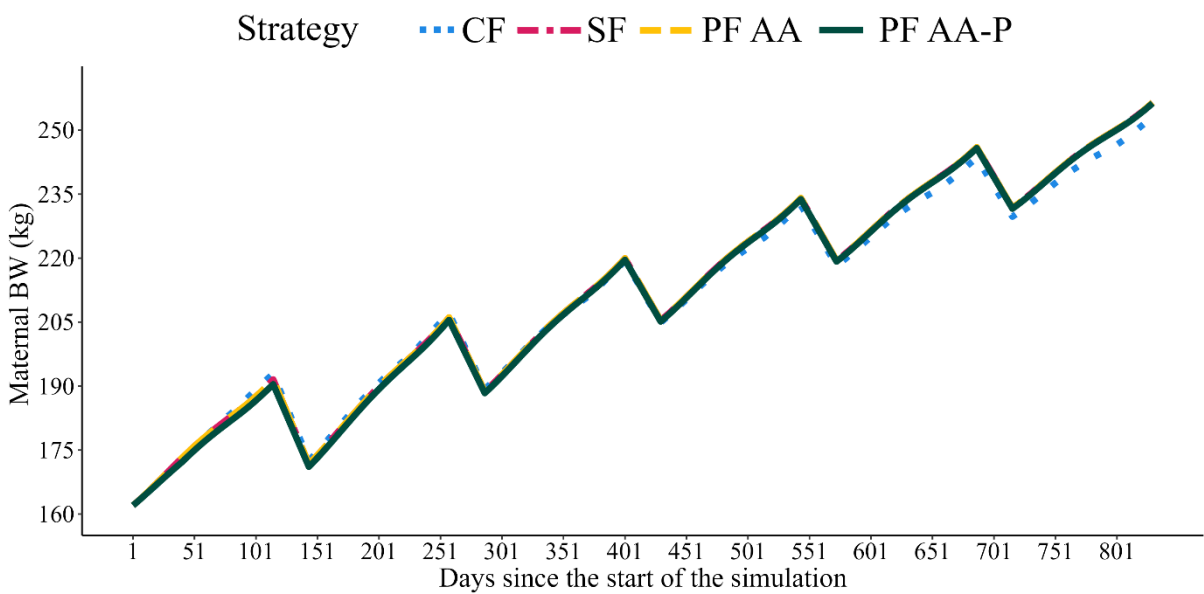


Figure 8.2 : Maternal sow body weight (BW) throughout six cycles in response to the feeding strategy applied (conventional feeding (CF) vs. standard feeding (SF) vs. precision feeding on amino acids (PF AA) or amino acids and phosphorus (PF AA-P)).

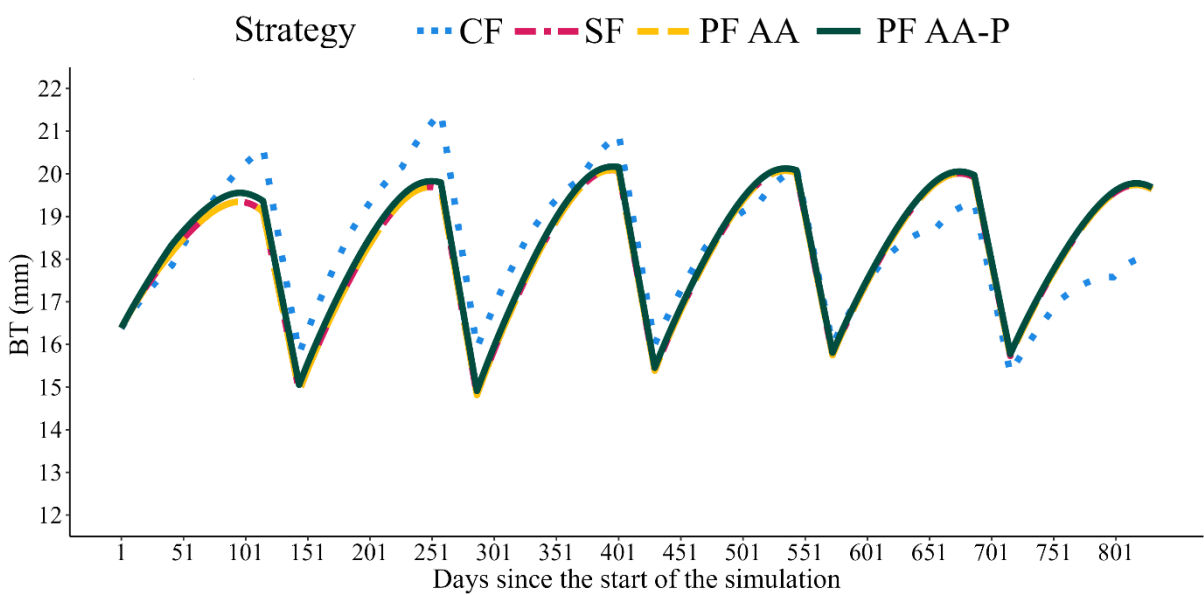


Figure 8.3 : Maternal sow backfat thickness (BT) throughout six cycles in response to the feeding strategy applied (conventional feeding (CF) vs. standard feeding (SF) vs. precision feeding on amino acids (PF AA) or amino acids and phosphorus (PF AA-P)).

Nutrient balances

Feeding strategies had a significant influence on the N balance throughout six successive gestations (Tableau 8.6; $P < 0.001$). Maternal retention of 5.27 kg of N for PF_{AA} and PF_{AA-P} strategies was slightly greater compared to those of CF and SF with an average of 5.16 and 5.23 kg each ($P < 0.001$). Urinary and faecal N excretions were significantly different between feeding strategies ($P < 0.001$) and were the lowest for PF_{AA} strategy followed by PF_{AA-P} strategy then CF and finally SF. The N efficiency was greater for PF_{AA} than PF_{AA-P} strategy because of similar retention but greater intake for this latter ($P < 0.001$). The N efficiency was significantly different between CF and SF strategies but only represented a numerical difference of 0.1% ($P < 0.001$). Their N efficiencies were 1.5% and 3.2% lower than those obtained with PF_{AA} and PF_{AA-P} respectively ($P < 0.001$).

Tableau 8.6 – Effects of the feeding strategy applied on nitrogen and phosphorus balance throughout six successive gestations

	Strategy				RSD	<i>P</i>
	CF	SF	PF _{AA}	PF _{AA-P}		Strategy
N balance						
Total intake (kg)	46.8 ^c	47.1 ^d	36.8 ^a	41.7 ^b	0.7	<0.001
Retention ¹ (kg)	5.16 ^a	5.23 ^b	5.27 ^c	5.27 ^c	0.07	<0.001
Urinary output ² (kg)	33.3 ^c	33.5 ^d	24.8 ^a	28.6 ^b	0.6	<0.001
Faecal output ³ (kg)	8.3 ^c	8.4 ^d	6.8 ^a	7.9 ^b	0.1	<0.001
Efficiency of use ⁴ (% of intake)	11.0 ^a	11.1 ^b	14.3 ^d	12.6 ^c	0.2	<0.001
P balance						
Total intake (kg)	10.1 ^c	10.2 ^d	9.9 ^b	8.0 ^a	0.2	<0.001
Retention ¹ (kg)	1.03 ^a	1.04 ^b	1.05 ^c	1.05 ^c	0.01	<0.001
Urinary output ² (kg)	4.1 ^b	4.2 ^c	4.2 ^c	2.7 ^a	0.1	<0.001
Faecal output ³ (kg)	5.0 ^c	5.0 ^d	4.6 ^b	4.3 ^a	0.1	<0.001
Efficiency of use ⁴ (% of intake)	10.1 ^a	10.2 ^a	10.6 ^b	13.1 ^c	0.2	<0.001

Abbreviations: ATTD-P = apparent total tract digestible phosphorus; SID-Lys = standardised ileal digestible lysine; CF = conventional feeding strategy with a unique diet throughout gestation; SF = standard feeding strategy with supplied adjusted to individual energy requirements; PF_{AA} = precision feeding strategy with energy and SID-Lys supplied adjusted to individual requirements; PF_{AA-P} = precision feeding strategy with energy, SID-Lys and ATTD-P supplied adjusted to individual requirements

¹ Retention calculated using equations of Dourmad et al. (2008, 2021) and BW and BT at insemination and farrowing.

² Urine output equals intake – (retention + faecal output).

³ Faecal output calculated based on non-digestible N and P in feed intake.

⁴ Efficiency of use equals retention/intake.

^{a,b,c,d} Values within a row with different superscripts differ significantly at $P < 0.05$.

Total P intake was 21% lower for sows with PF_{AA-P} strategy compared to other strategies ($P < 0.001$). It was 0.1 kg greater for SF than CF strategy which was itself 0.2 kg greater than for the PF_{AA} strategy ($P < 0.001$). Maternal P retention was significantly different among CF, SF

and PF strategies but with a difference lower than 1% ($P < 0.001$). Urinary and faecal P outputs were respectively 36% and 14% lower for PF_{AA-P} strategy compared to CF and SF strategies ($P < 0.001$). Urinary output for the PF_{AA} strategy was similar to those of SF strategy but faecal output was 0.4 kg lower compared to this one ($P < 0.001$). The P efficiency was 10% and not significantly different between CF and SF. With a lower intake, PF_{AA} and PF_{AA-P} strategies had greater P efficiency, *i.e.* 10.6 and 13.1% respectively ($P < 0.001$).

Discussion

Prediction of body composition throughout simulation

The originality of our study is to use the simulation of the evolution of the chemical compartments during gestation through the nutritional model of Gaillard et al. (2019) and the equation of potential protein retention established by Dourmad et al. (1998) to fit estimated BW and BT with the model from the Eq.1 with BW and BT observed at farrowing from the database.

The chemical equations available in the literature were mainly established on sows from 30 years ago (Whittemore and Yang, 1989; Everts and Dekker, 1995; Dourmad et al., 1997), whose productive performance no longer correspond to the current one. Modern sows are leaner, heavier at the same age and produce more alive piglets per litter (+4 piglets; Muller, 2021; Bergsma et al., 2024). These equations use EBW and BT as predictors to estimate chemical composition because these data are easy to collect for each individual at the farm level compared to other methods such as the deuterium oxide dilution technique (Rozeboom et al., 1994) which requires infusing D₂O into the sow. However, they are dependent on the genotype used to establish them (Gill, 2006; Johannsen, 2025). More recently, Miller et al. (2018) have established equations on non-gestating sows to link protein and lipid composition and body contents. They obtained more accurate results by adding sow parity as a predictor and obtained better predictions for protein composition ($R^2 = 0.93$) than lipid composition ($R^2 = 0.77$). Compared to the equation of Dourmad et al. (1997) used before calibration, calibrated equations in the current study degraded the final BW estimate by 2.9 points of RMSE, while it improved the RMSE of the final BT by 5.2 points. The adjusted parameters make it possible to better predict the BT observed at farrowing when estimating nutritional requirements. However, it should be noted that we have no data to validate the lipid content of individuals, given that the parameter linking BT to lipid content is multiplied by 3.8 compared with the initial situation. The lower precision of the BT measurement at P2 for assessing the total lipid content of the individual could explain this result (McEvoy et al., 2009). In addition, EBW is set at $0.96 * BW$ as suggested by Dourmad et al. (2008) but lower than the range of 0.97 to 0.98 for a sow between 150 and 300 kg with the equation of Dourmad et al. (1997). The latter was developed

with diets which energy content was greater, resulting in less digesta in the intestinal tract than current diets formulated with a greater fiber content (Serena et al., 2008). The setting of this coefficient has a unique value without considering BW. The use of sow BW at the transfer to the farrowing room minus conceptus weight instead of sow BW at farrowing may explain a fraction of the RMSE obtained for BW. Further research should investigate the protein deposition potential of sows to bring the available equations up to date with current sow performances.

A Weibull equation is usually used to evaluate sow BW according to its age and used to define the target BW at farrowing and associated requirements during gestation (Gaillard et al., 2020). The Weibull equation was adjusted on our farm data using a K-cross-validation procedure to avoid over-fitting the model to the training data and evaluate prediction performance with RMSE and MAE metrics. A RMSE of 15.9 kg for the fitted equation was obtained in the same range of values as the RMSE of 16.2 kg reported by Quiniou (2019) for a sow BW measured just after farrowing. In all cases, compared with an equation calibrated to data from another farm (Gaillard et al., 2020), the calibrated equation of the current study reduced by 4 to 6 points the RMSE according to the number of K-splits between training and test datasets selected. Evaluating at the farm level allows to take into account the specific environmental conditions and management practices, which have a direct influence on sow BW. On a different note, Gauthier et al. (2022) were able to predict weaning litter weight better by adjusting parameters at farm level, which also reduced the time needed to estimate these parameters compared to fit on a multiple farm database. Taking into account data from sows that remained on the farm for a longer period, *i.e.* in our case at least five farrowing, reduced the RMSE by 2 to 3 points compared with taking all the sows in the database.

Evaluation of feeding strategies regarding body characteristics, feed costs and nutrient excretion

By simulation, the evolution of BW and BT over six gestations was characterised with four different feeding strategies using the equations calibrated previously in this study. The BW varied slightly between strategies with values three times lower than the RMSE obtained, whereas BT showed greater variation between strategies over the cycles. The CF strategy resulted in sows with a greater BT at farrowing in the first three farrowing and a BT 2 mm lower than the other strategies in the sixth gestation, as well as a greater variability of BT at this time. In a previous study *in vivo*, Ribas et al. (2024) observed a lower BT for CF sows compared to PF sows at the third farrowing. However, the amount of feed delivered differed significantly between feeding strategies in their study, with a total difference of 111 kg over three cycles of

gestation. In the current study, the difference was only 7.5 kg over three cycles between the CF strategy and the SF and PF strategies implemented, explaining a lower difference between feeding strategies on BT. A strategy that took into account the individual energy requirements of sows enabled to maintain the desired body characteristics. With the successive farrowings, this strategy reduces the variability of BT at farrowing, even with a similar average intake, and thus reduces peripartum risks (Muro et al., 2023).

In terms of feed costs, applying a feeding strategy adjusted to energy requirements alone required more feed than the CF strategy in our study, which automatically led to an increase in feed costs. However, taking into account the AA requirements of the animals resulted in the use of a less expensive diet because of its lower nutrient content on average during gestation. Hence, the PF_{AA} strategy resulted in savings 17 € on feed costs despite an extra supply of 15 kg over six gestations. Our results are in line with the literature (Gaillard and Dourmad, 2022; Cloutier et al., 2024) concerning a slight economic gain of 3 € per gestation with the application of a PF strategy adjusted on AA. Adding the ATTD-P requirements would improve these feed cost savings by 9 € over six gestations. These economic gains are relatively limited compared to the use of a single diet, but mineral precision feeding could bring benefits that indirectly impact costs, especially for the reduction of lameness and the lower risk of culling (Van Riet et al., 2013). Among the formulated diets, less than 1% of H_{Lys}-H_P was used by all the strategies, and less than 1% of L_{Lys}-S_P was used by the PF_{AA-P} strategy, which may be difficult to use in commercial farms. Implementing a PF strategy in gestation requires major investments with the use of several silos for gestating sow diets and automatic feeders with multiple hoopers (Huber, 2025). To avoid multiple silos with a low-use diet, it might be possible, for example, to slightly increase the ATTD-P content of the S level to meet the needs of a larger number of sows and thus reduce the number of feeds and silos required while remaining below the total P limits set for gestating sow diets (Dourmad et al., 2016). As done in cattle (Uyeh et al., 2019), a multi-objective approach, that takes into account the needs of the sows in the herd when formulating feed (with the extremes of the needs for each nutrient), would reduce the number of feeds and favour minimum cost for the given production objective of the farm.

As already demonstrated by Gaillard et al., (2020), Stewart et al., (2021) and Gaillard and Dourmad, (2022), the major benefit of PF_{AA} strategy lies in the savings in N excretion, ranging from -6% to -19%. These values are slightly lower than those simulated in our study (-26%), which could be explained by the low efficiency of use obtained in our study. In our simulation, despite two distinct feeding strategies for ATTD-P supply, no difference in P retention was obtained. The equations used to estimate it are based on body proteins (Dourmad et al., 2021) while the major P stock is located in the bone (Crenshaw, 2001). New equations linking feed

intake to retention would make it possible to refine the effect of the feeding strategies for minerals.

Current challenges to simulate in the long-term

Our study focused on sow feeding strategies during gestation and its long-term effects on sow performance. We made the choice not to incorporate variability during lactation by averaging the body responses of individuals by parity and used a fertility of 100% during six gestations in order to obtain significant responses to the effects of sow feeding during gestation. There are two major points to consider with regard to our simulation results. The first point involves the individual nutrient requirements during lactation. Voluntary intake and feeding pattern during lactation depend on the sow (Van Gheluwe et al., 2025). Voluntary intake is negatively correlated with sow body reserves at the start of lactation (Zhou et al., 2018). A greater average daily gain of the litter associated with a greater milk production increases sow requirements (Gauthier et al., 2019). These factors influence the nutritional balance and consequently the mobilisation of reserves during lactation. The second point deals with sow fertility and longevity. In the long term, excessive variations in protein and fat reserves during the reproductive cycles encourage farmers to cull the sows early (Dourmad et al., 1994), *i.e.* before their fifth parity without reaching their full potential. This early culling can be explained by a drop in reproductive performances in sows with poor body conditions at farrowing and at weaning. In lactation, the disproportionate loss of muscle mass has a greater negative effect than weight loss on performance during subsequent gestation (Hoving et al., 2011b). Sows mobilising more than 12% of their body protein mass during lactation have a prolonged weaning to oestrus interval (Clowes et al., 2003), as sows with high productive performances and suboptimal nutrient intake (Bergsma et al., 2009). Excessive mobilisation leads to reproductive failure (Quesnel, 2005). It has a negative impact on ovulation rate (Hoving et al., 2011a; Rempel et al., 2015), and embryo quality for the next gestation (Strathe et al., 2017). It is therefore important to achieve optimal body condition at farrowing to stimulate sows to achieve optimal nutritional intake during lactation (Ren et al., 2017; Choi et al., 2019). In addition, the lactation nutritional strategy aims to minimise the mobilisation of maternal body reserves (Tokach et al., 2019) and thus maximise lifetime productivity. PF strategies could provide indirect gains through a reduced latency of heat return, and thus fewer unproductive days when the sow consumes feed. Also, PF strategies could result in fewer heterogeneous litters due to poor embryo quality at insemination.

Other factors such as health status, environmental conditions (Gaillard et al., 2021), social behaviours (Durand et al., 2023), productive performances and lactation length (Van Der Peet-

Schwering and Bikker, 2019) should also be considered in the variation of response obtained between simulation and nutritional trials on farm. Simulation makes it possible to evaluate the effects of long-term strategies without the need for long and costly experiments.

Conclusion

Adjusting the weight and body composition equations at farm level enabled a more accurate assessment of the sow BW and BT through gestation and thus of their daily requirements. In the long term, compared with a CF diet, adjusting the sow diet according to their energy requirements, *i.e.* SF strategy, maintained the desired body condition at farrowing, and thus should reduce the potential risks peripartum and fertility issues for subsequent insemination. Applying a PF adjusted additionally for AA reduced feed costs by 17 € for six gestations and improved nitrogen use efficiency by 3%. Making an additional adjustment to P increased feed cost saving by 9 € and improves P use efficiency by 3%. Future studies could focus on sow individual responses (weaning to oestrus interval, litter size at birth) in consecutive lactations to fine-tune the evaluation of these strategies for sow longevity.

CRedit authorship contribution statement

Ribas Clément: Writing – original draft, Conceptualisation, Methodology, Data curation, Formal analysis, Software, Funding acquisition, Visualisation. Quiniou Nathalie: Writing – review and editing, Conceptualisation, Methodology, Funding acquisition, Supervision. Verschuren Lianne M.G.: Resources, Writing – review and editing, Supervision. Bergsma Rob: Data curation, Resources, Supervision. Benthem de Grave Xandra: Resources, Investigation, Writing – review and editing. Gaillard Charlotte: Writing – review and editing, Conceptualisation, Methodology, Funding acquisition, Project administration, Supervision.

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors did not use artificial-intelligence-assisted technologies in the writing process.

Funding sources

This work was supported by Topigs Norsvin Research Center B.V. Four-month Ph.D. exchange at Topigs Norsvin for Clément RIBAS received financial support from ERASMUS+ grant, Rennes Métropole and doctoral school EGAAL. This project would not have been possible without funding from INRAE and IFIP for Clément Ribas' PhD grant.

Declaration of Competing Interest

The authors report no declarations of interest.

Acknowledgments

The authors thank Schothorst Feed Research for providing access to their data for this study. The authors would like to thank Alice Cadero, Auxane Hamon, Coralie Tirlemont, and Caroline Xavier for their insightful discussions on optimisation methods.

References

- Bates, D.M., Mäechler, M., Bolker, B., Walker, S., 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *J. of Stat. Softw.* 67, 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bergsma, R., Kanis, E., Verstegen, M.W.A., van der Peet-Schwering, C.M.C., Knol, E.F., 2009. Lactation efficiency as a result of body composition dynamics and feed intake in sows. *Livest. Sci.* 125, 208–222. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.04.011>
- Bergsma, R., Lei, H., Yang, C., Knol, E.F., 2024. Sow weight development: A pragmatic approach to crossbred and selection populations. *J. Anim. Sci.* 102, 45–46. <https://doi.org/10.1093/jas/skae234.050>
- Branch, M.A., Coleman, T.F., Li, Y., 1999. A subspace, interior, and conjugate gradient method for large-scale bound-constrained minimization problems. *SIAM J. Sci. Comput.* 21, 1–23. <https://doi.org/10.1137/S1064827595289108>
- Brossard, L., van Milgen, J., Dourmad, J. Y., Gaillard, C., 2023. Smart Pig Nutrition in the Digital Era. in: Kyriazakis, I. (Eds.), *Smart Livestock Nutrition*. Springer International Publishing Cham, New York pp. 169–199. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22584-0_7
- Choi, Y.H., Hosseindoust, A., Kim, M.J., Kim, K.Y., Lee, J.H., Kim, Y.H., Kim, J.S., Chae, B.J., 2019. Additional feeding during late gestation improves initial litter weight of lactating sows exposed to high ambient temperature. *Rev. Bras. Zootec.* 48, e20180028. <https://doi.org/10.1590/rbz4820180028>
- Cloutier, L., Galiot, L., Sauvé, B., Pierre, C., Guay, F., Dumas, G., Gagnon, P., Létourneau Montminy, M.-P., 2024. Impact of precision feeding during gestation on the performance of sows over three cycles. *Animals* 14, 3513. <https://doi.org/10.3390/ani14233513>
- Clowes, E.J., Kirkwood, R., Cegielski, A., Aherne, F.X., 2003. Phase-feeding protein to gestating sows over three parities reduced nitrogen excretion without affecting sow performance. *Livest. Prod. Sci.* 81, 235–246. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(02\)00275-0](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00275-0)
- Crenshaw, T.D., 2001. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. In: Lewis, A. J. and Southern, L. L. (Eds.), *Swine Nutrition*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 187–212.
- Dourmad, J.Y., Brossard, L., Van Milgen, J., Noblet, J., 2011. InraPorc®, EvaPig® : des modèles et des logiciels pour optimiser la nutrition des porcs et réduire les rejets. *Innov. Agron.* 12, 87–96.
- Dourmad, J.Y., Étienne, M., Noblet, J., Causeur, D., 1997. Prédiction de la composition chimique des truies reproductrices à partir du poids vif et de l'épaisseur de lard dorsal. *Journ. Rech. Porc.* 29, 255–262.
- Dourmad, J. Y., Etienne, M., Noblet, J., Dubois, S., Boudon, A., 2021. Contenu corporel en minéraux des truies reproductrices. *Journ. Rech. Porc.* 53, 203–204.
- Dourmad, J.Y., Etienne, M., Prunier, A., Noblet, J., 1994. The effect of energy and protein intake of sows on their longevity: a review. *Livest. Prod. Sci.* 40, 87–97. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0301-6226(94)90039-6)
- Dourmad, J. Y., Étienne, M., Valancogne, A., Dubois, S., van Milgen, J., Noblet, J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of sows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 143, 372–386. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.05.019>
- Dourmad, J. Y., Levasseur, P., Daumer, M.-L., Hassouna, M., Landrain, B., Lemaire, N., Loussouarn, A., Salaün, Y., Espagnol, S., 2016. Évaluation des rejets d'azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc des porcs Influence de l'alimentation, du mode de logement et de la gestion des effluents. *RMT Elevages et environnement*.
- Dourmad, J. Y., Noblet, J., Pere, M.-C., Etienne, M., 1998. Mating, pregnancy and pre-natal growth. in: Kyriazakis, I. (Eds.), *A Quantitative Biology of the Pig*. CABI Publishing, Wallingford, pp. 129–153.
- Durand, M., Dourmad, J. Y., Julienne, A., Couasnon, M., Gaillard, C., 2023. Effects of a competitive feeding situation on the behaviour and energy requirements of gestating sows. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 261, 105884. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2023.105884>

- Everts, H., Dekker, R.A., 1995. Effect of protein supply during pregnancy and lactation on body composition of sows during three reproductive cycles. *Livest. Prod. Sci.* 43, 137–147. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(95\)00011-9](https://doi.org/10.1016/0301-6226(95)00011-9)
- Gaillard, C., Dourmad, J. Y., 2022. Application of a precision feeding strategy for gestating sows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 287, 115280. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115280>
- Gaillard, C., Durand, M., Largouët, C., Dourmad, J. Y., Tallet, C., 2021. Effects of the environment and animal behavior on nutrient requirements for gestating sows: Future improvements in precision feeding. *Anim. Feed Sci. Technol.* 279, 115034. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115034>
- Gaillard, C., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J. Y., 2019. Exploration of individual variability to better predict the nutrient requirements of gestating sows. *J. Anim. Sci.* 97, 4934–4945. <https://doi.org/10.1093/jas/skz320>
- Gaillard, C., Quiniou, N., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J. Y., 2020. Evaluation of a decision support system for precision feeding of gestating sows. *J. Anim. Sci.* 98, skaa255. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa255>
- Gaudré, D., Quiniou, N., 2009. What mineral and vitamin levels to recommend in swine diets? *Rev. Bras. Zootec.* 38, 190–200. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300019>
- Gauthier, R., Largouët, C., Dourmad, J. Y., 2022. Prediction of litter performance in lactating sows using machine learning, for precision livestock farming. *Comput. Electron. Agric.* 196, 106876. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106876>
- Gauthier, R., Largouët, C., Gaillard, C., Cloutier, L., Guay, F., Dourmad, J. Y., 2019. Dynamic modeling of nutrient use and individual requirements of lactating sows. *J. Anim. Sci.* 97, 2822–2836. <https://doi.org/10.1093/jas/skz167>
- Gauthier, R., Largouët, C., Rozé, L., Dourmad, J. Y., 2021. Online forecasting of daily feed intake in lactating sows supported by offline time-series clustering, for precision livestock farming. *Comput. Electron. Agric.* 188, 106329. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106329>
- Gill, B.P., 2006. Body composition of breeding gilts in response to dietary protein and energy balance from thirty kilograms of body weight to completion of first parity. *J. Anim. Sci.* 84, 1926–1934. <https://doi.org/10.2527/jas.2005-203>
- Hoving, L.L., Soede, N.M., Graat, E.A.M., Feitsma, H., Kemp, B., 2011a. Reproductive performance of second parity sows: Relations with subsequent reproduction. *Livest. Sci.* 140, 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.02.019>
- Hoving, L.L., Soede, N.M., van der Peet-Schwering, C.M.C., Graat, E.A.M., Feitsma, H., Kemp, B., 2011b. An increased feed intake during early pregnancy improves sow body weight recovery and increases litter size in young sows. *J. Anim. Sci.* 89, 3542–3550. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-3954>
- Huber, L., 2025. Review: Feeding strategies to meet the dynamic lysine and energy requirements of gestating and lactating sows. *Animal* 101574. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101574>
- IFIP, 2025. Note de Conjoncture, Aliment, Mars 2025. IFIP. Retrieved on 25 May 2025 from <https://ifip.asso.fr/note-de-conjoncture-aliment/>
- Johannsen, J.C., 2025. Optimal dietary protein for sows during gestation and transition. Aarhus University.
- Langendijk, P., Fleuren, M., Page, G., 2023. Review: Targeted nutrition in gestating sows: opportunities to enhance sow performance and piglet vitality. *Animal* 17, 100756. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100756>
- McEvoy, F.J., Madsen, M.T., Nielsen, M.B., Svalastoga, E.L., 2009. Computer tomographic investigation of subcutaneous adipose tissue as an indicator of body composition. *Acta Vet. Scand.* 51, 28. <https://doi.org/10.1186/1751-0147-51-28>
- Miller, E.G., Huber, L., Levesque, C.L., de Lange, C.F.M., 2018. Accuracy of predicting chemical body composition of gilts and sows. *Can. J. Anim. Sci.* 98, 597–602. <https://doi.org/10.1139/cjas-2017-0061>
- Mitchell, S., O'Sullivan, M., Dunning, I., 2011. PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python. Department of Engineering Science, University of Auckland.
- Moré, J.J., 1978. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. in: Watson, G.A. (Eds.), *Numerical Analysis, Lecture Notes in Mathematics*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 105–116. <https://doi.org/10.1007/BFb0067700>
- Muller, T.L., 2021. Changes in sow body composition during lactation and their impacts on litter performance and sow reproductive success. Murdoch University.

- Muro, B.B., Carnevale, R.F., Leal, D.F., Almond, G.W., Monteiro, M.S., Poor, A.P., Schinckel, A.P., Garbossa, C.A., 2023. The importance of optimal body condition to maximise reproductive health and perinatal outcomes in pigs. *Nutr. Res. Rev.* 36, 351–371. <https://doi.org/10.1017/S0954422422000129>
- Oliviero, C., Heinonen, M., Valros, A., Peltoniemi, O., 2010. Environmental and sow-related factors affecting the duration of farrowing. *Anim. Reprod. Sci.* 119, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2009.12.009>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., 2011. Scikit-learn: Machine learning in Python. *J. Mach. Learn. Res.* 12, 2825–2830.
- Python Software, 2020. Python (Version 3.9). Python Software Foundation. <https://www.python.org/>
- Quesnel, H., 2005. Etat nutritionnel et reproduction chez la truie allaitante. *INRAE Prod. Anim.* 18, 277–286. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2005.18.4.3533>
- Quiniou, N., 2019. Modélisation de l'évolution moyenne du poids vif après la mise bas selon l'âge chez des truies croisées Large White x Landrace. *Journ. Rech. Porc.* 51, 123–128.
- Quiniou, N., Boudon, A., Dourmad, J. Y., Moinecourt, M., Priymenko, N., Narcy, A., 2021. Modélisation du besoin en calcium de la truie reproductrice et variation du rapport phosphocalcique des aliments selon le niveau de performance. *INRAE Prod. Anim.* 34, 61–78. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.1.4723>
- R Core Team, 2024. R: A language and environment for statistical computing (Version 4.4.1). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rempel, L.A., Vallet, J.L., Lents, C.A., Nonneman, D.J., 2015. Measurements of body composition during late gestation and lactation in first and second parity sows and its relationship to piglet production and post-weaning reproductive performance. *Livest. Sci.* 178, 289–295. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2015.05.036>
- Ren, P., Yang, X.J., Kim, J.S., Menon, D., Baidoo, S.K., 2017. Effect of different feeding levels during three short periods of gestation on sow and litter performance over two reproductive cycles. *Anim. Reprod. Sci.* 177, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2016.12.005>
- Ribas, C., Quiniou, N., Gaillard, C., 2024. On farm precision feeding of gestating sows based on energy and amino acids on farrowing performances and feeding behavior over 3 consecutive gestations. *J. Anim. Sci.* 102, skae201. <https://doi.org/10.1093/jas/skae201>
- Rozeboom, D.W., Pettigrew, J.E., Moser, R.L., Cornelius, S.G., El Kandelgy, S.M., 1994. In vivo estimation of body composition of mature gilts using live weight, backfat thickness, and deuterium oxide. *J. Anim. Sci.* 72, 355–366. <https://doi.org/10.2527/1994.722355x>
- Serena, A., Hedemann, M.S., Bach Knudsen, K.E., 2008. Influence of dietary fiber on luminal environment and morphology in the small and large intestine of sows. *J. Anim. Sci.* 86, 2217–2227. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-062>
- Stewart, V., Buis, R.Q., Christensen, B., Hansen, L.L., De Lange, C.F.M., Mandell, I.B., Huber, L.-A., 2021. The effects of precisely meeting estimated daily energy and lysine requirements for gestating sows over three consecutive pregnancies on sow reproductive and lactation performance. *Transl. Anim. Sci.* 5, txab226. <https://doi.org/10.1093/tas/txab226>
- Strathe, A.V., Bruun, T.S., Hansen, C.F., 2017. Sows with high milk production had both a high feed intake and high body mobilization. *Animal* 11, 1913–1921. <https://doi.org/10.1017/S1751731117000155>
- Tokach, M.D., Menegat, M.B., Gourley, K.M., Goodband, R.D., 2019. Review: Nutrient requirements of the modern high-producing lactating sow, with an emphasis on amino acid requirements. *Animal* 13, 2967–2977. <https://doi.org/10.1017/S1751731119001253>
- Uyeh, D.D., Pamulapati, T., Mallipeddi, R., Park, T., Asem-Hiablie, S., Woo, S., Kim, J., Kim, Y., Ha, Y., 2019. Precision animal feed formulation: An evolutionary multi-objective approach. *Anim. Feed Sci. Technol.* 256, 114211. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114211>
- Van Der Peet-Schwering, C.M.C., Bikker, P., 2019. Energy and amino acid requirements of gestating and lactating sows. Wageningen Livestock Research.
- Van Gheluwe, T., Maudet, N., Girres, C., Lenoir, G., 2025. Caractérisation de profils d'ingestion de truies allaitantes et liens avec leurs performances : une étude de cas sur la lignée Tai Zumu. *Journ. Rech. Porc.* 57, 167–172.
- Van Riet, M.M.J., Millet, S., Aluwé, M., Janssens, G.P.J., 2013. Impact of nutrition on lameness and claw health in sows. *Livest. Sci.* 156, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.06.005>

- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S.J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K.J., Mayorov, N., Nelson, A.R.J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C.J., Polat, İ., Feng, Y., Moore, E.W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E.A., Harris, C.R., Archibald, A.M., Ribeiro, A.H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., 2020. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nat. Methods* 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Whittemore, C.T., Yang, H., 1989. Physical and chemical composition of the body of breeding sows with differing body subcutaneous fat depth at parturition, differing nutrition during lactation and differing litter size. *Anim. Sci.* 48, 203–212. <https://doi.org/10.1017/S0003356100003913>
- Zhou, Y., Xu, T., Cai, A., Wu, Y., Wei, H., Jiang, S., Peng, J., 2018. Excessive backfat of sows at 109 d of gestation induces lipotoxic placental environment and is associated with declining reproductive performance. *J. Anim. Sci.* 96, 250–257. <https://doi.org/10.1093/jas/skx041>

9. Discussion générale

Au cours de cette thèse, les données individuelles et journalières d'activité physique et de poids réel ont été utilisées dans l'estimation des besoins énergétiques de la truie gestante (chapitre 4 ; premier objectif : ÉNERGIE). Pour l'activité physique obtenue avec des accéléromètres dans l'expérimentation 1, les résultats indiquent des besoins énergétiques individuels plus élevés que l'hypothèse moyenne de 4 h debout retenue pour l'ensemble des truies suivies. L'intégration du poids obtenu à l'aide de balances connectées n'entraîne pas de modification significative de l'estimation du besoin comparativement au poids modélisé dans le modèle nutritionnel.

Les résultats des essais expérimentaux rapportés aux chapitres 5 et 6 et des simulations présentées dans le chapitre 8 mettent en évidence que l'apport individualisé en énergie, comparé à des plans d'alimentation selon le rang de portée, permet d'atteindre les objectifs moyens de poids et d'épaisseur de lard dorsal à la mise-bas et de réduire la variabilité entre les truies de même rang au début de la lactation avec la succession des cycles reproductifs.

L'ajustement de l'alimentation sur les besoins en acides aminés individuels pendant la gestation permet de réduire d'au moins 16 % l'ingéré de lysine digestible et de 3 % les coûts alimentaires, tout en améliorant l'efficacité d'utilisation de l'azote de 3 % sans affecter négativement les performances productives (deuxième objectif : LONGÉVITÉ). Ces résultats obtenus expérimentalement sur trois cycles consécutifs ont conforté les conclusions préalablement obtenues sur un seul cycle de gestation comparativement à une alimentation conventionnelle. Ils ont été complétés avec une nouvelle stratégie d'alimentation sur mesure mise en place avec un ajustement conjoint des apports en acides aminés et en minéraux sur le dernier mois de gestation (troisième objectif : MINÉRAUX). C'est sur la dernière semaine de gestation que l'apport de phosphore digestible réalisé est significativement plus élevé en moyenne, cependant sans effet visible sur un biomarqueur de résorption osseuse ou les performances productives et les boiteries. Par validation *a posteriori* à l'aide d'une méthode externe dosant au laboratoire le ratio phosphocalcique urinaire, la proportion de truies alimentées sur mesure nourries selon leur besoin en phosphore était plus élevée que chez celles alimentées suivant les conditions standards retenues dans notre essai.

La discussion ci-après est organisée en trois parties, autour de :

(1) l'intérêt de l'alimentation sur mesure pour la longévité de la truie avec un focus particulier sur l'apport en minéraux ;

(2) les modifications effectuées et restant à effectuer sur le modèle nutritionnel pour truie gestante utilisé dans ce projet et son incorporation dans un outil d'aide à la décision pour la nutrition des truies ;

(3) la place que peut occuper l'élevage porcin et les solutions que peut apporter l'élevage sur mesure dans le contexte sociétal et environnemental actuel.

9.1. L'alimentation sur mesure de la truie sur le long-terme

9.1.1. Caractériser le besoin minéral individuel et journalier pendant la gestation

Pour affiner l'estimation des besoins en minéraux de la truie et pouvoir l'appliquer à l'ensemble de la gestation, il semble primordial d'intégrer un nouveau compartiment qui représente l'évolution du contenu osseux. En effet, les équations utilisées actuellement pour le dépôt de P corporel sont fonction du dépôt protéique alors que le contenu osseux peut évoluer différemment (Crenshaw et Johanson, 1995) et représente un compartiment important au sein de l'organisme (96 à 99 % du Ca et 60 à 80 % du P de l'organisme sont stockés dans l'os ; Crenshaw, 2001). En complément des équations pour les tissus mous, des équations indépendantes du muscle sont disponibles pour le porc en croissance *via* un potentiel de dépôt du calcium dans l'os qui est la force motrice du modèle proposé par Létourneau-Montminy et al. (2015) et Lautrou et al. (2020). Leur objectif est de viser une maximisation de la minéralisation osseuse sans affecter négativement les performances de croissance. Cependant pour les truies gestantes, le niveau d'alimentation (restreint) et le stade physiologique interrogent sur la transposition des équations adaptées au porc nourris *ad libitum*. Plusieurs questions demeurent : en l'occurrence, il s'agit de pouvoir décrire la cinétique d'accrétion osseuse durant la gestation, de savoir si le dépôt osseux peut être maximisé pendant la gestation tout en minimisant l'utilisation des ressources et les excréctions environnementales. Enfin, la dernière question porte sur la définition de la fenêtre pendant laquelle la digestibilité des minéraux est accrue en lien avec la régulation hormonale du niveau plasmatique en Ca et P.

Heurtault et al. (2024b) proposent un modèle mécaniste prédisant la mobilisation osseuse totale intervenue pendant la lactation à partir des apports alimentaires effectués ainsi que des performances de gain de poids de la portée. Ce modèle aura la possibilité d'être combiné avec le nôtre pour intégrer une composante de restauration des réserves osseuses mobilisées pendant la précédente lactation dans l'estimation des besoins nutritionnels de la truie en gestation. Notre objectif en gestation pourra être, en supplément de la restauration des

réserves osseuses mobilisées durant la précédente lactation, d'améliorer le degré de minéralisation osseuse à la mise-bas. Dans un premier temps, cet objectif pourra être fixé par rang de portée à partir du suivi des contenus osseux des truies n'ayant pas eu de problèmes de santé et ayant pu maintenir de hauts niveaux de performances sur le long terme. Les résultats obtenus par Peters et al. (2010) corroborent une augmentation de la masse minérale osseuse par kg de poids vif vide au moins de la deuxième à la sixième gestation.

Dans ce nouveau module d'accrétion osseuse journalière, plusieurs critères d'entrée interagiront fortement et devront être caractérisés (Figure 9.1). Le dépôt corporel de P dû à la croissance maternelle des tissus mous sera considéré comme prioritaire vis-à-vis de l'accrétion osseuse (Crenshaw, 2001). Le dépôt de Ca dans le conceptus en fin de gestation sera également priorisé (Bikker et Blok, 2017). La digestibilité du Ca et du P est accrue par l'incorporation de phytases et décroît en situation de carence de vitamine D (Stein, 2024). En fonction de l'apport effectué et de l'établissement d'un potentiel d'accrétion osseuse en fonction de l'âge et du stade de gestation, il semble possible d'obtenir ces valeurs. Le point délicat reste la caractérisation de la digestibilité du calcium (discuté en section 9.1.2), de la cinétique d'accrétion au cours de la gestation et du potentiel d'accrétion osseuse. Sachant qu'étudier la digestibilité du Ca est intrinsèquement liée à l'étude de celle du P au vue de leur interaction au niveau digestif et métabolique (Létourneau-Montminy et al., 2014). Par inversion de ce module, il sera possible de caractériser le ratio Ca total/P digestible de l'aliment selon l'objectif considéré (e.g. restauration des réserves osseuses mobilisées à la précédente lactation plus un pourcentage d'accrétion supplémentaire de 5 %).

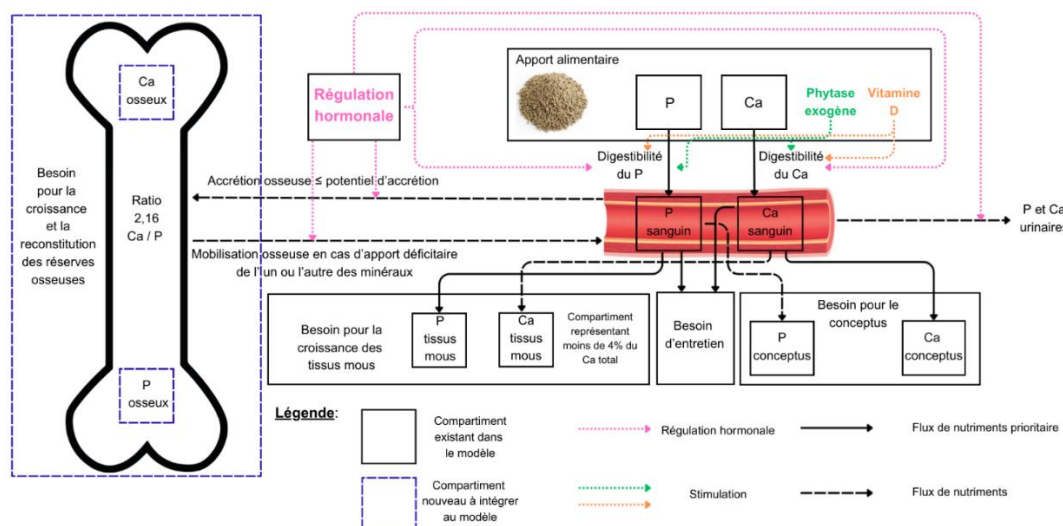


Figure 9.1 : Modèle d'estimation du besoin phosphocalcique durant la gestation intégrant le compartiment osseux à reconstituer après la lactation

Dans cette thèse, un taux d'incorporation similaire de phytases et de vitamine D a été fixé dans tous les aliments pour éviter un effet inhérent à ces ingrédients sur la digestibilité des minéraux. Un projet de thèse est en cours de développement pour évaluer l'effet d'apport individuel journalier de phytases dans l'application de stratégies d'alimentation sur mesure. L'ensemble des points délicats identifiés devra faire l'objet des prochains efforts de recherche pour affiner l'estimation du besoin minéral journalier et individuel en gestation.

9.1.2. Restaurer les réserves osseuses mobilisées pendant la lactation

Le phosphore. Dans l'expérimentation 2 de notre étude, nous avons fait l'hypothèse qu'à 80 jours de gestation les truies avaient restauré leurs réserves osseuses, *i.e.* en récupérant celles mobilisées durant la précédente lactation, grâce à l'aliment standard formulé avec une teneur en ATTD-P de 2,6 g par kg d'aliment. Nous avons voulu vérifier cette hypothèse en utilisant les équations établies par Dourmad et al. (2021) pour estimer la mobilisation de P et Ca corporel pendant la lactation (Tableau 9.1). La quantité de P osseux mobilisée est calculée à partir du Ca mobilisé (stocké à 99 % dans l'os) et du ratio Ca/P établi à 2,16 dans l'os (Crenshaw, 2001). Le Ca mobilisé est calculé à partir de la différence de Ca corporel prédit à l'aide du poids vif vide et de l'épaisseur de lard dorsal à la mise-bas $n - 1$ et à l'insémination de la gestation n . Les truies de nos deux stratégies alimentaires mobilisent des quantités semblables de P osseux (± 5 %) pour chaque lactation considérée. La mobilisation est 13 % plus importante au cours du cycle expérimental 3 qu'au précédent car les truies ont perdu plus de 1 mm d'épaisseur de lard dorsal supplémentaire durant la lactation. Durant le cycle expérimental 2, les valeurs obtenues sont très proches de celles obtenues, à partir d'équations de prédiction établies à partir de données de scanner à absorptiométrie biphotonique à rayons X, pour des cochettes alimentées selon les recommandations suisses (Heurtault et al., 2024a). Elles ont mobilisé, respectivement, 95 et 205 g de P et Ca corporel durant la lactation d'une durée équivalente à celle de notre essai. Tandis que pour le cycle expérimental 3, nos valeurs sont proches de leurs cochettes alimentées à 50 % des recommandations suisses mais avec un ajout de phytases. La précision élevée des équations de prédiction établies par Dourmad et al. (2021) serait due à la prise en compte de la perte de masse lipidique qui serait corrélée positivement avec la mobilisation osseuse (J.Heurtault, communication personnelle, 12 août 2025). Pour calculer la mobilisation durant la lactation, il est plus aisé de collecter en ferme le poids vif et l'épaisseur de lard dorsal que d'effectuer des mesures à l'aide d'un scanner. Il reste cependant à vérifier que les prédictions obtenues avec les équations utilisant le poids vif vide et de l'épaisseur de lard dorsal ne dévient pas de la réalité pour des truies avec des rangs de portée plus élevés. En effet, les équations utilisées ici sont celles de la littérature qui minimisent

l'erreur de prédiction de P et Ca corporel pour des cochettes (Heurtault et al., 2023), avec respectivement 6 et 9 % d'erreur.

En additionnant la quantité de P mobilisée aux besoins d'entretien, de croissance maternelle et de croissance du conceptus sur les 80 premiers jours de gestation, notre hypothèse sur le P est vérifiée : le total est inférieur aux apports en P digestible réalisés (Tableau 9.1 ; en moyenne excédentaires de 39 %). Il semble donc encore possible d'améliorer la pertinence des apports de P digestible aux truies en début de gestation.

Tableau 9.1 – Evaluation des quantités de minéraux mobilisées à la précédente lactation pour les truies suivies sur trois cycles de gestation consécutifs durant l'expérimentation 2 et apports effectués sur la gestation suivante

Stratégie	Cycle expérimental ¹			
	2		3	
	SF	PF	SF	PF
n	15	18	15	18
Quantité mobilisée pendant la précédente lactation ²				
P corporel, g	124	131	141	150
P osseux, g	97	102	111	117
Ca, g	209	220	240	253
Somme des besoins estimés jusqu'au jour 80 de gestation ³				
P, g	448	462	447	451
Ca, g	2095	2185	2060	2087
Apports alimentaires effectués jusqu'au jour 80 de gestation				
ATTD-P, g	757	774	776	782
Ca, g	2 800	2 860	2 870	2 890
Apport excédentaire après prise en compte de l'accrétion osseuse ⁴				
ATTD-P, g	212	210	217	214
Ca, g	10.1	-53.9	8.5	-38.1

Abréviations : ATTD-P = phosphore digestible apparent ; Ca = calcium ; PF = alimentation sur mesure individuelle et journalière ajustée en énergie et acides aminés à partir de la mise en groupe (25 jours de gestation) et ajustée additionnellement sur l'ATTD-P à partir de 80 jours de gestation ; SF = alimentation standard ajustée individuellement sur l'énergie.

¹ Le premier cycle expérimental n'est pas présenté car les données de la précédente lactation pour les multipares ne sont pas connues tout comme pour les nullipares qui n'ont encore jamais mis bas.

² Utilisation des équations de prédiction du contenu corporel en Ca et P à partir du poids vif vide (calculé comme le poids de la truie x 0,96) et de l'épaisseur de lard dorsal à la mise-bas n-1 et à l'insémination de la gestation n (Dourmad et al., 2021). La mobilisation du P de l'os correspond à la mobilisation du Ca (99 % dans l'os) divisée par le ratio fixe Ca/P de 2,16 de composition de l'os (Crenshaw, 2001 ; Bikker et Blok, 2017).

³ Somme des besoins d'entretien, de croissance maternelle et de développement du conceptus sur les 80 premiers jours de gestation à partir des équations de Quiniou et al. (2021).

⁴ Calculé comme ingéré – (besoins de gestation + mobilisation à la précédente lactation).

Le calcium. Le calcul du bilan calcique pendant le début de la gestation a été réalisé comme décrit ci-dessus pour le P. L'apport de Ca total apparaît proche du besoin en moyenne pour les truies de notre essai (± 1 %). Ce résultat est à prendre avec beaucoup de précautions. La première tient à l'estimation des besoins en Ca de la truie sous forme de Ca total. C'est

actuellement la forme retenue en formulation par manque de connaissances permettant de renseigner le contenu en Ca digestible des matières premières. Pour ce faire, une hypothèse de coefficient d'utilisation digestive du calcium est utilisée pour convertir l'estimation du besoin en Ca exprimé sur une base digestible en Ca total. Nous avons fixé ce coefficient d'utilisation digestive à 30 % après une revue de la littérature (non publiée) de 35 régimes alimentaires utilisés dans 11 articles¹ se focalisant sur l'ATTD-Ca sur le dernier mois de gestation. Or ce coefficient varie en fonction de l'apport alimentaire relativement au besoin, du stade de gestation, et de la source du carbonate de calcium incorporé dans l'aliment (Samson et al., 2013). En passant d'un coefficient d'utilisation digestive de 50 à 30 % (Quiniou et al., 2021), l'apport à effectuer varie de 150 % sur une base de Ca total. Le besoin est plus élevé pendant le début de gestation associé à une restauration des réserves mobilisées durant la lactation, et pendant la fin de gestation associé à la rétention de Ca au niveau fœtal. Nous pouvons supposer que ce coefficient est le plus élevé sur ces deux périodes comparativement au milieu de la gestation. D'après la Figure 6.3, l'excrétion urinaire de Ca n'est pas différente entre les stratégies alimentaires étudiées et des valeurs élevées sont observées à 80 jours de gestation, qui représentent 30 % de l'ingéré équivalent au coefficient d'utilisation digestive fixé. Les résultats d'analyse urinaire vont dans le sens d'un apport réalisé de façon excédentaire aux besoins de Ca. Il est absorbé mais non utilisé ce qui contredit les résultats obtenus avec le

- ¹ Darriet, C., Axe, D.E., Crenshaw, T.D., 2017. Acidogenic mineral additions increased Ca mobilization in prepartum sows. *Journal of Animal Science* 95, 212–225. <https://doi.org/10.2527/jas.2016.0859>
- Hanczakowska, E., Swiatkiewicz, M., Kühn, I., 2009. Effect of microbial phytase supplement to feed for sows on apparent digestibility of P, Ca and crude protein and reproductive parameters in two consecutive reproduction cycles. *Medycyna Wet.* 65, 250–254.
- Jongbloed, A.W., Diepen, J.T.M. van, Binnendijk, G.P., Bikker, P., Vereecken, M., Bierman, K., 2013. Efficacy of Optiphos™ phytase on mineral digestibility in diets for breeding sows: effect during pregnancy and lactation. *Journal of Livestock Science* 4, 7–16.
- Jongbloed, A.W., van Diepen, J.Th.M., Kemme, P.A., Broz, J., 2004. Efficacy of microbial phytase on mineral digestibility in diets for gestating and lactating sows. *Livestock Production Science* 91, 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.07.017>
- Kemme, P.A., Jongbloed, A.W., Mroz, Z., Beynen, A.C., 1997. The efficacy of *Aspergillus niger* phytase in rendering phytate phosphorus available for absorption in pigs is influenced by pig physiological status. *Journal of Animal Science* 75, 2129. <https://doi.org/10.2527/1997.7582129x>
- Lee, S.A., Lagos, L.V., Bedford, M.R., Stein, H.H., 2020. Increasing calcium from deficient to adequate concentration in diets for gestating sows decreases digestibility of phosphorus and reduces serum concentration of a bone resorption biomarker. *Journal of Animal Science* 98, 1–8. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa076>
- Lee, S.A., Lagos, L.V., Walk, C.L., Stein, H.H., 2019. Basal endogenous loss, standardized total tract digestibility of calcium in calcium carbonate, and retention of calcium in gestating sows change during gestation, but microbial phytase reduces basal endogenous loss of calcium. *Journal of Animal Science* 97, 1712–1721. <https://doi.org/10.1093/jas/skz048>
- Lee, S.A., Torres-Mendoza, L.J., Stein, H.H., 2022. Effects of 25-hydroxycholecalciferol (25-OH-D3) and 1-hydroxycholecalciferol (1-OH-D3) on serum bone biomarkers and calcium and phosphorus balance and concentrations of energy in diets without or with microbial phytase fed to sows in late gestation. *Journal of Animal Science* 100, skac299. <https://doi.org/10.1093/jas/skac299>
- Nasir, Z., Broz, J., Zijlstra, R.T., 2014. Supplementation of a wheat-based diet low in phosphorus with microbial 6-phytase expressed in *Aspergillus oryzae* increases digestibility and plasma phosphorus but not performance in lactating sows. *Animal Feed Science and Technology* 198, 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.10.008>
- Nyachoti, C.M., Sands, J.S., Connor, M.L., Adeola, O., 2006. Effect of supplementing phytase to corn- or wheat-based gestation and lactation diets on nutrient digestibility and sow and litter performance. *Canadian Journal of Animal Science* 86, 501–510. <https://doi.org/10.4141/A04-500>
- Zhai, H., Cowieson, A.J., Pappenberger, G., Zhang, J., Wu, J., 2021. The effect of short-term phytase supplementation on the apparent total tract digestibility of calcium and phosphorus and the reproductive performance of late gestation and lactating sows fed diets without mineral phosphorus. *Journal of Animal Science* 99, skab194. <https://doi.org/10.1093/jas/skab194>

ratio fixe d'utilisation digestive et qui plaide ainsi pour un coefficient d'utilisation digestive supérieur à 30 %. Des recherches supplémentaires seront nécessaires afin de pouvoir utiliser le Ca sous la forme digestible en formulation.

9.1.3. Nourrir des truies dont les caractéristiques évoluent

La gestation est une phase où l'accrétion est considérée comme devant être prédominante pour constituer des réserves disponibles en grandes quantités lors de la lactation, *i.e.* dont la mobilisation (résorption) permettra de pallier à un déficit important. Pour concilier productivité et longévité, il faut s'assurer que la truie n'accumule pas de carences au cours des différentes phases du cycle reproductif (Dourmad et al., 1994). La sélection génétique pour des porcs charcutiers de plus en plus maigres et efficaces au niveau alimentaire a conduit en parallèle à une augmentation du poids des truies à maturité (Quiniou, 2019). Celle-ci entraîne une augmentation de la charge mécanique sur la structure osseuse et une augmentation du besoin d'entretien pendant la gestation. Les organismes de sélection génétique se penchent actuellement sur ce sujet, et évaluent la possibilité de réduire le poids des truies à maturité en vue de réduire le coût alimentaire associé (Bergsma et al., 2024). Un autre élément peu évoqué jusqu'alors concerne l'augmentation du gabarit des truies avec leur mise en groupe. Avec plus d'activité physique liée à une surface disponible plus importante, la croissance protéique et concomitamment les besoins énergétiques associés ainsi que l'accrétion osseuse sont favorisées (Petersen et al., 1998). Ces éléments renforcent l'intérêt d'un suivi individuel de l'activité physique des truies et de sa prise en compte dans l'estimation des besoins nutritionnels. À mon avis, il ne faudrait pas que la sélection s'attache à sélectionner des individus ayant des propensions à être moins actifs pour diminuer les besoins énergétiques. Cela pourrait avoir des conséquences négatives notamment sur les boiteries car le mouvement favorise le développement et la solidité de la structure osseuse (Schenck et al., 2008).

9.1.4. Mettre en place l'alimentation sur mesure en élevages commerciaux, une dépendance aux normes environnementales ?

Les gains économiques obtenus avec l'alimentation sur mesure dépendent avant tout de la stratégie alimentaire à laquelle elle est comparée. Lorsque l'alimentation sur mesure est ajustée sur le besoin individuel en énergie, les truies atteignent les objectifs d'état corporel fixés à la mise-bas tandis que les truies alimentées selon leur rang de portée ont une variabilité plus importante d'état corporel. Atteindre ces objectifs permet de réduire les risques de problèmes péri-partum et une baisse des performances reproductives qui entraînent une hausse des réformes prématurées (Muro et al., 2023). Nous n'avons pas observé de baisse

de performances dans nos essais mais Stewart et al. (2021), avec 49 truies suivies sur trois cycles, ont noté que les truies en alimentation conventionnelle par rapport aux truies suivant une alimentation sur mesure ajustée en énergie et acides aminés avaient 30 % plus de problèmes de reproduction. Avec une alimentation sur mesure ajustée en énergie, et l'hypothèse d'une baisse des retours en œstrus de 5 %, des gains économiques sont attendus. Pour un troupeau de 245 truies productives conduit en sept bandes avec un sevrage à 4 semaines, cette réduction correspond à deux truies en moins par bande qui reviennent en chaleur et sont gestantes dès la première saillie. Cette hausse de performances permettrait d'économiser 30 € sur les coûts alimentaires. Ces économies correspondent à un apport de 2,5 kg d'aliment par jour coûtant 289 € par tonne pour les deux truies qui seraient revenues en chaleur et dont l'insémination avec la bande suivante s'effectuerait 3 semaines plus tard.

Nos résultats et ceux obtenus dans des études antérieures (Cloutier et al., 2019 ; Gaillard et Dourmad, 2022) convergent vers des gains économiques relativement faibles en termes de coût alimentaire avec l'alimentation sur mesure ajustée sur l'énergie et les acides aminés : compris entre 4 et 10 € par tonne d'aliment, comparativement à une alimentation se fondant sur le besoin en énergie pour raisonner la ration. Pour un élevage de 240 truies productives, l'investissement associé à la mise en place de l'alimentation sur mesure serait rentabilisé entre 9 et 18 ans grâce aux gains sur le coût alimentaire et cette durée serait réduite par trois si la stratégie permettait également une détection précoce des problèmes de santé (Durand, 2023). Avec une alimentation sur mesure ajustée additionnellement sur les minéraux, nous n'avons pas obtenu d'économies sur les coûts alimentaires en l'appliquant uniquement sur le dernier mois de gestation. Par simulation, une alimentation selon le besoin en P digestible sur l'ensemble de la gestation correspondrait à un apport total de P digestible réduit de 40 % par rapport à une alimentation conventionnelle avec une quantité d'aliment apportée équivalente. Nous obtenons alors un gain additionnel sur le coût alimentaire de 3 € par tonne d'aliment, ce qui reste une économie faible dans le contexte actuel de prix des sources minérales mais qui pourrait avoir des avantages potentiels par la réduction des problèmes de boiterie (Van Riet et al., 2013).

Le gain le plus important obtenu grâce à l'alimentation sur mesure est la forte réduction des rejets en N et P, respectivement -19 % et -15 % pendant la gestation (Gaillard et al., 2020 ; Gaillard et Dourmad, 2022), mais cet atout majeur est difficilement monétisable dans un élevage donné.

En France, pour des élevages de plus de 750 truies, une autorisation spécifique aux installations classées pour la protection de l'environnement est exigée. Elle nécessite des études d'incidence et de dangers sur l'environnement ainsi qu'un plan d'épandage adapté aux

quantités d'effluents d'élevage produites. La directive européenne IED 2.0 publiée en avril 2024, qui sera transposée dans le droit français mi-2026 (Ministère de la transition écologique, de l'énergie, du climat et de la prévention des risques, 2024), encadre les émissions industrielles et les émissions d'élevage (notamment l'excrétion de P et N) et s'applique pour des élevages de porc de plus de 350 unités de bétail (équivalent à 700 truies). À la vue des gains obtenus sur l'excrétion des animaux *via* l'alimentation sur mesure, il serait intéressant d'incorporer la stratégie d'alimentation sur mesure dans la fiche « BREF » de l'alimentation multiphase actuellement en vigueur comme « meilleure technique disponible » pour la version antérieure de la directive IED (RMT Élevage et Environnement, 2019). Cette fiche incorpore les valeurs d'excrétion par animal en fonction du traitement appliqué sur l'effluent et en fonction de la stratégie d'alimentation utilisée (Dourmad et al., 2016). Rajouter l'alimentation sur mesure dans cette fiche permettrait de valoriser la stratégie sur mesure, en prenant en compte une réduction de l'excrétion de N et de P pour chaque animal, avant l'application de cette nouvelle directive européenne. L'application d'une alimentation sur mesure et les investissements associés seraient à mettre en regard des investissements nécessaires pour le traitement des effluents (e.g. laveur d'air) qui seraient utilisés pour atteindre les mêmes niveaux de rejets. Également, un facteur d'abattement plus fort pourrait être appliqué sur le calcul des émissions que celui (*i.e.* 0,17) retenu actuellement pour une alimentation biphasée. L'ensemble de ces démarches inciterait les plus grosses exploitations (soumises à cette réglementation) à repenser la conduite alimentaire de leurs animaux afin de réduire les excréments par animal présent en envisageant l'alimentation sur mesure.

9.2. Développement d'un outil d'aide à la décision souple pour la nutrition de la truie

A plus long terme, l'ambition du projet de recherches dans lequel s'intègre cette thèse est de produire un outil décisionnel pour l'amélioration des conduites alimentaires des truies, suffisamment souple et robuste pour s'adapter aux différentes quantités d'informations disponibles sur les fermes. Cette thèse est soutenue par l'Unité Mixte Technologique Digiporc qui s'adresse à une nouvelle génération de systèmes d'élevage intégrant le numérique et dont l'objectif est de recueillir et traiter automatiquement des informations collectées pour le phénotypage de animaux et leurs conditions d'élevage. L'outil d'aide à la décision s'appuie sur des capteurs pour collecter les données, un ou plusieurs modèles pour traiter l'information et des automates pour piloter la décision.

9.2.1. Modification du modèle existant

Un temps non négligeable du projet de thèse a été dédié à l'amélioration du modèle nutritionnel écrit en langage Python. Le modèle modifié a pour but de faciliter l'intégration des données d'entrée et l'incorporation de nouveaux modules tels que par exemple celui estimant les besoins de la truie en lactation (Gauthier, 2021). Il est composé de quatre classes : Truie, Aliment, Environnement qui étaient déjà présentes et la nouvelle classe Élevage. Elles permettent de définir les attributs ou caractéristiques propres à des éléments semblables aussi appelés objets. La classe Élevage a été créée pour intégrer la spécificité inter-élevage notamment par l'écriture de fonctions pour calibrer les équations du modèle nutritionnel à l'aide des données disponibles sur l'élevage. Par exemple, la nouvelle équation *calibration_Weibull* permet à partir des données disponibles de calibrer les paramètres de cette équation permettant de représenter l'évolution du poids en fonction de l'âge au sein de l'élevage considéré.

Le modèle a été également restructuré pour fournir un fichier de sortie au format .CSV reprenant les estimations des besoins en gestation. Grâce aux nouvelles fonctions *proportion_aliment* et *stratégie_nutritionnelle* disponibles dans la classe Aliment, le fichier de sortie contient la proportion d'aliments à distribuer individuellement pour répondre aux besoins individuels journaliers pendant toute la gestation à partir des caractéristiques nutritionnelles des aliments disponibles sur la ferme. Cette structuration facilite la production des courbes d'alimentation que peuvent lire les automates d'alimentations, dont les deux systèmes différents utilisés dans nos expérimentations.

Dans ce projet de thèse, le focus a été fait sur les stratégies d'alimentation appliquées pendant la gestation. Pour simuler leurs impacts sur le long-terme de la carrière de la truie, des valeurs moyennes d'évolution des contenus corporels pendant la lactation en fonction du rang de portée et de la croissance de la portée ont été utilisées. Or, il est connu que ces réponses sont fortement individu-dépendants de l'ingestion et dépendent également du plan d'alimentation appliqué en lactation (Tokach et al., 2019 ; Gauthier et al., 2021). Des modifications supplémentaires de programmation seront à apporter pour intégrer le modèle spécialisé pour estimer les besoins individuels journaliers des truies allaitantes (Gauthier et al., 2022). Il faudra notamment s'assurer que les caractéristiques des truies obtenues à la fin de la gestation et la nomenclature des variables utilisées se combinent avec celles du module pour truies allaitantes. Il permettra la conception d'une alimentation sur mesure sur un continuum intra-cycle reproductif (gestation et lactation) et sur l'enchaînement des cycles reproductifs durant la carrière de la truie. Le modèle devra encore surmonter des limites liées à l'intégration des spécificités de conduite pour les périodes critiques telles que l'intervalle entrée en maternité-

mise-bas ou l'intervalle sevrage-œstrus. Ces périodes, avec des valeurs expérimentales complémentaires, devront être mieux considérées dans le projet d'outil d'aide à la décision.

9.2.2. Intégration des données d'ambiance

Les données descriptives des conditions d'ambiance (e.g. température, humidité relative) sont disponibles en temps réel (par pas de temps de 30 secondes, 15 minutes, 1 heure selon les systèmes de mesure connectés) mais n'ont pas été traitées dans cette thèse. Dans les faits, si l'on considère la température critique inférieure des truies gestantes élevées en groupe à 14°C selon Geuyen et al. (1984), les conditions de température ambiante se situent très rarement en-dessous de ce seuil dans les bâtiments d'élevage conçus avec une isolation et un système de ventilation adaptés aux conditions climatiques européennes. Dans nos expérimentations, seules les truies de la bande 1 de l'essai 1 ont été exposées à une température de 13°C à leur entrée dans la salle lors de la première gestation pendant 2 heures. Pour une truie pesant en moyenne 200 kg à l'arrivée dans la salle de gestation en groupe et une augmentation du besoin énergétique de 10 kJ par degré en-deçà de la température critique inférieure et par kg de $PV^{0.75}$ par jour (Noblet et al., 1997), ces conditions d'ambiance représentent une dépense supplémentaire de 44 kJ soit 3 g d'aliment. Cette quantité est négligeable au regard de la précision de distribution des automates alimentaires ou des possibles gaspillages des animaux lors de la phase d'alimentation. Nous utilisons le terme d'alimentation sur mesure et non de précision pour bien rendre compte que l'exactitude des informations utilisées peut être encore améliorée. Dans nos essais, même si le modèle permet de calculer au gramme près les besoins, la ration allouée est arrondie à l'hectogramme pour être au niveau des ordres de grandeur de précision de la distribution d'aliment. Nous pourrions également nous demander s'il est réellement nécessaire d'améliorer ce niveau de précision car toutes les données collectées se font avec une marge d'erreur et cumuler ces marges d'erreur au sein du modèle nutritionnel ne permet pas d'assurer une valeur exacte du besoin au gramme près.

Dans le cas de températures supérieures à la température critique supérieure, les truies modifient leur comportement, en réduisant les contacts avec leurs congénères pendant les phases de repos, en réduisant leur niveau d'activité de 30 % pour une température de 32 °C, ou en augmentant la quantité d'eau utilisée pour boire et s'asperger (Abarnou et al., 2023). Les truies en gestation sont moins sujettes à une baisse de la consommation que les truies allaitantes et les porcs à l'engrais car elles sont rationnées durant cette phase et produisent donc moins de chaleur en lien avec l'utilisation métabolique de l'aliment. Intégrer la température en temps réel avec un pas de temps journalier dans le modèle nutritionnel semble pertinent, surtout dans le cas d'élevages intégrant un accès au plein air ou situés dans des

régions fortement impactées par le changement climatique (été chauds, vagues de chaleur). Les autres données d'ambiance collectées comme l'indicateur de confort thermique combinant les données de température et d'humidité, la teneur en ammoniac ou en méthane ne sont pas utilisées dans l'estimation du besoin. Elles pourraient avoir un effet sur l'activité des truies et leur santé, influant indirectement le besoin énergétique (Gaillard et al., 2021).

9.2.3. Fenêtre temporelle de l'estimation du besoin

Le modèle utilisé au cours de cette thèse a été développé pour représenter l'évolution des compartiments de la truie gestante entre un état initial décrit par différents phénotypes mesurés et un état final correspondant à des objectifs à atteindre. Ainsi, il permet d'estimer *a priori* les apports de nutriments à réaliser sur l'ensemble de la gestation ou *a posteriori* d'estimer les besoins sur la base des mesures réalisées à la mise-bas. De fait, le modèle n'a pas été pensé pour interagir avec les capteurs présents sur la ferme et pour recalculer automatiquement à l'échelle de la journée ou de la semaine les besoins.

Pour intégrer les données d'activité physique en temps réel, il est nécessaire de développer un système qui collecte et traite journalièrement les données avant de les incorporer dans le modèle qui fonctionnera avec un pas de temps journalier. Cette procédure est déjà appliquée dans le cadre de l'alimentation sur mesure de porcs charcutiers qui s'appuie sur une prédiction des performances journalières à partir de celles observées les jours précédents, afin d'ajuster chaque jour le ratio lysine digestible et énergie nette de l'aliment distribué (Brossard et al., 2020). Dans le cas des truies gestantes, il serait intéressant d'évaluer périodiquement l'évolution de leurs caractéristiques corporelles en réponse aux apports nutritionnels afin d'estimer l'écart entre la prédiction et l'observation. La question de l'échelle de temps et de la fréquence d'ajustement se pose. Faire évoluer les apports au niveau horaire pour la truie gestante ne semble pas adéquat car les truies consomment principalement leur ration en une seule visite alimentaire et l'heure d'alimentation dépend de la hiérarchie au sein du groupe et de l'heure d'accès de la ration au sein de l'automate. Évaluer un ajustement des apports à l'échelle hebdomadaire semble un bon compromis pour la truie gestante pour permettre un suivi de la tendance générale et limiter la variabilité qui peut en partie être due aux capteurs effectuant la mesure, et non de l'animal lui-même.

9.2.4. Vers un modèle hybride stochastique ?

Le modèle nutritionnel utilisé est un modèle individu-centré et déterministe c'est-à-dire que pour des données d'entrée similaires le modèle produit toujours les mêmes sorties. Par exemple, le potentiel de rétention protéique total est identique pour l'ensemble des truies d'un rang et taille de portée donnés pour un apport énergétique donné (Dourmad et al., 1998). Dans

le futur, de la variabilité pourra être intégrée au modèle (stochastique) pour représenter des truies aux phénotypes semblables mais avec des potentiels génétiques différents. S'il est possible de s'approcher du potentiel génétique de chaque individu (*via* par exemple la transmission de la valeur génétique estimée de l'individu au sein de la lignée pour un caractère proche du potentiel de rétention protéique), les stratégies d'alimentation pourront intégrer cette information pour la prise de décision (Noblet et al., 2016).

Par la remontée en continu du suivi des phénotypes de composition corporelle (poids, épaisseur de lard dorsal) des animaux, il serait possible d'évaluer l'écart au début de la gestation entre la rétention protéique prédite et celle observée avec l'apport alimentaire considéré, pour ensuite réajuster ce potentiel au niveau individuel. Dans le modèle, les paramètres des équations de prédiction sont constants et ont été établis à partir d'expérimentation *in vivo* à partir de mesures directes ou par régression. Fixer ces paramètres simplifie les dynamiques biologiques représentées dans le modèle comme par exemple les dépôts selon un rendement constant. Remus et al. (2025) ont récemment intégré de la variabilité dans les réponses à l'utilisation des nutriments par l'établissement d'une équation individuelle de l'efficacité d'utilisation de la lysine pour les porcs en croissance. À terme, il faudra représenter cette variabilité dans les données d'entrée et dans les réponses individuelles des truies pour mieux représenter les phénomènes biologiques. Ce modèle serait hybride dans sa capacité à utiliser des données en temps réel pour affiner l'estimation tout en gardant une base utilisant les historiques de performances tel qu'il est utilisé actuellement.

9.2.5. L'intégration du numérique et de l'intelligence artificielle (IA) au sein des élevages

Le numérique s'est peu à peu imposé au sein des élevages porcins facilitant la collecte de données et libérant du temps à l'éleveur pour qu'il puisse réaliser d'autres tâches. L'avènement de l'IA peut être un atout pour collecter automatiquement et rapidement les phénotypes individuels et augmenter l'efficacité et la productivité des solutions numériques. Une innovation primée au salon des productions animales - carrefour européen (Space) 2025 à Rennes permet d'estimer l'épaisseur de lard dorsal des truies *via* l'analyse d'images par IA (Asserva, 2025) à partir du robot ScanPig. Les algorithmes d'apprentissage automatique entraînés permettent d'atteindre une précision de l'ordre de 1 mm (Peng et al., 2025). Couplé au suivi du poids en temps réel, il permettrait de multiplier la fréquence de mesure des phénotypes et ainsi pouvoir réajuster, selon la fenêtre temporelle souhaitée dans le modèle, l'apport alimentaire nécessaire pour atteindre les objectifs fixés à la mise-bas.

L'utilisation de l'IA dans le cadre du traitement rapide et automatique des données en temps réel peut également servir au pilotage de la santé et du bien-être des truies. Par la détection

précoce d'une modification de comportement, il est possible pour l'éleveur d'agir avant que la situation ne s'aggrave. La difficulté majeure réside dans la définition d'un comportement de référence, individuel ou en moyenne à l'échelle de la population, pour détecter ces variations (Durand et al., 2021) et ensuite associer celles-ci à un évènement (e.g. maladie, problème technique ; Hamelin et al., 2023).

L'IA à travers les réseaux de neurones peut également servir à améliorer la précision des mesures comme pour l'aide au diagnostic de gestation de la truie 3 semaines après insémination à partir des images échographiques (Kim et al., 2025). Il faut cependant connaître les limites des algorithmes utilisés, notamment dans le cas où ces algorithmes ont été entraînés sur des données qui ne sont plus forcément représentatives de la situation actuelle. Gauthier (2021) a vu l'erreur moyenne de son algorithme de prédiction du poids de portée au sevrage multipliée par trois en l'espace de 2 mois. Cet exemple illustre la nécessité d'un contrôle régulier des performances de ces algorithmes automatiques et d'effectuer une nouvelle phase d'entraînement avec des données supplémentaires lorsque le seuil d'erreur défini par l'utilisateur est dépassé. Les démarches de science ouverte et de partage de données telles qu'effectuées durant cette thèse permettent la création de bases de données conséquentes et de bonnes qualités incluant des informations environnementales et des conduites techniques diverses qui améliorent la généralisation de ces modèles (Rosati, 2024).

9.2.6. Création d'un outil support de nutrition

L'ensemble des éléments décrits précédemment pourrait être regroupés dans un outil d'aide à la décision pour l'alimentation sur mesure de la truie lors de sa carrière productive au sein de l'élevage (Figure 9.2). L'outil devra être assez souple pour fonctionner même en cas de problèmes de qualité des données qu'elles soient manquantes ou aberrantes. Tous les scénarios possibles de gestion des données devront être transcrits au niveau informatique pour que le modèle puisse continuer à estimer les besoins nutritionnels mais avec un avertissement sur la qualité potentiellement détériorée des résultats obtenus. Pour une facilité de mise en œuvre, l'outil devra permettre une automatisation importante des tâches notamment de collecte et traitement des données. Pour le contrôle d'un algorithme d'IA, si la mesure de l'erreur dépasse le seuil fixé lors du contrôle, l'outil d'aide à la décision devra automatiquement ré-entraîner cet algorithme à partir de l'incorporation de nouvelles données récentes à la base de données d'entraînement. L'interaction automatique entre consigne d'alimentation obtenue via le modèle nutritionnel et pilotage de la ration grâce aux automates d'alimentation devra être réalisée. Un rapport devra être fourni pour que l'éleveur puisse effectuer ses vérifications et dans tous les cas, avoir la possibilité de modifier manuellement la qualité du mélange

d'aliments à distribuer journalièrement et individuellement en fonction de son objectif de production et de la conduite technique qu'il souhaite.

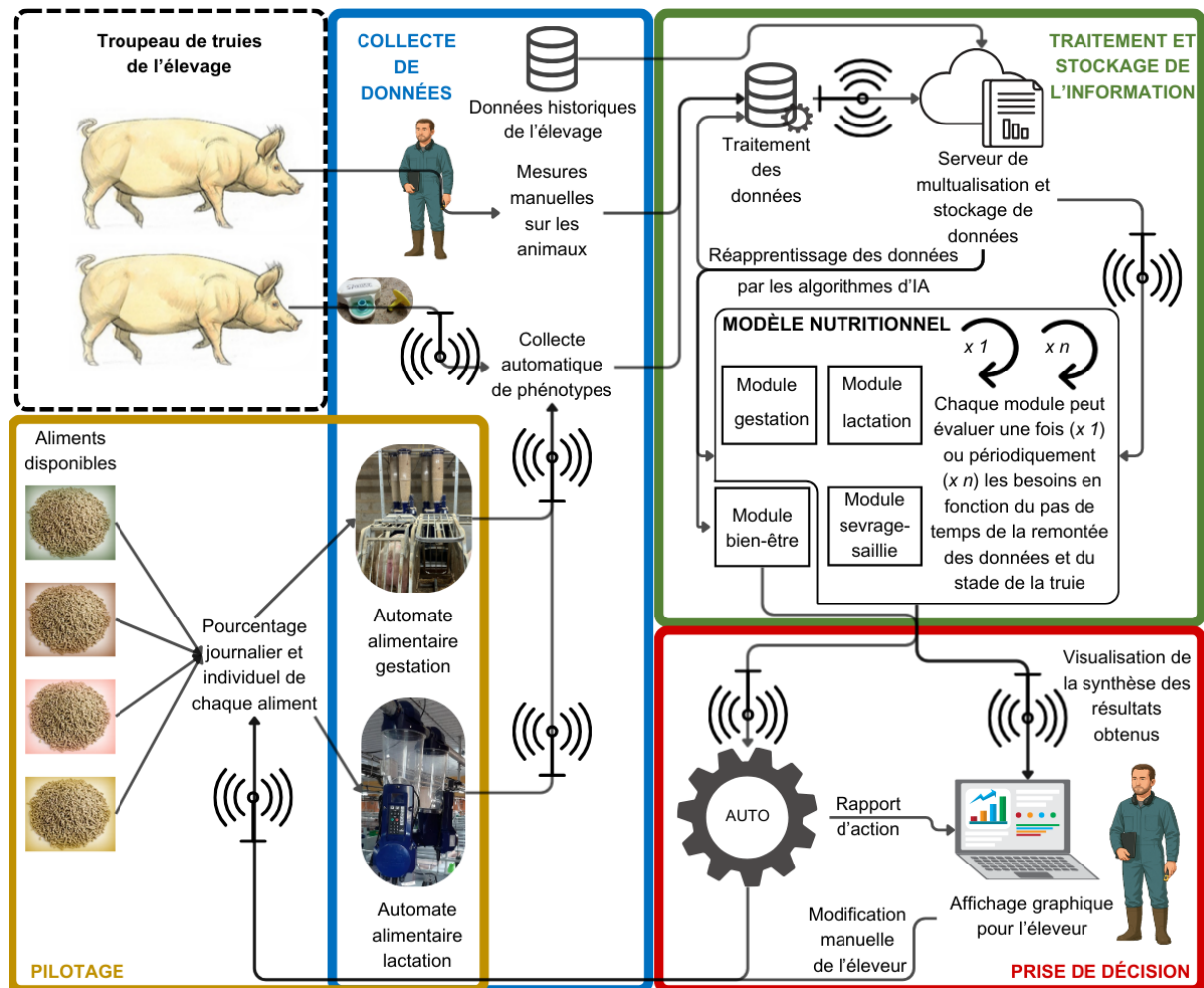


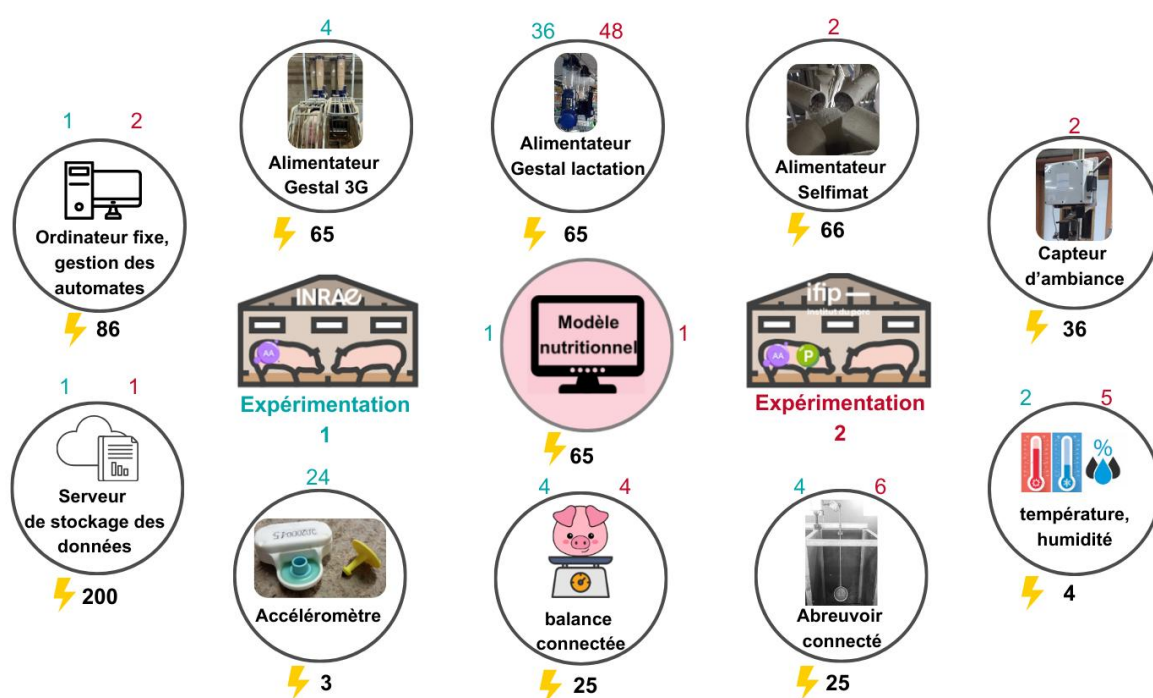
Figure 9.2 : Schéma de l'outil d'aide à la décision pour l'alimentation des truies

Ce nouvel outil pourra intégrer un module de bien-être (Durand, 2023) pour avertir l'éleveur de modifications au sein de son troupeau qui pourraient affecter l'alimentation (à travers une hausse d'activité ou une augmentation des agressions). Également, un module sevrage-saillie permettra de mieux valoriser cette période du cycle reproductif de la truie qui n'est actuellement pas pris en compte.

9.2.7. Empreinte environnementale de stratégies d'alimentation sur mesure

Au cours de ce projet de thèse, nous avons utilisé une quantité importante de capteurs (Figure 9.3). En nous appuyant sur la consommation électrique de chaque capteur et leur durée d'utilisation, nous obtenons une consommation totale sur les deux expérimentations de 9 320 kWh soit l'équivalent de la consommation annuelle de quatre personnes. Elle équivaut dans notre cas à 38 kWh par cycle reproductif pour une truie. L'empreinte environnementale de 1

kWh d'électricité issue du parc nucléaire français correspond à 3,7 g d'équivalent CO₂ pour l'impact carbone et à 3 mL d'utilisation d'eau domestique (EDF R&D, 2022). Par comparaison, chaque page textuelle produite par l'IA dans l'usage quotidien de la société émet 1,14 g d'équivalent CO₂ et utilise 45 mL d'eau (Mistral AI, 2025). L'évaluation par analyse de cycle de vie d'un modèle de langage d'IA a 85,5 % de ses émissions de gaz à effet de serre et 91 % de sa consommation d'eau qui sont imputables à l'entraînement du modèle et à son utilisation par les clients. Nos deux expérimentations sont équivalentes à environ 30 000 requêtes textuelles au niveau de l'impact carbone et à 620 requêtes textuelles au niveau de l'utilisation de l'eau soit bien peu vis-à-vis du milliard de requêtes effectuées chaque jour à ChatGPT dans le monde. L'empreinte environnementale des capteurs a été évaluée uniquement à l'échelle de l'utilisateur final mais pour avoir une analyse plus globale, il faudrait prendre en compte l'échelle de l'extraction des matières premières, la fabrication, le transport et le recyclage de l'ensemble des capteurs utilisés ainsi que sur des externalités supplémentaires qu'uniquement celles de l'impact carbone et l'utilisation d'eau.



Légende:

- X Nombre de capteurs utilisé dans l'expérimentation 1
- ⚡ Consommation électrique d'un capteur, en Wh
- X Nombre de capteurs utilisé dans l'expérimentation 2

Figure 9.3 : Dénombrement des capteurs utilisés au cours des expérimentations et évaluation de la consommation électrique associée par capteur

Pour conclure sur ce point, l'intégration de nouveaux capteurs en élevage doit être réalisée avec parcimonie, pour un besoin spécifique permettant d'obtenir une donnée clé utile au modèle et à l'éleveur. Plus les modèles utilisés sont « profonds », plus leur consommation énergétique (associée à un temps d'entraînement plus long) augmente. Les performances accrues des animaux ne compensent pas toujours la hausse de l'empreinte environnementale associée à ces modèles plus complexes (La Rocca et al., 2024). Dans le futur, le nombre de capteurs placés sur l'animal est à minimiser. On pourrait penser à un capteur unique placé sur l'animal permettant l'identification individuelle réglementaire mais permettant également l'interaction avec l'ensemble des automates présents au sein de l'élevage (à l'aide d'une puce RFID généraliste) dans un intérêt de bien-être animal et d'interopérabilité des systèmes.

9.3. Un élevage porcin efficient, pierre angulaire pour la circularité des agrosystèmes

9.3.1. Le porc, un recycleur dans les systèmes alimentaires.

Caractérisation des ressources disponibles. L'idée ici n'est plus de se focaliser sur le système intra-élevage mais de se déplacer à une échelle plus large pour intégrer les élevages porcins dans les systèmes alimentaires. En 2022 en France, 43 % des 9,4 millions de tonnes de déchets alimentaires sont des déchets comestibles (Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2024). Avec les co-produits de l'industrie et les résidus de cultures, ils représentent une part non-négligeable de ressources alimentaires qui pourraient être mieux valorisées. Pour avoir une comparaison au niveau des volumes évoqués, on peut noter qu'en 2022, 4,5 millions de tonnes d'aliments ont été produites pour la filière porcine française (IFIP, 2024). L'aliment pour porc est composé principalement de céréales (50 à 70 % de la ration : maïs, blé, orge) pour leur contribution au contenu énergétique de la ration. Une partie de ces céréales auraient pu être utilisées directement pour la nutrition humaine. Également, les surfaces allouées pour ces cultures auraient pu servir à la production d'autres cultures (e.g. les légumineuses). Pour réduire la compétition sur les céréales entre nutrition humaine et nutrition animale, celles-ci pourraient être remplacées en partie par les déchets consommables, les co-produits et les résidus de culture. Le terme déchet consommable correspond ici à l'ensemble des denrées retirées de la consommation humaine pour d'autres raisons que sanitaires et n'ayant pas eu de contacts avec des produits animaux tels que les biscuits et le pain non servi en restauration (Pinotti et al., 2021). Le porc est un excellent convertisseur pour recycler ces ressources en protéines animales pour la nutrition humaine (Pinotti et al., 2023). Bikker et Jansman (2023) ont proposé des formules alimentaires pour porc en croissance permettant de remplacer l'intégralité des céréales par des déchets consommables et des co-produits de l'industrie. Dans la même idée, nous avons formulé un

aliment à partir de déchets consommables et co-produits de l'industrie pour correspondre aux teneurs voulues de l'aliment pauvre en acides aminés de l'expérimentation 2 en énergie, lysine digestible iléale standardisée et P digestible (Tableau 9.2). L'aliment formulé à partir de déchets consommables et de co-produits a un prix réduit de 5 € par tonne par rapport à l'aliment formulé à partir de céréales dans le contexte de prix de mars 2025. Cet aliment a cependant des teneurs plus élevées en protéines brutes, matières grasses, fibres et P total et une teneur plus faible en amidon. Les truies ont un avantage pour utiliser ces ressources supplémentaires car elles peuvent mieux digérer les fibres que les porcs charcutiers (Noblet et Le Goff, 2001). L'utilisation de plusieurs espèces animales en complémentarité permettra de valoriser au mieux l'ensemble de ces ressources disponibles.

Limites et défis à surmonter. En France, l'incorporation de déchets de cuisine et de table est interdite dans l'alimentation des animaux de rente à cause des risques sanitaires potentiels de ces ressources (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2018). Dans les pays asiatiques tel que le Japon, ces déchets sont autorisés et priorisés pour l'alimentation des monogastriques après traitement thermique (*i.e.* 30 min à 70°C ou 3 min à 80°C) et contrôle sanitaire (Sugiura et al., 2009). Il faudra un changement réglementaire au sein de l'Union Européenne pour autoriser ces déchets et envisager d'atteindre les 42 % de déchets alimentaires recyclés en alimentation animale comme observé en Corée du Sud (zu Ermgassen et al., 2016). Une limite majeure supplémentaire à l'utilisation des déchets consommables et co-produits est la méconnaissance des caractéristiques nutritionnelles de ces matières premières ainsi que la variabilité nutritionnelle observée pour une même ressource (de Quelen et al., 2024). Pour suivre cette variabilité nutritionnelle, il faudra être capable de pouvoir estimer leur composition de manière fréquente, rapide et à faible coût. L'utilisation des appareils à proche infra-rouge présentent des résultats prometteurs pour évaluer rapidement les contenus nutritionnels des aliments après calibration (Paternostre et al., 2021). Il faudra favoriser des appareils portatifs pour un usage en ferme et proposer des méthodes pour collecter automatiquement les valeurs nutritionnelles des déchets consommables. D'autres problèmes d'ordre logistique vont également se poser. La localisation des fermes n'est pas forcément proche des zones où ces ressources sont disponibles. Les modalités de transport et de stockage restent à définir. Il est primordial d'évoquer la concurrence pour ces ressources vis-à-vis d'autres usages telle que la production d'énergie *via* des méthaniseurs. Un équilibre devra être trouvé pour répondre au mieux aux besoins alimentaires et énergétiques.

Tableau 9.2 – Composition de l'aliment pauvre en lysine digestible et à teneur standard en P digestible formulé sur le principe du moindre coût¹ à partir des matières premières communes utilisées lors de l'expérimentation 2 (Témoin) ou à partir de déchets consommables et co-produits (Co-pro).

Aliment	Témoin	Co-pro
Ingredients, g/kg		
Orge	268	0
Blé	180	0
Maïs	180	0
Son de blé	110	0
Remoulage de blé dur	0	170
Pain (déchet consommable)	0	175
Biscuit (déchet consommable)	0	175
Farine de gluten de blé	0	100
Drêches de distillerie de maïs	0	63
Corn gluten feed	0	77
Pulpe de betteraves	100	100
Tourteau de colza	50	21
Tourteau de tournesol	37	0
Tourteau de soja 48	10	0
Coque de soja	0	50
Mélasse de betterave	20	20
Huile de soja	5	22
Carbonate de calcium	13,7	13,8
Phosphate monocalcique	3,7	0
Sel	4	4
Bicarbonate de sodium	5,1	5,1
Prémix	4	4
Phytase	0,5	0,1
Composition chimique, g/kg		
Matière sèche	875	889
Protéines brutes	112	134
Cendres	60	77
Matières grasses brutes	27	62
Cellulose brute	68	71
NDF	220	250
ADF	84	102
ADL	21	22
Amidon	403	269
Lysine	4,5	4,9
Lysine digestible iléale standardisée	3,3	3,3
Ca total	9,6	9,6
P total	4,9	5,2
P digestible	2,6	2,6
Ca total / P digestible	3,7	3,7
Bilan électrolytique, mEq/kg	220	300
Énergie nette, MJ/kg	9,0	9,0
Prix, €/T	226	221

¹ Formulation effectuée avec le logiciel Porfal de l'IFIP avec les gammes de prix disponibles des matières premières pour mars 2025. Le prix du pain et des biscuits, non disponible, a été fixé à 150 € par tonne. Les aliments respectent la réglementation française d'incorporation maximale pour truies gestantes de 140 g de protéines et 5,2 g de P total par kg d'aliment.

Un changement dans la caractérisation de la performance ? L'utilisation des ressources non consommées ou consommables par l'Homme pour alimenter les porcs favoriserait l'efficacité globale de nos systèmes agro-alimentaires (Pomar et al., 2021). Cependant d'un point de vue intra-système porcin, les variables usuellement utilisées tels que l'indice de consommation ou l'efficacité en nutriment seraient dégradées par l'incorporation plus importante de ces ressources envisageables pour l'alimentation des porcs. En effet, ces ressources sont moins riches en amidon et plus riches en fibres ce qui décroît la digestibilité de l'aliment et décroît sa teneur énergétique tout comme la digestibilité des acides aminés (Bikker et Jansman, 2023) et augmente la production de méthane par les animaux (Sattarova et al., 2024). Un nouvel indicateur de performance que je nomme ici « indice de consommation global » devra être développé pour rendre compte à l'échelle du système agro-alimentaire, de la valorisation des cultures. Cet indice pourrait s'appuyer sur la quantité de nutriments disponibles pour la nutrition humaine à partir d'une surface fixe agricole. L'indicateur d'efficacité « nette » de conversion de l'énergie et des protéines développé par Laisse et al. (2018a) pourrait être une base pour développer cet indice. Il sert à quantifier l'efficacité de conversion des matières premières utilisées en alimentation animale pour l'alimentation humaine. Une efficacité supérieure à 1 indique qu'une part plus importante de nutriments est valorisable par l'Homme après consommation des produits animaux qu'avec une consommation directe de ces mêmes matières premières. La hausse d'utilisation de co-produits augmente l'efficacité nette protéique des élevages monogastriques mais l'efficacité nette énergétique reste sensiblement inférieure à 1 (Laisse et al., 2018b).

9.3.2. Potentiel de l'alimentation sur mesure pour les systèmes alimentaires

L'alimentation sur mesure peut être utilisée pour améliorer l'efficacité globale des systèmes alimentaires par une meilleure adéquation entre apport et besoin selon le stade physiologique. En complément de l'outil d'aide à la nutrition développé pour les truies (Figure 9.2), un module additionnel nommé « allocation des ressources » aurait pour objectif d'ajuster au mieux les ressources disponibles selon les besoins individuels des truies en utilisant une approche de formulation multi-objectifs (Figure 9.4). La formulation multi-objectif permet de prendre en compte la composante du coût et la composante environnementale des matières premières incorporées dans l'aliment (Garcia-Launay et al., 2017) disponibles dans la base de données ECOALIM (Wilfart et al., 2016). Cette formulation pourrait intégrer l'indice de consommation global pour maximiser la quantité de nutriments produits pour la nutrition humaine en intégrant le volet environnemental.

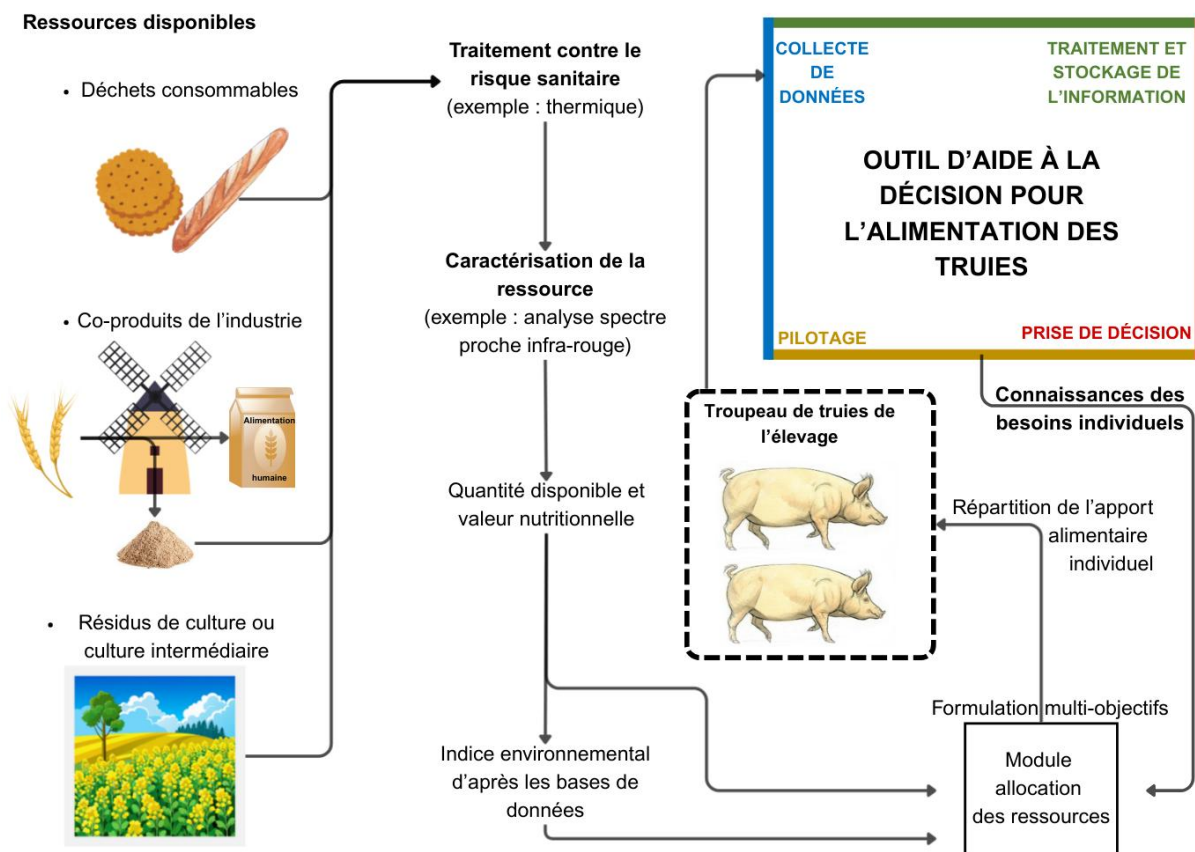


Figure 9.4 : Schéma de l'utilisation de l'outil d'aide à la décision pour l'alimentation des truies dans un agro-système *via* la prise en compte des ressources disponibles et d'un module d'allocation des ressources

9.4. Références bibliographiques

- Abarnou, J., Durand, M., Dourmad, J. Y., Gaillard, C., 2023. Effects of thermal conditions on gestating sows' behaviors and energy requirements. *Journal of Animal Science* 101, skac413. <https://doi.org/10.1093/jas/skac413>
- Asserva, 2025. ScanPig. Lauréat Innov'Space 1 étoile, 2025. Consulté le 12/08/2025 à <https://www.space.fr/fr/laureats-innovspace/scanpig>
- Bergsma, R., Lei, H., Yang, C., Knol, E.F., 2024. Sow weight development: a pragmatic approach to crossbred and selection populations. *Journal of Animal Science* 102, 45–46. <https://doi.org/10.1093/jas/skae234.050>
- Bikker, P., Blok, M.C., 2017. Phosphorus and calcium requirements of growing pigs and sows, CVB documentation report 59, 72 p. Wageningen Livestock Research, Wageningen, The Netherlands. <https://doi.org/10.18174/424780>
- Bikker, P., Jansman, A.J.M., 2023. Review: composition and utilisation of feed by monogastric animals in the context of circular food production systems. *Animal* 17, 100892. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100892>
- Brossard, L., Marcon, M., Dourmad, J. Y., van Milgen, J.J., Pomar, J., Lopez, V., Quiniou, N., 2020. Application d'un programme d'alimentation de précision chez le porc en croissance alimenté à volonté : effet sur les performances et l'utilisation des nutriments. *Journées Recherche Porcine* 52, 111–112.
- Cloutier, L., Dourmad, J. Y., Pomar, C., Morin-Doré, L., Gagnon, P., 2019. Effet d'une alimentation de précision sur les performances, la productivité et le coût d'alimentation pendant la gestation dans un contexte commercial de gestion des truies en groupe. *Journées Recherche Porcine* 51, 129–134.
- Crenshaw, T.D., 2001. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. A. J. Lewis and L. L. Southern (Eds), *Swine Nutrition*, 187-212. Crc press, Boca Raton, Florida, USA.
- Crenshaw, T.D., Johanson, J.C., 1995. Nutritional strategies for waste reduction management: Minerals. JB Longenecker and JW Spears (Eds), *New Horizons in Animal Nutrition and Health*, 69-78. The Institute of Nutrition of the University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina, USA.
- de Quelen, F., Garcia-Launay, F., Wilfart, A., Dourmad, J. Y., Labussière, E., 2024. Eco-friendly diet: nutrient digestibility, nitrogen and energy balances and growth performance of growing pigs. *Journal of Animal Science* 102, skae203. <https://doi.org/10.1093/jas/skae203>
- Dourmad, J. Y., Etienne, M., Noblet, J., Dubois, S., Boudon, A., 2021. Contenu corporel en minéraux des truies reproductrices. *Journées Recherche Porcine* 53, 203–204.
- Dourmad, J.Y., Etienne, M., Prunier, A., Noblet, J., 1994. The effect of energy and protein intake of sows on their longevity: a review. *Livestock Production Science* 40, 87–97. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0301-6226(94)90039-6)
- Dourmad, J. Y., Levasseur, P., Daumer, M.-L., Hassouna, M., Landrain, B., Lemaire, N., Loussouarn, A., Salaün, Y., Espagnol, S., 2016. Évaluation des rejets d'azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc des porcs Influence de l'alimentation, du mode de logement et de la gestion des effluents. *RMT Elevages et environnement*, 32 p.
- Dourmad, J. Y., Noblet, J., Pere, M.-C., Etienne, M., 1998. Mating, pregnancy and pre-natal growth, I. Kyriazakis (Eds), *A Quantitative Biology of the Pig*, 129-154. CABI Publishing, Wallingford, Oxfordshire, UK.
- Durand, M., 2023. Alimentation sur mesure et estimation du bien-être des truies gestantes à partir de données hétérogènes. Thèse de doctorat. Agrocampus Ouest, Rennes, France, 245 p.
- Durand, M., Dourmad, J. Y., Largouët, C., Tallet, C., Gaillard, C., 2021. Alimentation de précision des truies gestantes : prise en compte de la santé, du comportement et de l'environnement. *INRAE Productions Animales* 34, 293–304. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.4.5369>
- EDF R&D, 2022. ACV du kWh nucléaire EDF – version 2022. EDF R & D, Moret-sur-Loing, France, 88 p.
- Gaillard, C., Dourmad, J. Y., 2022. Application of a precision feeding strategy for gestating sows. *Animal Feed Science and Technology* 287, 115280. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115280>
- Gaillard, C., Durand, M., Largouët, C., Dourmad, J. Y., Tallet, C., 2021. 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. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115034>

- Gaillard, C., Quiniou, N., Gauthier, R., Cloutier, L., Dourmad, J. Y., 2020. Evaluation of a decision support system for precision feeding of gestating sows. *Journal of Animal Science* 98, skaa255. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa255>
- Garcia-Launay, F., Wilfart, A., Dusart, L., Nzally, C., Gaudre, D., Laisse-Redoux, S., Espagnol, S., 2017. Une formulation multiobjectif pour réduire les impacts environnementaux des aliments pour porcs charcutiers. *Journées Recherche Porcine* 49, 239–244.
- Gauthier, R., 2021. Système d'alimentation de précision des truies en lactation par modélisation et machine learning. Thèse de doctorat. Agrocampus Ouest, Rennes, France, 257 p.
- Gauthier, R., Largouët, C., Bussièrès, D., Martineau, J.-P., Dourmad, J. Y., 2022. Precision feeding of lactating sows: implementation and evaluation of a decision support system in farm conditions. *Journal of Animal Science* 100, skac222. <https://doi.org/10.1093/jas/skac222>
- Gauthier, R., Largouët, C., Rozé, L., Dourmad, J. Y., 2021. Online forecasting of daily feed intake in lactating sows supported by offline time-series clustering, for precision livestock farming. *Computers and Electronics in Agriculture* 188, 106329. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106329>
- Geuyen, T.P.A., Verhagen, J.M.F., Verstegen, M.W.A., 1984. Effect of housing and temperature on metabolic rate of pregnant sows. *Animal Science* 38, 477–485. <https://doi.org/10.1017/S0003356100041684>
- Hamelin, G., Rohmer, T., Gaillard, C., 2023. Amélioration d'un outil de détection d'évènements techniques ou sanitaires à l'échelle de plusieurs bandes de truies. *Journées Recherche Porcine* 55, 79–80.
- Heurtault, J., Hiscocks, S., Létourneau-Montminy, M.P., Schlegel, P., 2024a. Dynamics of bone mineralization in primiparous sows as a function of dietary phosphorus and calcium during lactation. *Animal* 18, 101130. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101130>
- Heurtault, J., Maïkoff, G., Létourneau-Montminy, M.P., Schlegel, P., 2024b. Method: body composition assessment of sows using dual-energy X-ray absorptiometry. *Animal - Open Space* 3, 100079. <https://doi.org/10.1016/j.anopes.2024.100079>
- Heurtault, J., Schlegel, P., Létourneau-Montminy, M.P., 2023. Prédiction de la composition minérale corporelle des cochettes entre la saillie et la mise-bas : évaluation de différents modèles. *Journées Recherche Porcine* 55, 239–240.
- IFIP, 2024. Le porc par les chiffres : la filière porcine en France, dans l'UE et le monde. IFIP, Paris, France, 35 p.
- Kim, T., Choi, Y.-H., Hong, J.-S., Park, H.-J., Kim, Y.-M., Kim, J.-E., Lee, J.-H., Sa, S.-J., Jeong, Y.-D., Kim, J.-S., Cho, H., 2025. Deep learning-enhanced diagnosis of sow pregnancy through low-frequency ultrasound imaging. *Animals* 15, 318. <https://doi.org/10.3390/ani15030318>
- La Rocca, P., Guennebaud, G., Bugeau, A., Ligozat, A.-L., 2024. Estimating the carbon footprint of digital agriculture deployment: a parametric bottom-up modeling approach. *Journal of Industrial Ecology* 28, 1801–1815. <https://doi.org/10.1111/jiec.13568>
- Laisse, S., Baumont, R., Dusart, L., Gaudré, D., Rouillé, B., Benoit, M., Veysset, P., Rémond, D., Peyraud, J.-L., 2018a. L'efficacité 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 Productions Animales* 31, 269–288. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.3.2355>
- Laisse, S., Gaudré, D., Salaün, Y., Dourmad, J. Y., 2018b. Évaluation de la contribution nette des élevages de porcs en France à la production alimentaire de protéines pour l'Homme. *Journées Recherche Porcine* 50, 37–42.
- Lautrou, M., Pomar, C., Dourmad, J. Y., Narcy, A., Schmidely, P., Létourneau-Montminy, M.P., 2020. Phosphorus and calcium requirements for bone mineralisation of growing pigs predicted by mechanistic modelling. *Animal* 14, s313–s322. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001627>
- Létourneau-Montminy, M.P., Lovatto, P.A., Pomar, C., 2014. Apparent total tract digestibility of dietary calcium and phosphorus and their efficiency in bone mineral retention are affected by body mineral status in growing pigs. *Journal of Animal Science* 92, 3914–3924. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7320>
- Létourneau-Montminy, M.P., Narcy, A., Dourmad, J.Y., Crenshaw, T.D., Pomar, C., 2015. Modeling the metabolic fate of dietary phosphorus and calcium and the dynamics of body ash content in growing pigs. *Journal of Animal Science* 93, 1200–1217. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8519>

- Ministère de la transition écologique, de l'énergie, du climat et de la prévention des risques, 2024. IED 2.0. Consulté le 07/08/2025 à https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/MDGPR_R%C3%A9vision%20directive%20IED_19Nov2024_1.pdf
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, 2024. Infographie - Le gaspillage alimentaire. Consulté le 04/08/2025 à <https://agriculture.gouv.fr/infographie-le-gaspillage-alimentaire>
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2018. Guide de classification des sous-produits animaux et de leurs devenir, Direction générale de l'Alimentation, Paris, France, 117 p.
- Mistral AI, 2025. Notre contribution pour la création d'un standard environnemental mondial pour l'IA. Consulté le 22/07/2025 à <https://mistral.ai/fr/news/our-contribution-to-a-global-environmental-standard-for-ai>
- Muro, B.B., Carnevale, R.F., Leal, D.F., Almond, G.W., Monteiro, M.S., Poor, A.P., Schinckel, A.P., Garbossa, C.A., 2023. The importance of optimal body condition to maximise reproductive health and perinatal outcomes in pigs. *Nutrition Research Reviews* 36, 351–371. <https://doi.org/10.1017/S0954422422000129>
- Noblet, J., Dourmad, J.Y., Etienne, M., Le Dividich, J., 1997. Energy metabolism in pregnant sows and newborn pigs. *Journal of Animal Science* 75, 2708–2714. <https://doi.org/10.2527/1997.75102708x>
- Noblet, J., Dourmad, J. Y., Milgen, J., 2016. Etat des lieux et perspectives sur la nutrition du porc. *Journées Recherche Porcine* 48, 85–96.
- Noblet, J., Le Goff, G., 2001. Effect of dietary fibre on the energy value of feeds for pigs. *Animal Feed Science and Technology* 90, 35-52. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00195-X)
- Paternostre, L., Baeten, V., Ampe, B., Millet, S., De Boever, J., 2021. The usefulness of NIRS calibrations based on feed and feces spectra to predict nutrient content, digestibility and net energy of pig feeds. *Animal Feed Science and Technology* 281, 115091. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115091>
- Peng, X., Song, Y., Zhou, Y., Wei, H., Jiang, S., Wei, F., Li, X., Peng, J., 2025. Analysis and prediction of backfat thickness in gestating sows using machine learning algorithms. *Smart Agricultural Technology* 11, 100875. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100875>
- Peters, J.C., Mahan, D.C., Wiseman, T.G., Fastinger, N.D., 2010. Effect of dietary organic and inorganic micromineral source and level on sow body, liver, colostrum, mature milk, and progeny mineral compositions over six parities. *Journal of Animal Science* 88, 626–637. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-1782>
- Petersen, J.S., Oksbjerg, N., Jørgensen, B., Sørensen, M.T., 1998. Growth performance, carcass composition and leg weakness in pigs exposed to different levels of physical activity. *Animal Science* 66, 725–732. <https://doi.org/10.1017/S1357729800009309>
- Pinotti, L., Ferrari, L., Fumagalli, F., Luciano, A., Manoni, M., Mazzoleni, S., Govoni, C., Rulli, M.C., Lin, P., Bee, G., Tretola, M., 2023. Review: Pig-based bioconversion: the use of former food products to keep nutrients in the food chain. *Animal* 17, 100918. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100918>
- Pinotti, L., Luciano, A., Ottoboni, M., Manoni, M., Ferrari, L., Marchis, D., Tretola, M., 2021. Recycling food leftovers in feed as opportunity to increase the sustainability of livestock production. *Journal of Cleaner Production* 294, 126290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126290>
- Pomar, C., Andretta, I., Remus, A., 2021. Feeding strategies to reduce nutrient losses and improve the sustainability of growing pigs. *Frontiers in Veterinary Science* 8, 742220. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.742220>
- Quiniou, N., 2019. Modélisation de l'évolution moyenne du poids vif après la mise bas selon l'âge chez des truies croisées Large White x Landrace. *Journées Recherche Porcine* 51, 123–128.
- Quiniou, N., Boudon, A., Dourmad, J. Y., Moinecourt, M., Priymenko, N., Narcy, A., 2021. Modélisation du besoin en calcium de la truie reproductrice et variation du rapport phosphocalcique des aliments selon le niveau de performance. *INRAE Productions Animales* 34, 61–78. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.1.4723>
- Remus, A., Hauschild, L., Létourneau-Montminy, M.-P., Andretta, I., Cloutier, L., Pomar, C., 2025. From static to dynamic: advancements in the individual precision feeding (IPF) model for growing pigs. *Animal - Science proceedings* 16, 450. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2025.07.278>
- Remus, A., Hauschild, L., Pomar, C., 2020. Simulated amino acid requirements of growing pigs differ between current factorial methods. *Animal* 14, 725–730. <https://doi.org/10.1017/S1751731119002660>

- RMT Élevage et Environnement, 2019. Guide des bonnes pratiques environnementales d'élevage. Fiche Alimentation multiphase. 5p.
- Rosati, A., 2024. Guiding principles of AI: application in animal husbandry and other considerations. *Animal Frontiers* 14, 3–10. <https://doi.org/10.1093/af/vfae045>
- Samson, A., Van Meyel, J.-P., Launay, C., 2013. Influence de l'origine et de la granulométrie du carbonate de calcium sur sa valeur alimentaire pour le porc charcutier. *Journées Recherche Porcine* 45, 201–202.
- Sattarova, E., Bach Knudsen, K.E., Theil, P.K., Nørgaard, J.V., Jørgensen, H.J.H., 2024. Influence of fiber on ileal and total tract digestibility of nutrients, the degradation of non-starch polysaccharides, and enteric methane production in growing pigs and gestating sows. *Animal Feed Science and Technology* 316, 116058. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2024.116058>
- Schenck, E.L., McMunn, K.A., Rosenstein, D.S., Stroshine, R.L., Nielsen, B.D., Richert, B.T., Marchant-Forde, J.N., Lay, D.C., Jr., 2008. Exercising stall-housed gestating gilts: effects on lameness, the musculo-skeletal system, production, and behavior. *Journal of Animal Science* 86, 3166–3180. <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1046>
- Stein, H.H., 2024. Review: aspects of digestibility and requirements for minerals and vitamin D by growing pigs and sows. *Animal* 18 (suppl.1), 101125. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101125>
- Stewart, V., Buis, R.Q., Christensen, B., Hansen, L.L., De Lange, C.F.M., Mandell, I.B., Huber, L.-A., 2021. The effects of precisely meeting estimated daily energy and lysine requirements for gestating sows over three consecutive pregnancies on sow reproductive and lactation performance. *Translational Animal Science* 5, txab226. <https://doi.org/10.1093/tas/txab226>
- Sugiura, K., Yamatani, S., Watahara, M., Onodera, T., 2009. Ecofeed, animal feed produced from recycled food waste. *Veterinaria Italiana* 45, 397–404. https://www.izs.it/vet_italiana/2009/45_3/397.htm
- Tokach, M.D., Menegat, M.B., Gourley, K.M., Goodband, R.D., 2019. Review: nutrient requirements of the modern high-producing lactating sow, with an emphasis on amino acid requirements. *Animal* 13, 2967–2977. <https://doi.org/10.1017/S1751731119001253>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.06.005>
- Wilfart, A., Espagnol, S., Dauguet, S., Tailleux, A., Gac, A., Garcia-Launay, F., 2016. ECOALIM: a dataset of environmental impacts of feed ingredients used in french animal production. *PLOS ONE* 11, e0167343. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167343>
- zu Ermgassen, E.K.H.J., Phalan, B., Green, R.E., Balmford, A., 2016. Reducing the land use of EU pork production: where there's swill, there's a way. *Food Policy* 58, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.11.001>

10. Conclusion et perspectives

Cette thèse met en lumière les effets sur le long-terme de diverses stratégies d'alimentation sur mesure à travers deux expérimentations et des simulations avec un modèle nutritionnel. Les références expérimentales obtenues sur le long-terme confortent les résultats obtenus préalablement sur une seule gestation. L'application d'une alimentation sur mesure ajustée sur l'énergie et les acides aminés réduit légèrement le coût alimentaire de l'ordre d'une dizaine d'euros par tonne d'aliments, mais réduit fortement l'ingestion de lysine digestible de 16 % et par conséquent les excrétions d'azote dans l'environnement de l'ordre de 5 %.

Le code du modèle nutritionnel utilisé, écrit en Python, a été restructuré pour faciliter l'incorporation de nouveaux modules et l'intégration de données en temps réel au pas de temps journalier. Les simulations réalisées démontrent que l'intégration des données individuelles d'activité physique obtenues avec des accéléromètres accroît la précision de l'estimation du besoin énergétique de la truie durant la gestation, ce qui n'est pas le cas avec l'intégration du poids obtenu avec des balances connectées.

Trois méthodes d'estimation des besoins phosphocalciques pour la truie, issues de la littérature, ont également été intégrées au modèle nutritionnel. L'une d'entre elles a été appliquée expérimentalement durant le dernier mois de gestation dans le cadre d'une alimentation sur mesure ajustée conjointement pendant toute la gestation en énergie et acides aminés, sur trois cycles consécutifs. Sur la dernière semaine de gestation, la quantité de phosphore apportée aux truies en alimentation sur mesure était ainsi supérieure à celle apportée aux truies dont l'alimentation était uniquement ajustée sur l'énergie et les acides aminés. Les dynamiques osseuses suivies à l'aide d'un biomarqueur urinaire, et les performances productives, n'ont pas été influencées par la stratégie alimentaire. Par simulation, l'ajustement des apports en phosphore sur l'ensemble de la gestation permettrait de réduire encore le coût alimentaire et l'ingestion de phosphore.

Cette thèse ouvre de nouvelles perspectives afin d'affiner l'estimation des besoins des truies. Il faudra pour l'énergie utiliser les données individuelles en temps réel d'activité physique, pour les acides aminés, individualiser l'équation de prédiction du potentiel de dépôt protéique, et pour les minéraux, intégrer le compartiment osseux pour l'estimation du besoin en tenant compte de la mobilisation réalisée pendant la lactation qui précède le démarrage d'une nouvelle gestation. Enfin, le développement d'une interface automatisée entre modèle nutritionnel et automates d'alimentation ainsi que l'interopérabilité des différents capteurs présents sur la ferme sont des prérequis au déploiement de l'alimentation sur mesure dans les élevages commerciaux.

Annexes

Annexe A	Congrès de l'EAAP, 2023.....	223
Annexe B	Congrès de l'EAAP, 2024.....	224
Annexe C	Congrès de l'EAAP, 2025.....	225
Annexe D	Congrès des JRP, 2024 (Article et poster)	226
Annexe E	Congrès des JRP, 2025 (Article, poster et protocole d'analyse)	229

A. Congrès de l'EAAP, 2023

Precision feeding, recent advances for gestating sows and dairy cows

C. Gaillard¹, C. Ribas^{1,2}, M. Durand¹

¹ PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590 Saint-Gilles, France

² IFIP–Institut du Porc, 35740 Pacé, France

charlotte.gaillard@inrae.fr

Precision feeding aims to define the right feeding strategy according to individual's nutrient requirements. Few years ago, an individual feeding strategy for gestating sows based on energy and lysine adjustment of daily supplies has been shown to reduce feed costs and environmental loads. The nutritional requirements were calculated thanks to an updated version of the InraPorc model requiring input data (i.e. sows' characteristics). A third variable to take into account during the adjustment (i.e. phosphorus requirement) is currently being added into the model and simulations are being run. More recently, on one hand the integration of the individual and daily physical activity measurements in the calculation of the energy requirements is becoming possible thanks to the development of a software able to analyse automatically and continuously the sow's postures. On the other hand, machine learning algorithms allows to predict daily nutritional requirements using only data measured by sensors or automatons. For example, energy and lysine requirements can be predicted thanks to physical activity and feeder data, respectively. Combining these data with the sows' characteristics improved the prediction accuracy. This result indicate a possible way to simplify the application of precision feeding on farm. Finally, the long term effect of a precision feeding strategy on the sows' performances is being evaluated in two different experimental farms. Concerning dairy cows, individualized feeding strategies are more complicated to set up and models or criteria to calculate precisely the individual daily requirements are not available. Preliminary experiments are taking place to determine criteria to adjust the energy of each cow's ration, at the scale of the week, by varying the amount of concentrates distributed in the automatic feeder. Furthermore, biomarkers and production variables are being screened to determine if they can be used in early lactation to predict the lactation persistency, and then adapt the feeding strategy and the reproduction timing based on the objective of the farmer and the potential of each cow. Precision feeding is therefore a burning and growing topic for farm animals, with promising results.

B. Congrès de l'EAAP, 2024

Impact of long-term precision feeding based on energy and lysine on the productive, economic and environmental performance of gestating sows

C. Ribas^{1,2}, N. Quiniou², C. Gaillard¹

¹ PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590 Saint-Gilles, France

² IFIP–Institut du Porc, 35740 Pacé, France
clement.ribas@inrae.fr

Gestating sows are most often fed a single feed throughout gestation. This conventional feeding (CF) leads to deficits and excesses at individual level. Precision feeding (PF) is a way of addressing this problem, by adjusting the quantity and quality of feed for each sow on a daily basis. The aim of this study was to investigate the impact of a PF adjusted for energy and standardized ileal digestible (SID) lysine for gestating sows over 3 consecutive gestations. Quantities were adjusted using a 3-phase strategy over the gestation, with requirements estimated using a nutritional model for PF sows and farming feeding curves for CF sows. The PF sows received a diet which SID lysine content was adjusted daily to their needs; CF sows received a diet with a fixed SID lysine content. Trial began with 40 gestating sows allocated to a feeding strategy (PF or CF), based on their parity, body weight, and backfat thickness (BT). Linear mixed models were used to analyse the effect of the nutritional strategy over 3 gestations. The BT objectives at farrowing were achieved by PF sows over the 3 gestations, unlike CF sows who were below the objective at the 3rd farrowing ($P < 0.001$). Total SID lysine intake was reduced by 16% ($P < 0.001$), with decreased supplies in excess in the first 12 weeks of gestation thereby improving the efficiency of nitrogen by 4% ($P < 0.001$) for PF compared to CF sows. Applying a PF strategy resulted in savings of 10 € per ton of feed over 3 gestations without affecting the farrowing performances ($P > 0.10$). PF is a way of improving the sustainability of livestock farms by making a better use of the dietary nitrogen without compromising herd performance.

C. Congrès de l'EAAP, 2025

Accounting for phosphorus needs in precision feeding of gestating sows over three gestations

C. Ribas^{1,2}, C. Gaillard¹, N. Quiniou²

¹ PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590 Saint-Gilles, France

² IFIP–Institut du Porc, 35740 Pacé, France

clement.ribas@inrae.fr

A single diet for gestating sows fails to fit the daily and individual variability of nutrient needs. It may lead to long-term mineral imbalances and impaired performance, with welfare, environmental and economic impacts. A study was carried out to evaluate a new precision feeding (PF) strategy on productive performance, environment, health, and mineral status of sows over three reproductive cycles. The PF strategy involved daily adjustments of dietary energy, lysine (standardized ileal digestible, SID-Lys), and phosphorus (apparent total tract digestibility, ATTD-P). Two batches of 28 Landrace × Large White sows were allocated to PF or standard feeding (SF, single diet) strategy based on their parity, body weight, and backfat thickness. Daily feed allowance was adjusted for energy requirement with iso-net energy diets (9.0 MJ/kg). The PF sows received a daily blend of two diets, one poor (3.3 g/kg) and one rich (8.5 g/kg) in SID-Lys but with the same ATTD-P content (2.6 g/kg), from day 25 to day 80 of gestation. From day 80 to farrowing, a third diet (4.0 g/kg ATTD-P, 8.5 g/kg SID-Lys) was introduced to meet phosphorus requirements. The SF sows received a single diet throughout gestation (2.6 g/kg ATTD-P, 4.7 g/kg SID-Lys). Urinary C-terminal telopeptide of type I collagen (CTX) and calcium to phosphorus ratio monitored mineral status. Over the three cycles, SID-Lys intake was 18% lower for PF than SF sows ($P < 0.001$) without compromising the characteristics of the sows or their litters at farrowing ($P > 0.10$). Adjusting P intake to requirements only during the last month of gestation allowed a greater number of sows to be fed to P requirements, with a better regulation of mineral status, but the improvement of savings on feed costs was not significant (i.e., slight reduction of 4 €/T). Accounting for bone mobilised during the previous lactation would help starting nutrient assessment earlier, and adjustment of supplies throughout gestation could increase the savings on feed costs, reduce P discharges, and potentially benefit for sow longevity, significantly.

D. Congrès des JRP, 2024 (Article et poster)

Détermination des teneurs urinaires en minéraux et biomarqueurs de la minéralisation osseuse chez la truie gestante à partir de prélèvements sur tampons vaginaux

Clément RIBAS (1,2), Nathalie QUINIOU (2), Charlotte GAILLARD (1)

(1) PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590 Saint-Gilles, France

(2) IFIP-Institut du Porc, La Motte au Vicomte, BP 35 104, 35651 Le Rheu Cedex, France

clement.ribas@inrae.fr

Etude réalisée avec l'aide méthodologique de Sylviane BOULOT (2) et l'appui technique de Raphaël COMTE (1), Maryline LEMARCHAND (1), Sophie DARÉ (1), Clémentine DEROINÉ (1), Yannick SUREL et Daniel BOUTIN (UE3P, Saint-Gilles, 35).

Determination of mineral content and bone turnover markers in pregnant sow urine collected using vaginal tampons

The mineral status of sows plays a crucial role in their performance in the nursery and their productive career. Insufficient mineralisation is one of the factors implicated in lameness and leg issues, which degrade sow health and well-being, and reduce longevity in the herd. Mineral status can be monitored using urinary biomarkers assessed routinely in human medicine; however, free-catch sampling with a cup make it difficult to monitor large numbers of animals reared in groups. The aim of this study was to assess effects of using vaginal tampons to collect urine on the results of chemical composition analysis of mineral content and biomarkers of bone mineralisation. One spontaneous urination of each of 10 multiparous sows was sampled during the last week of gestation using four methods: control collection in a cup vs. collection with three models of commercially available tampons (i.e. A, B and C). Urine concentrations of phosphorus and calcium (minerals) and of two biomarkers of bone mineralisation (CTX-I and DPD) standardised by creatinine were determined. The sampling method did not influence the values of these minerals and biomarkers, except for calcium concentration ($P < 0.001$), which was lower using tampon B. This study suggests that it is possible to use vaginal tampons for urine sampling to analyse minerals and biomarkers of bone mineralisation in gestating sows. Tampon sampling is thus a way to routinely obtain urine from a large number of animals to ensure that they are monitored accurately.

INTRODUCTION

Les problèmes d'aplomb sont l'une des principales causes de réforme précoce des truies. Ce problème affectant le bien-être des animaux a des causes multifactorielles mais la nutrition, et plus particulièrement les apports en phosphore (P) et calcium (Ca), ont un impact fort sur le statut osseux des truies (Van Riet *et al.*, 2013). Différents biomarqueurs permettent le suivi de l'état de minéralisation des os à partir de prélèvements sanguins ou urinaires (Shetty *et al.*, 2016). La collecte d'échantillons d'urine dans un pot pendant la miction est une méthode non invasive. Cependant, elle peut être longue donc coûteuse en main d'œuvre, et complexe à réaliser quand les truies sont élevées en groupe. L'utilisation de tampons est une alternative proposée par Boulot *et al.* (2021). Cependant, l'influence de ce mode de prélèvement sur les teneurs en biomarqueurs des urines n'a pas fait l'objet de travaux à ce jour. Ainsi, l'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de la méthode de prélèvement sur les teneurs en minéraux et en

biomarqueurs de la minéralisation osseuse.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Dispositif expérimental

L'étude a été réalisée sur 10 truies multipares croisées Large White x Landrace, issues de l'Unité Expérimentale Physiologie et Phénotypage des Porcs (UE3P, 35590 Saint-Gilles, France). Elles étaient logées en case de maternité conventionnelle, dans une salle dont la température ambiante était de $21,8 \pm 1,2$ °C pour le jour du prélèvement. L'urine a été collectée dans un récipient individuel le vendredi de la semaine précédant la mise-bas (vers 109 jours de gestation), lors de la miction spontanée du matin (entre 8h15 et 11h00). Immédiatement après la collecte, l'urine a été répartie entre un pot témoin et trois pots dans lesquels trois tampons différents ont été immergés. Trois modèles de tampons hygiéniques du commerce ont été utilisés, avec les caractéristiques suivantes : gros volume, avec applicateur, sans parfum et sans

blanchissement au chlore. Chaque tampon a ensuite été pressé manuellement pour obtenir 15 mL d'urine qui ont été centrifugés (2500 T pendant 10 min à 4°C), aliquotés et conservés à -20°C avant analyse.

1.2. Analyses de laboratoire

La teneur en créatinine a été analysée par la méthode Jaffé sur analyseur séquentiel (Gallery plus, ThermoFischer Scientific, USA) et utilisée comme standard pour tenir compte de la dilution de l'urine (Narayanan et Appleton, 1980). Les teneurs en Ca et P total de l'urine ont été analysées par spectrométrie à plasma par couplage inductif (ICP). Les teneurs en CTX-I (C-terminal spécifique du collagène de type I) et DPD (Desoxypyridinoline), biomarqueurs de la résorption osseuse, ont été analysées par dosage immunoenzymatique, respectivement avec les kits 'Urine Crosslaps' (IDS®, Paris, France) et 'MicroVue DPD EIA' (Quidel®, Athens, USA). La gamme de détection est de 50 à 6750 µg/L pour le CTX-I et de 1,1 à 300 nmol/L pour le DPD. Toutes les analyses ont été effectuées en duplicat.

1.3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (v.4.2.2). Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour tester la normalité des variables. Un test de Friedman, prenant en compte des données appariées par truie, a été utilisé pour tester l'effet du mode de prélèvement (n = 4) sur les variables d'intérêt. Lorsque ce test était significatif, les modalités de prélèvement ont été comparées deux à deux avec un test de Wilcoxon. Les différences ont été considérées significatives quand le niveau de signification (*P*-value) ≤ 0,05.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

La variation intra-essai est de 4,9 % pour le CTX-I et de 2,6 % pour le DPD. Une truie a été retirée de l'analyse car elle présentait des valeurs supérieures à la gamme d'analyse pour

les biomarqueurs de la minéralisation osseuse.

Le mode de prélèvement n'influence pas significativement les variables étudiées (Tableau 1) sauf pour le Ca (*P* < 0,001). La teneur obtenue avec le tampon B est significativement plus faible qu'avec le témoin et le tampon C, le tampon A donnant des résultats intermédiaires. Nos résultats sont en accord avec Nickel et *al.* (2017) qui ne trouvent pas de différences entre un prélèvement sur tampon et en pot sur les valeurs de créatinine et P ainsi que pour deux de nos trois tampons testés (A et C) pour le Ca. La différence de résultat concernant le tampon B pourrait être mise en relation avec une structure différente du tampon (plus compact que les deux autres), ainsi qu'avec la composition du cœur absorbant qui était en viscose pour le tampon B vs. en coton pour les deux autres.

La teneur moyenne en Ca urinaire est trois à quatre fois plus faible que celle obtenue par Boudon *et al.* (2016) chez des truies également en fin de gestation, mais semblable à celle obtenue chez des truies en milieu de gestation dans cette même étude. Les résultats des marqueurs de résorption osseuse suggèrent que les truies de notre essai mobilisent moins leurs réserves osseuses que celles étudiées par Boudon *et al.* (2016). Cette différence peut être la conséquence des caractéristiques des régimes alimentaires utilisés dans les deux études (8 g/kg de Ca dans l'aliment dans notre cas vs. 9,5 g/kg et un bilan électrolytique plus faible), entraînant un relargage plus faible de Ca pour les truies que nous avons suivies.

CONCLUSION

Deux des trois tampons testés n'ont pas d'impact sur l'analyse des minéraux et des biomarqueurs de la minéralisation osseuse en comparaison avec la collecte directe en pot. Au vu des avantages de cette technique de prélèvement (praticité, coût faible, capacité à collecter une grande quantité d'urine), et en s'assurant des caractéristiques de tampon à privilégier, elle pourrait donner lieu à la mise en place en routine de campagnes de collecte pour le suivi des biomarqueurs urinaires et la caractérisation précise du statut minéral des truies.

Tableau 1 – Moyenne (± écart-type) des teneurs en minéraux et biomarqueurs de la minéralisation osseuse selon le mode de prélèvement

Variable	Modalité	Témoin (pot)	Tampon A	Tampon B	Tampon C	<i>P</i> -value ¹
Créatinine, mg/L		595 ± 318	605 ± 358	597 ± 337	577 ± 353	0,83
Minéraux						
Phosphore, mg/g de créatinine		82,1 ± 80,6	84,0 ± 78,2	84,6 ± 90,3	107,7 ± 142,8	0,14
Calcium, mg/g de créatinine		41,7 ± 28,6 ^a	36,8 ± 25,7 ^{ab}	34,3 ± 24,8 ^b	56,2 ± 45,9 ^a	<0,001
Biomarqueurs de la minéralisation osseuse						
CTX-I, µg/mmol de créatinine		319,4 ± 75,6	282,9 ± 85,0	307,2 ± 79,9	347,8 ± 157,8	0,10
DPD, nmol/mmol de créatinine		5,46 ± 2,24	5,54 ± 2,39	5,50 ± 2,25	6,12 ± 3,39	0,95

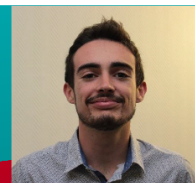
¹ Résultats du test de Friedman. ^{a,b} Des lettres différentes sur une même ligne indiquent une différence significative entre modalités (*P* < 0,05).

Références bibliographiques

- Boudon A., Quesnel H., Dourmad J. Y., Duhamel J., Quemeneur B., Planchenault D., Narcy A., 2016. Effet de l'abaissement du bilan électrolytique de l'aliment distribué en fin de gestation sur le déroulement de la mise-bas, la survie des porcelets et la dynamique de mobilisation osseuse des truies. Journées Rech. Porcine, 48, 115-120.
- Boulot S., Berardet A., Guennec J.L., 2021. Une nouvelle méthode de prélèvement urinaire sur tampon pourrait faciliter le monitoring des pathologies uro-génitales. Journées Rech. Porcine, 53, 117-118.
- Narayanan S., Appleton H.D., 1980. Creatinine: a review. Clin. Chem., 26, 1119-1126.
- Nickel M., Skoland K., Forseth A., Brown J., Thompson V., Breuer M., Warner R., O'Brien K., Canning P., Thomas P., Hoogland M., Lauterbach N., Karriker L., 2017. Development and validation of ante-mortem urine collection techniques for gilts and sows. In: Proc. 48th Ann. Meet. AASV, 63-64.
- Shetty S., Kapoor N., Bondu J.D., Thomas N., Paul T.V., 2016. Bone turnover markers: Emerging tool in the management of osteoporosis. Indian J. Endocrinol. Metab., 20, 846-852.
- Van Riet M.M.J., Millet S., Aluwé M., Janssens G.P.J., 2013. Impact of nutrition on lameness and claw health in sows. Livest. Sci., 156, 24-35.

Détermination des teneurs urinaires en minéraux et biomarqueurs de la minéralisation osseuse chez la truie gestante à partir de prélèvements sur tampons vaginaux

(1) PEGASE, INRAE, 35590 Saint-Gilles, France
(2) IFIP-Institut du Porc, 35650 Le Rheu, France
clement.ribas@inrae.fr



Clément RIBAS (1, 2)
Nathalie QUINIOU(2) et Charlotte GAILLARD (1)

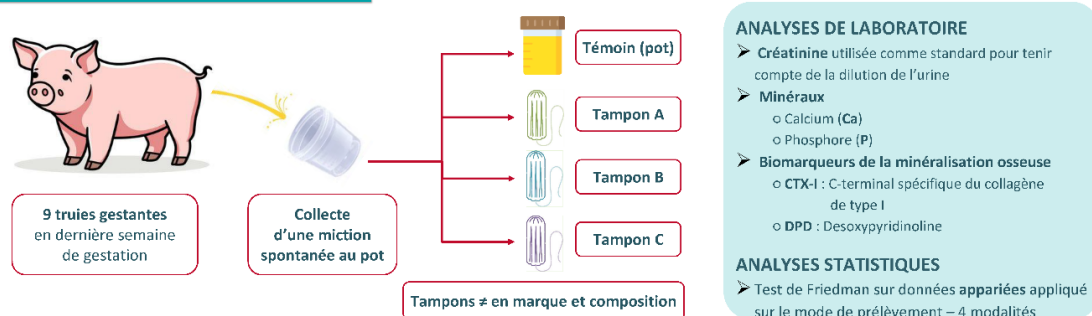
CONTEXTE ET OBJECTIF

Différents biomarqueurs permettent le suivi de l'état de minéralisation des os à partir de prélèvements urinaires. La collecte d'échantillons d'urine peut être longue donc coûteuse en main d'œuvre, et complexe à réaliser quand les truies sont élevées en groupe.

L'utilisation de tampons est une alternative pour prélever de l'urine.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de la méthode de prélèvement sur les teneurs en minéraux et en biomarqueurs de la minéralisation osseuse.

MATÉRIEL ET MÉTHODES



RÉSULTATS

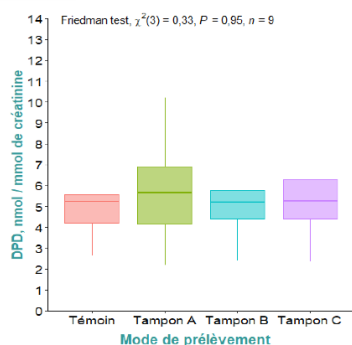


Figure 1 : Teneur en DPD en fonction du mode de prélèvement

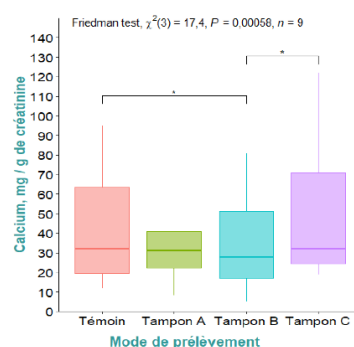


Figure 2 : Teneur en calcium en fonction du mode de prélèvement

➤ Biomarqueurs de la minéralisation osseuse

Pas d'effet du mode de prélèvement sur les teneurs en CTX-I (non présenté) et en DPD (Figure 1)

➤ Minéraux

- Ca : Le tampon B donne des teneurs plus faibles que les autres modes de prélèvement (Figure 2)
- P : Pas d'effet du mode de prélèvement sur les teneurs.

CONCLUSION

- Deux des trois tampons testés donnent les mêmes résultats de teneurs en minéraux et en biomarqueurs de la minéralisation osseuse analysées dans les urines que la collecte directe en pot.
- Les avantages de la technique de collecte sur tampon (praticité, coût faible, capacité à collecter une grande quantité d'urine) permettent d'envisager des campagnes de suivi en routine du statut de la minéralisation osseuse des truies.



E. Congrès des JRP, 2025 (Article, poster et protocole d'analyse)

Évaluation du statut minéral de la truie gestante à partir de prélèvements salivaires analysés avec deux méthodes d'analyses

Clément RIBAS (1,2), Nathalie QUINIOU (2), Cécile PERRIER (1), Charlotte GAILLARD (1)

(1) PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590 Saint-Gilles, France

(2) IFIP-Institut du Porc, 9 Boulevard du Trieux, 35740 Pacé, France

charlotte.gaillard@inrae.fr

Assessment of the mineral status of gestating sows using saliva samples and two analytical methods

Phosphorus (Phos) is a limited and non-renewable resource in pig diets. Supplying too much Phos results in surface water pollution, while supplying too much calcium (Ca) decreases Phos absorption. Deficiencies in Ca or Phos impact sows differently, for example regarding bone resorption. The degree to which intake meets requirements can be assessed by the urinary Ca:Phos ratio in gestating sows. Collecting urine can be time consuming and limits the number of individuals sampled. Because collecting saliva is easier and faster, more animals can be sampled during a sampling session or the session can be shortened. The aim of this study was to compare two methods of Phos and Ca analysis (inductively coupled plasma spectrometry (ICP) or colorimetric analysis using a discrete analyser (Gallery)) to characterise urine and saliva samples (two matrices) collected from 20 gestating sows at the end of gestation. The matrix and analytical method used significantly influenced Phos concentration ($P = 0.048$) but not Ca concentration ($P > 0.10$). Urinary Phos was nearly 10 times as high as salivary Phos. Analysed Phos was higher with ICP than Gallery. Salivary and urinary Phos according to each method were not correlated ($|r| < 0.10$, $P > 0.10$), while salivary and urinary Ca were weakly correlated according to the Gallery and ICP ($r = -0.21$ ($P = 0.40$) and $r = 0.44$ ($P = 0.05$), respectively). Thus, the analytical method used to determine Phos concentrations must be considered when data from different studies are compared. Unlike the urinary Ca:Phos ratio, the salivary Ca:Phos ratio is not a reliable indicator of the mineral status of sows.

INTRODUCTION

Le phosphore (Phos) incorporé dans les aliments des porcs est issu de ressources limitées et non renouvelables. Il est donc important de maximiser son efficacité d'utilisation par les animaux. L'adéquation entre les apports et les besoins peut-être évaluée grâce au rapport phosphocalcique urinaire (Grez-Capdeville et Crenshaw, 2021). Cependant, la collecte d'urine peut être chronophage et peut limiter le nombre d'individus prélevés. Ainsi, la salive est un fluide physiologique de plus en plus utilisé pour assurer le suivi des animaux, notamment des truies (Contreras-Aguilar *et al.*, 2021). La collecte est simple à réaliser par des personnes non entraînées et ne nécessite pas beaucoup de matériel (Contreras-Aguilar *et al.*, 2019). Cependant, les teneurs en biomarqueurs de la salive sont généralement plus faibles que celles observées dans les autres fluides tel que le sérum et l'urine, et la corrélation entre les valeurs obtenues dans les différents fluides dépend des biomarqueurs étudiés (Kersch-Schindl *et al.*, 2020).

L'objectif de cette étude est de comparer les teneurs en Phos et calcium (Ca) dans l'urine et la salive des truies gestantes après analyse avec deux méthodes de dosage.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Dispositif expérimental

L'essai a été réalisé sur 20 truies croisées Large White x Landrace issues de la station CIRI de l'IFIP (35850 Romillé, France), sur lesquelles des échantillons d'urine et de salive ont été collectés durant le dernier mois de gestation. La veille du prélèvement, les truies étaient déplacées de leur case d'élevage en groupe vers une case individuelle, où elles recevaient le repas de l'après-midi. Le lendemain, après une nuit sans accès à l'aliment, un pot d'urine était collecté à partir de la première miction spontanée de la journée (entre 8h et 11h), dont 15 mL étaient immédiatement mis en tube fermé au frais dans une glacière. Ensuite, chaque truie était incitée à machouiller pendant au minimum une minute trois tampons absorbants synthétiques (Salivette® Cortisol, Sarstedt, Allemagne) maintenus à l'extrémité d'une pince à pansement. Une fois imbibés, les tampons salivaires étaient remis chacun dans leur contenant et mis au frais. Une fois les collectes terminées, les tubes d'urine et ceux contenant les tampons imprégnés de salive étaient centrifugés, respectivement, à 2500 tours pendant 10 min à 4°C et à 3000 tours pendant 10 min à 4°C, aliquotés et conservés à -20°C avant analyses chimiques.

1.2. Analyses de laboratoire

Les teneurs en Phos et Ca des deux matrices (urine et salive) ont été déterminées au laboratoire de l'UMR PEGASE (INRAE,

35590 Saint-Gilles, France) à l'aide de deux méthodes d'analyse. La première utilise un dosage colorimétrique sur analyseur séquentiel (Gallery plus, ThermoFischer Scientific, USA) pour doser le Phos inorganique. La seconde repose sur l'analyse des spectres lumineux des échantillons ionisés par spectrométrie à plasma par couplage inductif (5110 ICP-OES, Agilent, USA) pour doser le Phos total. Le volume minimal prélevé de chaque échantillon était de 100 µL avec un volume minimal de 5 mL pour l'ICP. Toutes les analyses ont été effectuées en duplicat.

1.3. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R v4.2.2 (R Core Team, 2022). Un modèle linéaire mixte avec la fonction lme du package nlme a été utilisé pour tester les effets (fixes) de la matrice (urine vs. salive), de la méthode d'analyse (Gallery vs. ICP), et de l'interaction entre ces deux facteurs, sur les concentrations en Phos et en Ca. La truie a été intégrée dans le modèle comme effet aléatoire. Pour chaque méthode d'analyse et chaque minéral, la corrélation de Spearman a été utilisée pour étudier la relation entre les concentrations des deux matrices. Les différences ont été considérées significatives lorsque la *P*-value était inférieure à 0,05.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

Quarante échantillons ont été analysés (20 urines et 20 salives). Trois échantillons d'urine présentaient une teneur en Phos en dehors de la gamme mesurable au Gallery et un autre avec une teneur en Ca hors gamme à l'ICP. Les résultats de Phos dosé à l'ICP de deux échantillons d'urine et de salive n'ont pas été utilisés en raison de différences importantes entre duplicats, persistant après répétition des dosages (coefficients de variation (CV) supérieur à 10%). Vingt échantillons présentaient un CV compris entre 5 et 10% principalement pour les analyses de Phos à l'ICP. Homogénéiser les échantillons avec un vortex avant chaque pipetage apparaît efficace pour réduire le CV des échantillons re-dosés, indiquant une probable sédimentation du Phos dans les cupules. Celle-ci peut être due à une liaison du Phos à d'autres molécules présentes dans la matrice,

conduisant à du Phos particulaire (Dorioz *et al.*, 1997).

Le résultat du dosage de Phos dépend de la matrice et de la méthode d'analyse (Tableau 1, *P* = 0,048). En effet, pour les mêmes individus, la concentration en Phos est plus faible dans la salive que dans l'urine, avec pour la salive un facteur de 10 environ par rapport à l'urine quelle que soit la méthode d'analyse utilisée. Les valeurs obtenues dans la salive sont proches des limites basses de détection des appareils. Pour les mêmes échantillons, les concentrations obtenues avec l'ICP sont plus élevées que celles obtenues avec le Gallery. Or, ce dernier dose le Phos inorganique tandis que l'ICP mesure le Phos total. Les concentrations plus élevées obtenues avec l'ICP par rapport au Gallery indiquent donc la présence de Phos non-organique ou de Phos particulaire non détectable au Gallery dans les matrices étudiées. Les résultats de dosage du Ca ne sont influencés ni par la matrice (*P* = 0,30) ni par la méthode d'analyse (*P* = 0,15). Les concentrations obtenues dans la salive à l'ICP sont du même ordre de grandeur que celles obtenus par Contreras-Aguilar *et al.* (2021) pour le Phos et le Ca. Ils suivent la même tendance que d'autres biomarqueurs dans la salive avec une concentration dix fois plus faible dans la salive par rapport au sérum (Kersch-Schindl *et al.*, 2020). Avec aucune des deux méthodes, le Phos salivaire n'est corrélé au Phos urinaire ($|r| < 0,10$, *P* > 0,10). Pour le Ca, la corrélation entre l'urine et la salive est faible et soit négative avec l'ICP (*r* = -0,21, *P* = 0,40), soit positive avec le Gallery (*r* = 0,44, *P* = 0,05).

CONCLUSION

Nos résultats montrent qu'il est important de prendre en considération la méthode de dosage du Phos lorsqu'il s'agit de comparer les résultats de différentes études. Dans notre étude, la concentration en Phos dans la salive est 10 fois plus faible que dans les urines et aucune corrélation significative n'est observée entre les deux matrices. Il en est de même entre les teneurs en Ca. Le dosage de minéraux dans des prélèvements salivaires n'apparaît donc par pertinent pour évaluer l'adéquation entre les apports de Phos et de Ca et les besoins de la truie gestante.

Tableau 1 – Moyenne (± écart-type) des teneurs en phosphore et calcium selon la matrice et la méthode d'analyse utilisées

	Urine		Salive		<i>P</i> -value ¹			Corrélation ²	
	Gallery	ICP	Gallery	ICP	Matrice	Méthode	Interaction	Gallery	ICP
Phosphore, mg/L	41,3 (± 48,5)	82,0 (± 82,0)	5,4 (± 2,1)	9,0 (± 2,7)	< 0,001	0,016	0,048	-0,04	0,08
Calcium, mg/L	83,4 (± 75,8)	86,7 (± 75,6)	62,6 (± 23,8)	77,9 (± 14,0)	0,301	0,149	0,489	0,44	-0,21

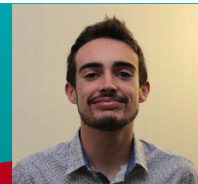
¹Modèle linéaire mixte prenant en compte la matrice, la méthode d'analyse et leur interaction comme effet fixe et la truie comme effet aléatoire. ² Coefficient de corrélation de Spearman.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Contreras-Aguilar M.D., Escribano D., Martínez-Miró S., López-Arjona M., Rubio C.P., Martínez-Subiela S., Cerón J.J., Tecles F., 2019. Application of a score for evaluation of pain, distress and discomfort in pigs with lameness and prolapses: correlation with saliva biomarkers and severity of the disease. *Res. Vet. Sci.*, 126, 155-163.
- Contreras-Aguilar M.D., López-Arjona M., Martínez-Miró S., Escribano D., Hernández-Ruipérez F., Cerón J.J., Tecles F., 2021. Changes in saliva analytes during pregnancy, farrowing and lactation in sows: a sialochemistry approach. *Vet. J.*, 273, 1-6.
- Dorioz J.M., Trevisan D., Vansteelant J.Y., 1997. Transferts diffus de phosphore des bassins versants agricoles vers les lacs : impacts, ordre de grandeur, mécanismes. In : INRA (Eds), *L'eau dans l'espace rural*, 249-264. Paris, France.
- Grez-Capdeville M., Crenshaw T.D., 2021. Evaluation of calcium to phosphorus ratio in spot urine samples as a practical method to monitor phosphorus intake adequacy in sows. *J. Anim. Sci.*, 99, 1-7.
- Kersch-Schindl K., Boschitsch E., Marculescu R., Gruber R., Pietschmann P., 2020. Bone turnover markers in serum but not in saliva correlate with bone mineral density. *Sci. Rep.*, 10, 1-8.
- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing (Version 4.2. 2). R Foundation for Statistical Computing.

Évaluation du statut minéral de la truie gestante à partir de prélèvements salivaires analysés avec deux méthodes

(1) PEGASE, INRAE, 35590 Saint-Gilles, France
(2) IFIP-Institut du Porc, 35740 Pacé, France
clement.ribas@inrae.fr



Clément RIBAS (1, 2), Nathalie QUINIOU(2),
Cécile PERRIER (1) et Charlotte GAILLARD (1)

CONTEXTE ET OBJECTIF

Le rapport phosphocalcique urinaire est vu comme un indicateur de l'adéquation entre apports en phosphore dans l'aliment et besoins des animaux. La collecte d'échantillons d'urine peut être longue donc coûteuse en main d'œuvre, et complexe à réaliser quand les truies sont élevées en groupe. L'utilisation de salive, fluide simple à prélever, est une alternative étudiée pour suivre le rapport phosphocalcique excrété par les animaux. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de la matrice (urine ou salive) utilisée et de la méthode d'analyse sur les teneurs en phosphore et calcium.

MATÉRIEL ET MÉTHODES



ANALYSES DE LABORATOIRE

- Minéraux
 - Phosphore
 - Calcium
- Méthode d'analyse
 - ICP : Spectrométrie à plasma par couplage inductif
 - Gallery : Dosage colorimétrique sur analyseur séquentiel

ANALYSES STATISTIQUES

Modèle linéaire mixte avec la matrice, la méthode d'analyse et leur interaction comme effets fixes et la truie en effet aléatoire – 2 x 2 modalités

RÉSULTATS

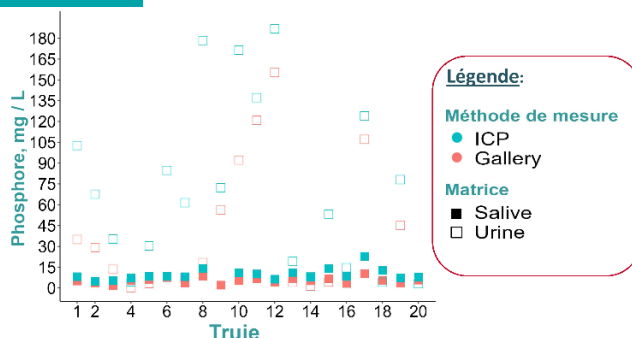


Figure 1 : Teneur en phosphore en fonction de la matrice et de la méthode utilisée

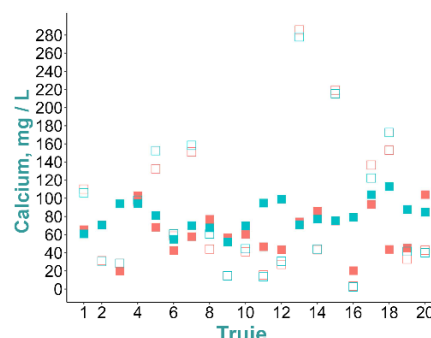


Figure 2 : Teneur en calcium en fonction de la matrice et de la méthode utilisée

Phosphore

- Les concentrations obtenues avec l'ICP sont significativement **plus élevées** qu'avec le Gallery (Figure 1)
- La concentration en phosphore dans la salive est **10 fois plus faible** que dans l'urine, proche de la limite de détection

Calcium

- **Pas d'effet** de la matrice et de la méthode d'analyse sur les teneurs observées (Figure 2)
- **Pas de corrélation significative** entre le calcium urinaire et salivaire

CONCLUSION

- La teneur en phosphore de la salive est 10 fois plus faible que dans l'urine, différence non observée pour le calcium.
- Les teneurs salivaires ne sont pas corrélées aux teneurs urinaires.
- La salive n'apparaît pas être une matrice permettant l'évaluation de la pertinence des apports en minéraux chez la truie gestante.



Analyse P et Ca à l'ICP de l'urine de truie non acidifiée et centrifugée

Méthode utilisée	Nombre d'échantillons en duplicat	Moyenne CV ¹		Erreur absolue moyenne ²	
		P	Ca	P	Ca
Minéralisation au four et ajout de 10mL de HNO ₃ à 5%	10	18,52	4,09	/	/
Minéralisation au four et ajout de 10mL de HNO ₃ à 5% et filtration	6	17,80	10,35	/	/
Minéralisation sur banc de sable et ajout de 10mL de HNO ₃ à 5%	6	22,66	11,84	/	/
Ajout de 0,2mL de HNO ₃ à 69% et ajout de 9,8mL de HNO ₃ à 5%	10	0,80	0,42	30,92	2,58

Abréviations : Ca = Calcium ; CV = coefficient de variation ; P = Phosphore.

¹ Le coefficient de variation est calculé de la manière suivante : $\frac{\text{écart-type(duplicats)}}{\text{moyenne (duplicats)}}$.

² Erreur absolue moyenne calculée de la moyenne suivante : $\frac{\sum_{\text{nombre d'échantillon}} |\text{Y}_{\text{urine avec centrifugation}} - \text{Y}_{\text{urine sans centrifugation}}|}{\text{nombre d'échantillon}}$.

Protocole retenu :

- Etape 1 : Décongeler les échantillons d'urine (peut être accélérée avec l'utilisation du bain-marie).
- Etape 2 : Peser le tube à vide, prélever l'ensemble de l'échantillon à la micro-pipette, le transférer dans le tube vide et le peser de nouveau.
- Etape 3 : Rajouter 0.2 mL de HNO_3 à 69 %, peser l'ensemble.
- Etape 4 : Rajouter 9.8 mL de HNO_3 à 5 %, vortexer.
- Etape 5 : Mesurer à l'ICP (les raies d'analyse 177,434 nm en axial et 396,847 nm en axial ont été respectivement utilisés pour le P et Ca), en déduire le résultat *via* le facteur de dilution.

Titre : Nouvelles stratégies d'alimentation sur mesure pour la carrière des truies

Mots clés : alimentation de précision, gestation, long-terme, modèle nutritionnel, phosphore

Résumé : L'application d'une alimentation sur mesure ajustée sur l'énergie et les acides aminés sur une gestation permet de réduire légèrement les coûts alimentaires et fortement les rejets dans l'environnement sans dégrader les performances des truies. L'objectif de cette thèse est d'évaluer l'effet sur le long-terme de diverses stratégies d'alimentation sur mesure sur les performances des truies. Deux expérimentations *in vivo* permettent d'évaluer sur trois gestations consécutives deux stratégies d'alimentation sur mesure, tandis que quatre autres stratégies sont simulées avec un modèle nutritionnel. Ce modèle dérivé d'InraPorc, permet d'estimer les besoins individuels journaliers des truies gestantes. Les résultats obtenus mettent en évidence qu'ajuster la ration selon les besoins énergétiques individuels permet d'atteindre les objectifs d'état corporel à la

mise-bas au cours des cycles successifs. Raisonner les apports en acides aminés selon les besoins individuels durant la gestation réduit de 16 % l'ingestion de lysine digestible sans affecter les performances productives des truies sur le long-terme. L'intégration d'équations permettant le calcul des besoins en phosphore dans le modèle permet d'ajuster les apports au besoin sur le dernier tiers de la gestation. L'application de cette stratégie conduit à un apport supérieur lors de la dernière semaine de gestation, sans effet sur la résorption osseuse. Les simulations indiquent qu'un potentiel de réduction des apports de phosphore existe lorsqu'ils sont ajustés au besoin sur l'ensemble de la gestation. Cette thèse apporte des références expérimentales et simulées pour ajuster finement les apports nutritionnels sur plusieurs gestations.

Title: New tailored feeding strategies to the sow's career

Keywords: precision feeding, gestation, long-term, nutritional model, phosphorus

Abstract: The application of a tailored feeding strategy adjusted for energy and amino acids requirements during gestation slightly reduces feed costs and significantly reduces environmental discharge without affecting negatively sows' performances. The objective of this PhD thesis is to evaluate the long-term effect of various tailored feeding strategies on sows' performance. Two distinct tailored feeding strategies applied *in vivo* (in two trials) over three consecutive gestations and four strategies simulated with a nutritional model were carried out. The model used is derived from InraPorc, and allows the estimation of the individual daily requirements of gestating sows. The results highlight that adjusting the diet to individual energy requirements during gestation allows the sows to more accurately reach the body condition targeted by farmers at farrowing over

successive reproductive cycles. Adjusting nutrient intake based on individual amino acid requirements during gestation reduces digestible lysine intake by 16 % without affecting the long-term sows' productive performances. New knowledge about phosphorus requirements for sows is implemented into the existing model to assess the effect of adjusting phosphorus intake to requirement. Feeding sows to their phosphorus requirement during the last month of gestation significantly increases phosphorus intake only during the last week of gestation, but without any effect on bone resorption. Simulations indicate that there is a potential to further reduce phosphorus intake when adjusted to requirement throughout gestation. This manuscript provides experimental and simulated references to precisely define the characteristics of tailored feeding strategies over several gestations.