

## SYSTÈME D'ALIMENTATION DE PRÉCISION DES TRUIES EN LACTATION PAR MODÉLISATION ET MACHINE LEARNING.

Thèse de Raphaël GAUTHIER<sup>1</sup>

Analysée par Philippe SCHMIDELY<sup>2</sup>

**Directeur de thèse :** Jean-Yves DOURMAD, Ingénieur de recherche, INRAE.

**Co - Directeur de thèse :** Christine LARGOUËT, Maître de conférences, Institut Agro, IRISA, INRIA.

**Cadre général.** Cette thèse s'inscrit dans le cadre des concepts de l'élevage de précision, plus particulièrement dans sa composante de l'alimentation de précision (AP). Elle avait pour objectif d'implémenter et de valider des outils d'aide à la décision (OAD) afin d'accroître l'efficacité animale et la durabilité des exploitations, le modèle animal étant les truies allaitantes. Les travaux ont combiné des approches de modélisation mécaniste pour prédire les besoins nutritionnels, et la mise au point de méthodes d'apprentissage visant à prédire, d'une part les performances de portée des porcelets, et d'autre part la consommation des truies sur des bases de données, pour fournir un OAD permettant de simuler les changements de rations qualitatifs et quantitatifs à induire individuellement dans le cadre de l'AP. Cet OAD a été ultérieurement validé en conditions de terrain diversifiées (France et Canada). La thèse comporte six chapitres, une discussion et une conclusion générale.

**Le chapitre 1** (Bibliographie) fait dans une première partie un bilan des modes de gestion des troupeaux de truies concernant leur cycle biologique. Parmi les facteurs de variation étudiés, l'alimentation énergétique et/ou protéique ainsi que la sélection génétique sur l'hyper prolificité des truies sont identifiées comme des facteurs déterminants pour la carrière des truies et la durabilité des exploitations. Dans cette partie sont décrits les facteurs d'élevage pilotables, concernant la conduite en bande, le logement des truies en fonction de leur stade physiologique, leur mode d'alimentation ainsi que les paramètres mesurables en élevage constituant des indicateurs de la performance globale des troupeaux. Un paragraphe complet et richement documenté fait état des connaissances actuelles des besoins nutritionnels des truies en lactation et des conséquences sur la croissance de porcelets.

Dans une seconde partie sont précisés les concepts de l'élevage de précision permettant de piloter à tout instant la plus petite entité fonctionnelle du troupeau (en général l'animal individuel) par opposition aux modes d'élevage traditionnels concernant l'animal moyen du troupeau. Ces concepts reposent sur la production de grandes quantités de données biologiques obtenues *via* des capteurs ou des informations renseignées par l'éleveur, et le traitement automatisé de celles-ci par *Machine Learning* (ML) associé à l'informatique et l'ingénierie pour fournir des informations synthétiques pour la prise de décision. Ces concepts sont ensuite déclinés sur les applications déjà existantes concernant diverses variables

---

<sup>1</sup> Thèse de doctorat de AGROCAMPUS OUEST, Ecole doctorale n°600, Ecole doctorale Ecologie, Géosciences, Agronomie et Alimentation, Spécialité : Biologie et physiologie animales. Unité de recherche : INRAE UMR Pegase - INRIA Equipe LACODAM, présentée et soutenue à Rennes, le 5 mars 2021.

<sup>2</sup> Philippe SCHIMELY, Professeur à AgroParisTech.

d'intérêt en élevage porcin, associées à leur utilité pour la prise de décision (santé, bien-être, ...). Un focus est présenté concernant l'AP pour assurer à toutes échelles de temps, la couverture des besoins des truies allaitantes afin d'optimiser leur performance et leur efficacité. Chaque animal présente en effet des besoins spécifiques fonction de facteurs intrinsèques (niveau de performances, stade de lactation, parité...), que les méthodes d'alimentation traditionnelle ne permettent pas de satisfaire : il en résulte, soit un excès d'apports alimentaires pouvant induire des impacts environnementaux négatifs, soit une sous-alimentation réduisant les performances techniques et économiques. Ce concept d'AP déjà développé au travers de l'alimentation multiphase ou par association d'aliments de valeurs nutritionnelles différentes ne permet cependant pas d'intégrer suffisamment l'ensemble des facteurs intrinsèques de variabilité des performances. Il n'a par ailleurs, été développé jusqu'à présent que pour les porcs en croissance et les truies en gestation, ce qui justifie de s'intéresser à sa mise en place chez les truies allaitantes, animaux à forte variabilité individuelle des besoins nutritionnels, et à produire des AOD spécifiques pour ce type d'élevage.

La troisième partie synthétise les facteurs de variation d'origine animale ou environnementale de la production laitière et de la qualité du lait chez les truies allaitantes, et à convertir ces performances en besoins nutritionnels pour l'énergie, les AA digestibles et les minéraux digestibles, suivant l'approche factorielle classique. Un développement spécifique concerne la prise alimentaire et ses facteurs de variation, puisqu'elle conditionne les caractéristiques qualitatives de la ration distribuée du fait des mécanismes de régulation, largement basés sur la concentration en énergie des rations distribuées.

La quatrième partie fait état des connaissances sur le *Machine Learning* (ML) et ses applications en élevage. Les principes généraux du ML sont présentés de façon synthétique mais précise concernant les attributs utilisés pour qualifier les données, le type d'apprentissage utilisé (supervisé ou non), les processus de validation, ainsi que les capacités de généralisation des modèles obtenus associées au sur-apprentissage ou inversement au sous-apprentissage. Cette partie présente également certains algorithmes d'apprentissage et leurs applications en élevage, visant surtout à la résolution de problèmes de comptage, de détection et de prédiction pour des applications variées allant du comportement animal et des interactions sociales à la santé animale. Ces approches pourraient être utilisées chez les truies allaitantes pour prédire des variables utilisables dans des modèles d'AP, variables qui ne sont néanmoins pas aisément accessibles directement (Production laitière, poids, ingestion...).

**Le chapitre 2** décrit les objectifs de la thèse et la démarche scientifique adoptée. La question de recherche vise à élaborer un OAD capable d'estimer en temps réel la ration optimale à distribuer en lactation, à partir des connaissances actuelles en nutrition et de l'exploitation des données mesurables à l'échelle de chaque truie. La démarche consiste dans une première étape à construire un modèle mécaniste dynamique individu-centré sur une base temporelle journalière, basé sur le modèle InraPorc, mais permettant d'estimer *a priori* les besoins des truies allaitantes selon une approche factorielle (besoins d'entretien et de production). Dans une seconde étape, les besoins de production non directement mesurables sont estimés par la prédiction du poids de portée attendue au sevrage à partir de divers algorithmes d'apprentissage supervisé utilisés sur une Base de Données de six élevages (France et Canada). Dans une troisième étape est produit un algorithme de prédiction (*clustering*) de la consommation journalière individuelle des truies allaitantes à partir de données récupérées dans six élevages au Canada *via* les distributeurs automatiques de concentrés. Cette étape couplée à la précédente permet ainsi de calculer une composition quotidienne de ration adaptée à chaque truie en fonction de la prédiction de ses besoins et de son ingestion. La dernière étape caractérise en situation d'élevage, la validation des différentes composantes

de l'OAD créé, par le pilotage d'un automate en charge de la distribution, en comparant les performances de truies nourries selon l'AP vs une alimentation traditionnelle.

**Le chapitre 3** est constitué d'une publication scientifique dans *Journal of Animal Science* (2019, <https://doi.org/10.1093/jas/skz167>) concernant l'implémentation et la validation d'un modèle mécaniste et dynamique issu de InraPorc pour la prédiction des besoins nutritionnels individuels (énergie métabolisable, acides aminés digestibles, P et Ca digestibles) chez la truie en lactation, ainsi que des variations de ses réserves corporelles. Les besoins journaliers sont prédits par la modélisation à partir des données enregistrées chez les truies, d'une courbe de lactation théorique (Modèle de Wood) pondérée des effets de la taille et de croissance de la portée portant sur une base de données de 1450 lactations issues de deux élevages, différant par les performances des truies. Les résultats montrent l'influence primordiale de la variabilité individuelle des performances de production et de l'appétit sur les quantités et la composition des rations à distribuer pour couvrir quotidiennement les besoins, ce qui valide bien les concepts de l'AP chez la truie allaitante. Ces travaux démontrent aussi la possibilité de pilotage en temps réel et individualisé de leur alimentation en fonction du type d'élevage, du rang de portée et de la semaine de lactation, ce qui constitue un changement de paradigme en élevage par la possibilité d'évaluer 'ex post' les besoins nutritionnels ou en temps réel pour l'ingestion.

**Le chapitre 4** est constitué d'un article en préparation dans la thèse pour *Computers and Electronics in Agriculture* et publié en 2022 (<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106876>). Il décrit la stratégie de mise en place d'une méthodologie d'apprentissage pour prédire le poids de portée au sevrage (PPS) à partir de données issues de six élevages expérimentaux (20 ans). La démarche a consisté à explorer une combinatoire de quatre stratégies d'apprentissage et de huit algorithmes d'apprentissage supervisé pour déterminer le meilleur algorithme de prédiction du PPS à partir de quatre attributs numériques (durée de lactation, taille de portée à la naissance et au sevrage, et poids de portée à la naissance) et de trois attributs catégoriels (parité et mois de mise-bas des truies, nom de l'élevage). Le PPS par élevage a été le plus précisément prédit par un algorithme ensembliste et un apprentissage avec uniquement les données de l'élevage concerné, et non par l'ensemble des six élevages. Cet ensemble d'attributs permet d'expliquer plus de 50% de la variabilité du PPS, avec une erreur moyenne absolue de 9%, l'attribut le plus déterminant étant assez logiquement le nombre de porcelets allaités. Ces travaux montrent qu'il est possible, à partir d'attributs aisément mesurables en élevage sans perturbation des truies ou des porcelets, d'estimer la production laitière et les besoins des truies à partir du PPS. Ils montrent également que les données de l'élevage sont nécessaires pour entraîner avec précision les algorithmes pour des prédictions fiables.

**Le chapitre 5** est constitué d'un article en préparation dans la thèse pour *Computers and Electronics in Agriculture* et ultérieurement publié en 2021 (<https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106329>). Il décrit la méthodologie pour prédire la consommation des truies, basée sur un apprentissage 'hors ligne' de leur comportement alimentaire mesuré sur plus de 39 000 lactations (six élevages). L'approche vise à caractériser des groupes de truies par des profils temporels similaires de prise alimentaire (apprentissage hors ligne par le regroupement de séries chronologiques) pour prévoir les apports alimentaires quotidiens individuels (prévision des séries chronologiques en ligne) en fonction de la combinaison des données individuelles en ligne acquises depuis la mise-bas et des données historiques du troupeau. Ce travail a permis d'identifier deux profils de truies caractérisés soit par une croissance continue de leur ingestion pendant la lactation, soit par un pic de consommation atteint dès le 10<sup>ème</sup> jour post mise-bas. Ceci indique que ces profils de trajectoire alimentaire sont limités, bien qu'une forte variabilité individuelle persiste durant la lactation. Ainsi, l'erreur moyenne de prédiction de la consommation alimentaire journalière par

truie et par élevage, obtenue en utilisant deux trajectoires et la meilleure fonction de prédiction, est de - 0,08 kg/j, avec une erreur quadratique moyenne de 1,06 kg/j. L'apprentissage hors ligne avec l'algorithme considéré, appliqué à ces séries temporelles, apparaît aisé et nécessite peu de données, est peu consommateur en temps et en ressources informatiques : son inclusion dans un système d'AP peut donc être aisément réalisé en élevage.

**Le chapitre 6** publié en 2022 dans *J. Animal Science* (<https://doi.org/10.1093/jas/skac222>) vise à valider la mise en place en situation de terrain (479 truies, Canada) et en élevage expérimental (62 truies, France) d'un OAD. Seuls les résultats des essais conduits au Canada sont présentés dans l'article publié. Cet OAD permet le pilotage d'un robot de distribution visant à calculer quotidiennement la composition individualisée de la ration 'précision' selon les principes décrits aux chapitres 3, 4 et 5, en comparaison d'une alimentation traditionnelle 'témoin' basée sur la distribution constante d'un aliment de lactation. La ration 'précision' est obtenue par le mélange variable de deux aliments contrastés pour leur teneur en Lysine digestible et P digestible, visant à couvrir les besoins journaliers en Lysine digestible, alors que la ration 'témoin' consiste en un mélange fixe de ces deux aliments. Les résultats montrent que la stratégie d'alimentation ne modifie pas l'ingestion des truies, mais que la stratégie 'précision' réduit légèrement la croissance des porcelets (- 3%) et accroît la perte de réserves corporelles (- 5 kg) en comparaison de la stratégie 'témoin', néanmoins sans conséquence sur l'intervalle sevrage-œstrus. Cette réduction de ces performances est attribuable à une insuffisance légère d'apport en AA digestibles, du fait de la faible capacité du système à correctement évaluer la variabilité des performances des porcelets et donc de la production laitière maternelle. L'ingestion de Lysine digestible et de P digestible est réduite de 23% et 14% chez les truies 'précision' vs 'témoin' respectivement, induisant une réduction de l'excrétion calculée de l'N et du P de 28% et 42%, respectivement. Au final, le coût alimentaire est réduit de 12%.

Dans l'essai français (non publié), en comparaison de la stratégie 'témoin', la stratégie 'précision' induit une perte de poids légèrement plus élevée, mais aucun effet sur les performances de croissance de porcelets. Comme pour l'essai CND, la stratégie 'précision' induit une réduction des apports en LysDi (-14%), de l'ingestion d'N (-7%), de l'N excrété (- 19%) et du P excrété (-13%), se traduisant par une réduction du coût alimentaire de 3%. Ces travaux montrent que l'alimentation de précision mise en place au travers d'un OAD en élevage permet de mieux prendre en compte la variabilité individuelle des besoins des truies allaitantes, et la prédiction de leur ingestion, permettant ainsi de distribuer en élevage une ration quotidienne individualisée, réduisant les coûts alimentaires sans obérer fortement les performances et en réduisant l'impact environnemental de ce type de production.

**La discussion générale** reprend en grande partie les éléments de discussion de chacune des publications, en se focalisant sur les innovations ou originalités induites par les travaux de thèse. Des voies d'amélioration du système mise en place sont proposées : elles concernent notamment l'amélioration de la prédiction des performances de la portée, notamment dans le cas de dérive temporelle des performances, de celle de la consommation des truies par une meilleure caractérisation de la variabilité individuelle inter-jour, et d'une plus grande fonctionnalité de l'interface homme-machine mise en place en conditions pratiques.

**La conclusion générale** synthétise l'ensemble des résultants en insistant sur le caractère novateur de l'approche.

**Conclusion.** Ces travaux de thèse racontent une histoire, celle de la mise en place d'un outil d'aide à la décision pour la mise en place des concepts de l'alimentation de précision appliquées aux truies en lactation. Cette thèse, très interdisciplinaire, allie avec efficacité et pertinence des connaissances en nutrition/alimentation, des

---

approches de modélisation mécaniste et d'intelligence artificielle au travers du *machine-learning*, et d'ingénierie pour l'élaboration de cet outil jusqu'à sa validation en situation de terrain. Dans cet ensemble remarquable, je regrette néanmoins qu'une réflexion sur la dimension sociologique de ces outils n'ait pas été conduite, face aux questionnements sociétaux concernant l'artificialisation des systèmes de production, l'éloignement de la relation homme-animal et le bien-être des animaux.

Les travaux présentés ont été valorisés au travers de quatre publications dans de très bons journaux de facteur d'impact élevé. L'ensemble de la démarche constitue un véritable changement de paradigme dans l'alimentation des truies en lactation, passant d'une démarche collective (troupeau), et le plus souvent statique, à une démarche individualisée et dynamique. Elle constitue donc une vraie approche de pilotage proactif et anticipatif de l'alimentation, et contribue ainsi à l'efficacité et la durabilité de ces systèmes de production.

Cette thèse me semble digne de figurer sur le site de l'Académie d'agriculture de France, à titre de valorisation.