



HAL
open science

Analyse comparative d'une alimentation de précision avec une alimentation standard en production bovine laitière sur les plans zootechnique et économique

Valentine Landais

► **To cite this version:**

Valentine Landais. Analyse comparative d'une alimentation de précision avec une alimentation standard en production bovine laitière sur les plans zootechnique et économique. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04809129

HAL Id: dumas-04809129

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04809129v1>

Submitted on 28 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

<p>Année universitaire : 2023 - 2024 Spécialité : Ingénieur Agronome Spécialisation (et option éventuelle) : Sciences et Ingénierie en Productions Animales (SIPA)</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
--	--

Analyse comparative d'une alimentation de précision avec une alimentation standard en production bovine laitière sur les plans zootechnique et économique

Par : Valentine LANDAIS

Soutenu à Rennes, le 16/09/2024

Devant le jury composé de :

Président : Vanessa LOLLIVIER, enseignant-chercheur au sein de l'UMR PEGASE, L'Institut Agro Rennes-Angers

Maîtres de stage : Amélie FISCHER et Julien JURQUET, responsables de projets à l'Institut de l'Élevage

Enseignant référent : Yannick LE COZLER, enseignant-chercheur au sein de l'UMR PEGASE, L'Institut Agro Rennes-Angers

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Jocelyne FLAMENT, enseignant-chercheur au sein de l'UMR PEGASE, L'Institut Agro Rennes-Angers

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Remerciements

Je tiens à remercier très chaleureusement mes deux maîtres de stage, Amélie FISCHER et Julien JURQUET, pour l'accompagnement tout au long de ce stage et la confiance qu'ils m'ont très vite accordée. Grâce à leur accueil et leur bienveillance, je me suis très vite sentie entourée et intégrée dans le projet de mon stage.

Je souhaite également remercier toute l'équipe de la ferme expérimentale des Trinottières (49) avec laquelle j'ai travaillé dans le cadre de mon stage : Benoît V., Denis, Hervé, Benoît D., Paul, Camille et Antonin. Merci à tous pour l'accueil que vous m'avez réservé, pour votre disponibilité malgré votre quotidien très chargé, et pour toutes les informations techniques que vous m'avez apportées. Je remercie plus particulièrement Lucile OBLE, qui m'a fait découvrir la ferme expérimentale des Trinottières, m'a accompagnée pendant toute la période expérimentale et même après, et qui a toujours pris le temps de répondre à mes demandes, même les moins anticipées.

Merci à Raphaël BORE pour son aide et son accompagnement sur la logistique des GreenFeed®, sur le suivi des mesures de méthane et sur la mise en forme des données recueillies.

Merci à Laure BRUN-LAFLEUR et Guillaume CHEVALIER pour leur appui dans le traitement statistique et économique des résultats de l'essai.

Merci à toutes les personnes de l'UMT RIEL que j'ai rencontré, avec qui j'ai pu discuter, et devant qui j'ai pu présenter l'expérimentation réalisée lors de mon stage dans le cadre du projet Harpagon.

Un grand merci à tous mes collègues de l'Institut de l'Élevage à l'antenne de Beaucozé, qui m'ont réservé un accueil très chaleureux et ont su me mettre à l'aise dès le début de mon stage. Merci pour les journées égayées par votre bonne humeur pendant les pauses et les repas.

Enfin, merci à Yannick LE COZLER, qui m'a fait confiance pour ce stage et m'a laissée en autonomie, mais qui a toujours su se rendre disponible pour répondre à mes questions, à toute heure de la journée. Merci Yannick pour ta bienveillance, tes encouragements, et toutes les discussions que nous avons pu avoir.

Merci énormément à vous tous !

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des annexes

Introduction.....	1
I. État de l’art.....	1
1. Gestion de l’alimentation des vaches laitières en France.....	1
a. Les principes de rationnement des vaches laitières.....	1
b. Des méthodes d’alimentation basées sur un objectif de production laitière.....	2
i. La ration complète.....	2
ii. La ration semi-complète.....	2
iii. Des méthodes de distribution différentes pour un même résultat.....	3
c. L’alimentation individualisée, un moyen d’intégrer la variabilité interindividuelle au sein d’un troupeau ?.....	3
2. Des outils de phénotypage permettant le développement d’une alimentation individualisée.....	4
a. Des instruments de mesures quantitatives disponibles pour personnaliser l’alimentation des vaches laitières.....	4
b. L’enjeu du croisement des données : prérequis pour une alimentation individualisée.....	5
c. Les obstacles à l’adoption des outils de phénotypages automatisés.....	5
3. Les enjeux de l’alimentation de précision.....	5
a. Un concept avec une diversité de définitions.....	5
b. Ajuster l’alimentation aux besoins de chaque individu.....	6
c. Améliorer le rendement marginal alimentaire des exploitations.....	7
d. Une volonté de réduire l’impact environnemental de l’élevage.....	8
II. Matériel et méthodes.....	10
1. Le schéma expérimental.....	10
a. Détermination des profils de réponses durant la période pré-expérimentale.....	11
b. Allotement.....	12
2. Composition des rations alimentaires et plans de complémentation.....	12
a. Rations distribuées à l’auge.....	12
b. Plans de complémentation généraux.....	12
i. Lot Harpagon.....	12
ii. Lot TemoinRC.....	12
iii. Lot TemoinRSC.....	12
3. Mesures et suivi réalisés.....	13
a. Ingestion.....	13
b. Quantité et composition du lait.....	13
c. Poids vif et état corporel.....	13
d. Mesures des émissions de méthane entérique.....	14
e. Suivi sanitaire.....	14
4. Traitement des données.....	14
a. Procédure de nettoyage des données.....	14

b. Analyses des données.....	14
i. Comparaison des résultats moyens par lot.....	14
ii. Différences de variabilité individuelle des réponses entre les lots.....	16
iii. Valeur ajoutée de la caractérisation du profil de réponses à une réduction en concentré de production.....	16
III. Résultats.....	16
1. Effet du mode d'allocation du concentré de production sur les performances zootechniques et économiques moyennes de chaque lot.....	16
2. Différences des réponses individuelles entre les lots.....	17
a. Description des courbes individuelles d'ingestion de concentré de production...	17
b. Description des courbes individuelles d'ingestion de la ration de base.....	18
c. Description des courbes individuelles de production laitière.....	18
d. Description des courbes individuelles de poids vif.....	18
3. Différences de performances entre lots pour un même profil de réponse à une réduction en concentrés.....	19
a. Description du profil de réponse Auge+.....	19
b. Description du profil de réponse Auge++.....	19
c. Description du profil de réponse Lait0.....	20
d. Description du profil de réponse Lait-.....	20
IV. Analyse et discussion.....	21
1. Des performances de production et d'ingestion comparables entre les lots Harpagon et TemoinRSC malgré des stratégies d'allocation individuelle du concentré de production différentes.....	21
2. La stratégie d'alimentation de précision favorable à des profils de vaches capables de compenser à l'auge et/ou de maintenir leur production laitière.....	22
3. Des résultats de performances de production et d'ingestion proches entre la stratégie d'alimentation de précision et la ration complète.....	23
4. Une preuve de concept réalisée mais un intérêt limité.....	23
Conclusion.....	24
Bibliographie.....	26
Annexes.....	33

Liste des abréviations

CASDAR : Compte d'Affectation Spéciale « Développement Agricole et Rural »

CP_{DAC} : Concentré de Production

DAC : Distributeur Automatique de Concentrés

ENL : Énergie Nette exportée dans le Lait

Ha : hectare

MS(I) : Matière Sèche (Ingérée)

NDF : *Neutral Detergent Fibre* (Fibre Détergente Neutre)

NEC : Note d'État Corporel

PDI : Protéines Digestibles dans l'Intestin grêle

PL : Production Laitière

PV : Poids Vif

RFID : *Radio Frequency Identification* (Radio-identification)

TB : Taux Butyreux

TP : Taux Protéique

UFL : Unité Fourragère Lait

VL : Vache Laitière

Liste des figures

Figure 1 : Ration moyenne des vaches laitières en France en 2022, exprimée en % de Matière Sèche de la ration (issu de CNIEL, 2023)

Figure 2 : Performances de 3 vaches primipares alimentées avec une ration complète et unique de la 3^{ème} à la 34^{ème} semaine de lactation avec des caractéristiques initiales identiques, recueillies en 2016 à la ferme des Trinottières (CA 49) dans le cadre du projet ANR Deffilait (d'après Minéry et al., 2017)

Figure 3 : Suivi de la Note d'État Corporel (NEC) de 3 vaches primipares de la ferme expérimentale des Trinottières (CA 49) en 2016, alimentées avec la même ration complète sur l'ensemble de la durée expérimentale (issu de Minéry *et al.*, 2017 ; projet ANR Deffilait)

Figure 4 : Principales étapes de l'utilisation de l'énergie de la ration par les vaches laitières (adapté de INRA, 2018)

Figure 5 : Schéma expérimental

Figure 6 : Classement des vaches laitières d'après leur profil de réponses à une diminution du niveau de concentrés

Figure 7 : Courbes d'évolutions moyennes et individuelles d'ingestion de CP_{DAC} des vaches de chacun des 5 groupes identifiés (A, B, C, D et E)

Figure 8 : Courbes d'évolutions moyennes et individuelles d'ingestion de la ration de base des vaches de chacun des 4 groupes identifiés (A, B, C, et D)

Figure 9 : Courbes d'évolutions moyennes et individuelles de production laitière des vaches de chacun des 5 groupes identifiés (A, B, C, D et E)

Figure 10 : Courbes d'évolutions moyennes et individuelles de poids vif des vaches de chacun des 5 groupes identifiés (A, B, C, D et E)

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats d'études sur les effets du mode de distribution de la ration sur la production laitière

Tableau 2 : Paramètres à suivre et outils existants pour faire de l'alimentation individualisée en élevage bovin laitier

Tableau 3 : Composition et caractéristiques nutritionnelles des rations de base distribuées à l'auge

Tableau 4 : Caractéristiques des vaches laitières des trois lots à l'allotement (**moyenne** ± *écart-type*)

Tableau 5 : Plan de complémentation général des vaches du lot Harpagon au cours de la période expérimentale

Tableau 6 : Plan de complémentation général des vaches du lot TemoinRSC au cours de la période expérimentale

Tableau 7 : Répartition des vaches au sein des profils de réponses déterminés suite au challenge alimentaire

Tableau 8 : Moyennes ajustées de l'ingestion, des performances et des événements sanitaires par lot expérimental (TemoinRC, TemoinRSC et Harpagon) sur la période expérimentale

Tableau 9 : Résultats économiques par lot expérimental (TemoinRC, TemoinRSC et Harpagon) sur la période expérimentale

Tableau 10 : Moyennes ajustées des ingestions et performances zootechniques des trois lots expérimentaux (TemoinRC, TemoinRSC, Harpagon) sur la période expérimentale pour les profils de réponse Lait0, Lait-, Auge+ et Auge++ caractérisés lors de la phase pré-expérimentale de réduction de l'apport en concentrés de production.

Tableau 11 : Résultats de simulation des performances économiques des profils de réponse Lait0 et Auge++ pour les vaches des lots TemoinRSC et Harpagon d'après les résultats zootechniques expérimentaux (simulation pour 70 vaches sur 245 jours de lactation).

Liste des annexes

Annexe I : Composition du concentré de production

Annexe II : Dynamiques d'évolution des courbes moyennes des lots pour l'ingestion du concentré de production (A), de la ration de base (B), de la ration totale (C), la production laitière (D), l'énergie nette exportée dans le lait (E), le poids vif (F) et la note d'état corporel (G) sur l'ensemble de l'essai

Annexe III : Boîtes à moustache des variables mesurées lors de l'essai (ingestion de la ration de base (A), ingestion du concentré de production (B), ingestion totale (C), production laitière (D), taux butyreux (E), taux protéique (F), lactose (G), énergie nette exportée dans le lait (H), poids vif (I), note d'état corporel (J)) pour chacun des lots

LA RATION MOYENNE ANNUELLE DES VACHES LAITIÈRES EN FRANCE

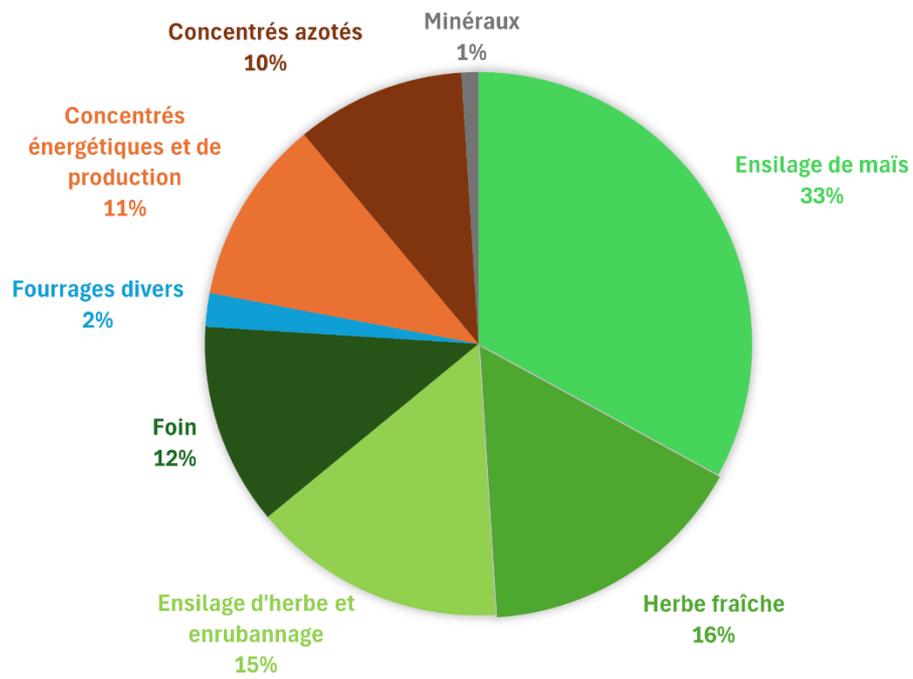


Figure 1 : Ration moyenne des vaches laitières en France en 2022, exprimée en % de Matière Sèche de la ration (issu de CNIEL, 2023)

Introduction

En élevage bovin lait, le poste alimentaire compte pour plus de la moitié des charges opérationnelles, et les concentrés représentent la quasi-totalité des achats d'aliments non produits sur l'exploitation (Institut de l'Élevage, 2022a). Ces aliments concentrés, lorsqu'ils sont mal valorisés par les animaux, peuvent entraîner des rejets importants dans l'environnement (Dollé *et al.*, 2013). Il y a donc de réels enjeux, économique et environnemental, à piloter plus précisément l'alimentation des vaches laitières. Aujourd'hui, les vaches laitières sont principalement nourries avec une ration de composition unique, qui peut être ajustée individuellement selon le niveau de production laitière, en ajustant la quantité de concentrés distribuée (INRA, 2018). Le déploiement des outils de phénotypage à haut débit et de pilotage de l'alimentation en élevage (Chastand-Maillard et Saint-Dizier, 2016) permettrait de gagner en précision dans l'alimentation des vaches laitières en individualisant davantage les rations et ainsi mieux couvrir les besoins individuels de chaque animal. Jusqu'à présent, la voie d'une alimentation basée sur le profil propre de l'animal a été peu explorée. Pour connaître les avantages d'une alimentation individualisée, il est nécessaire d'identifier les postes sur lesquels elle pourrait avoir un impact, et ensuite tester et comparer cette méthode avec les pratiques d'alimentation utilisées aujourd'hui. C'est l'objectif du projet CASDAR Harpagon, qui vise à développer et tester un nouveau mode d'allocation individualisée du concentré en tenant compte des objectifs de l'éleveur et du contexte technico-économique et environnemental de l'élevage (Fischer et Jurquet, 2023). L'allocation du concentré serait basée sur le niveau de réponse de chaque vache des trois principaux leviers d'adaptation à une variation de l'apport en concentrés : la consommation de la ration de base à l'auge, la variation des réserves corporelles et la variation de synthèse du lait.

I. État de l'art

1. Gestion de l'alimentation des vaches laitières en France

Les vaches laitières sont des ruminants dont l'alimentation est principalement composée de fourrages (Devun et Guinot, 2012). En France, les fourrages représentent en moyenne 78 % de la matière sèche (MS) de la ration des vaches laitières (Figure 1 ; CNIEL, 2023). Ces fourrages ne sont pas toujours suffisants pour couvrir l'ensemble des besoins d'une vache laitière. L'apport de fourrages est donc souvent complété par des aliments concentrés, énergétiques et/ou azotés, et des compléments minéraux-vitaminiques (INRA, 2018). En France, la part de concentrés dans la ration des vaches laitières s'élève en moyenne à 21 % de la matière sèche (Figure 1 ; CNIEL, 2023), variant de 208 à 275 g par litre de lait produit (Institut de l'Élevage, 2022b).

a. Les principes de rationnement des vaches laitières

En France, le rationnement des vaches laitières s'appuie sur le système national d'alimentation des ruminants (INRA, 2018). Le rationnement y est défini comme étant « *l'art de combiner différentes ressources alimentaires disponibles afin de satisfaire en partie ou totalement les besoins des animaux* ». L'objectif final de la ration est de satisfaire au mieux les besoins associés aux dépenses non productives et productives de la vache laitière (énergie, protéines et minéraux ; INRA, 2018). Les dépenses non productives regroupent essentiellement

son besoin d'entretien, caractérisé par le besoin pour couvrir son activité physique et entretenir son état corporel et poids vif. Les besoins de production reposent sur la synthèse de lait, la gestation et la variation de ses réserves corporelles. Les apports alimentaires sont ensuite définis pour satisfaire l'ensemble de ces besoins. Pour cela, l'animal est caractérisé par sa capacité d'ingestion, exprimée en Unité d'Encombrement (UE), propre à chaque individu et variable au cours de sa vie selon l'évolution de ses besoins. Les quantités ingérées dépendent de cette capacité d'ingestion de l'animal, et de la valeur d'encombrement de la ration offerte.

Un troupeau se compose d'animaux de stades physiologiques différents, et donc de besoins d'entretien, de gestation et de production hétérogènes. Dans ces conditions, il faudrait, idéalement, calculer autant de rations que d'animaux présents pour couvrir leurs besoins respectifs. Cependant, préparer et distribuer individuellement des rations complètes impose une infrastructure, qui pour l'instant n'est pas accessible en élevage commercial. Sur le terrain, le calcul de ration est plutôt pratiqué pour formuler une ration identique pour l'ensemble du troupeau, qui couvre les besoins d'un animal moyen, représentant au mieux le cheptel. Il est possible de faire varier les modalités d'allocation du concentré, du collectif à l'individu, avec une évolution constante ou variable au cours de la lactation (INRA, 2018).

b. Des méthodes d'alimentation basées sur un objectif de production laitière

En France, il existe deux modes majoritaires de distribution des rations : la ration complète et la ration semi-complète. La ration complète consiste à formuler et distribuer la même ration à tous les animaux d'un même lot (INRA, 2018). La ration semi-complète, aussi adoptée en France, est constituée d'une ration équilibrée, dite « de base », distribuée à l'auge pour tous les animaux, et pour certaines vaches, un complément de concentrés est apporté de manière individuelle (INRA, 2018).

i. La ration complète

La ration complète est la pratique d'alimentation des vaches laitières la plus utilisée dans le monde depuis sa conception (Singh *et al.*, 2022). Cette pratique permet de simplifier la distribution de la ration, puisqu'une seule ration est formulée et distribuée chaque jour (Perreau, 2021). Ce mode de distribution assure une concentration de la ration quasi-constante dans le temps, garantissant une certaine stabilité pour les micro-organismes du rumen (Singh *et al.*, 2022). En pratique, la ration est calculée pour un troupeau, voire un groupe, dans le but d'atteindre un objectif moyen de production. Dans ce cas, les individus avec des besoins plus importants que les besoins de l'animal cible utilisé pour formuler la ration risquent d'être sous-alimentés alors que ceux avec des besoins plus faibles risquent d'être suralimentés (INRA, 2018).

ii. La ration semi-complète

La formulation de la ration semi-complète se fait en deux temps. D'abord, une ration de base est établie, avec l'ensemble des fourrages et une partie des concentrés, sur la base d'un objectif de production moyenne du troupeau ciblé. Ensuite, un apport individuel en concentrés est défini en supplément de la ration de base (Perreau, 2021). Ce mode de rationnement permet théoriquement d'ajuster les apports plus finement aux besoins individuels. La quantité de con-

Tableau 1 : Résultats d'études sur les effets du mode de distribution de la ration sur la production laitière

Source	Effectif	Durée de l'étude	Nombre de traitements	Quantité de concentrés distribuée	Fourrages à volonté	Résultats
Purcell <i>et al.</i> (2016)	88 vaches Holstein multipares	2 ^{ème} à 21 ^{ème} semaine de lactation	4 (3 en ration semi-complète, 1 en ration complète)	Iso-concentrés (1 760 kg/vache)	Oui	Pas de différence significative de production entre les 4 modes de distribution du concentré (40,5 ± 1,2 kg de lait/j en moyenne)
INRA (2018)	Simulations avec le système d'alimentation INRA 2018	20 premières semaines de lactation	4 (3 en ration semi-complète, 1 en ration complète)	Iso-concentrés (870 kg MS/vache)	Non précisé	Pas de différence significative de production entre les 4 modes de distribution du concentré (38 ± 0,2 kg de lait/j en moyenne)
Benchaar et Hassanat (2021)	16 vaches Holstein multipares	2 périodes de 35 jours, à partir de la 6 ^{ème} semaine de lactation	2 (1 en ration semi-complète, 1 en ration complète)	Iso-concentrés (concentrés distribués à un ratio fourrages:concentrés de 52,5:47,5)	Oui	Pas de différence significative de production entre les 2 modes de distribution du concentré (45,5 ± 0,4 kg de lait/j en moyenne)

-centré supplémentaire est le plus souvent déterminée en fonction de la production laitière et/ou du stade de lactation de l'animal afin d'optimiser ses performances laitières. Ce concentré peut être distribué en salle de traite, à l'auge, ou par des Distributeurs Automatiques de Concentrés (DAC, individuels ou intégrés au robot ; Wolter et Ponter, 2019).

iii. Des méthodes de distribution différentes pour un même résultat

La comparaison de ces différents modes de formulation de ration en condition iso-concentrée ne semble pas faire ressortir plus d'avantages à formuler une ration semi-complète, tant au niveau des performances de production laitière que des émissions de rejets azotés et de méthane (Tableau 1 ; Benchaar et Hassanat, 2021). La ration semi-complète, qui devrait permettre de meilleures performances de production laitière par rapport à un rationnement plus simplifié (INRA, 2018), ne procure en fait pas une production plus forte lorsque les modalités de concentrés totaux distribués sont équivalentes. Cassel *et al.* (1984) avaient mesuré, sur 68 semaines, une production laitière plus importante de 3,3 kg par jour pour des vaches nourries en ration semi-complète. Cependant, ce même lot avait consommé 1,3 kg de concentrés en MS par jour supplémentaire. Il n'est donc pas possible dans ce cas de conclure sur l'impact du mode de distribution du concentré.

c. L'alimentation individualisée, un moyen d'intégrer la variabilité interindividuelle au sein d'un troupeau ?

Chaque animal a des besoins alimentaires différents, qui dépendent de sa condition (âge, poids vif, activité, stade de lactation, niveau de production, génétique)(Van Empel *et al.*, 2016). Si en théorie le système de rationnement considère qu'à mêmes niveaux de besoins les apports alimentaires, et donc les consommations alimentaires, devraient être identiques ; en pratique, des différences de consommation de la ration sont observées entre individus (Fischer, 2017).

Par exemple, la comparaison de trois vaches primipares alimentées avec la même ration complète sur une partie de la lactation (3^{ème} à 34^{ème} semaine de lactation) montre des productions laitières moyennes similaires sur la lactation mais des variations de consommation alimentaire, de poids vif et d'état corporel alors que leurs poids vifs étaient similaires en début d'expérimentation (Figure 2 et 3 ; Minéry *et al.*, 2017). Après 34 semaines de lactation, ces 3 vaches se sont démarquées individuellement sur la quantité de matière sèche ingérée (moins d'ingestion de matière sèche pour la VL3) et sur l'évolution de l'état corporel (gain d'état pour la VL1). Bien que la production laitière moyenne des 3 vaches soit proche sur les 32 semaines d'expérimentation, les résultats sur cet échantillon d'animaux mettent en avant des différences de besoins, autres que productifs. Les différences de consommation de la ration à besoins de production identiques peuvent être expliquées par des différences individuelles en matière de comportement alimentaire, d'activité physique, de température du rumen, de variations des réserves corporelles, ainsi que de digestibilité de la ration (Fischer *et al.*, 2018).

Une alimentation individualisée pourrait permettre de prendre en compte les différences d'ingestion de la ration, pour un même niveau de besoins (lactation, croissance, gestation, entretien). On pourrait ainsi répondre aux besoins de chaque individu en prenant en compte sa capacité à valoriser sa ration pour la production laitière, sans détériorer ses autres fonctions physiologiques (Minéry *et al.*, 2017). Cette individualisation de l'alimentation ne pourra passer que par l'utilisation de technologies, qui permettront d'abord de phénotyper les animaux, puis

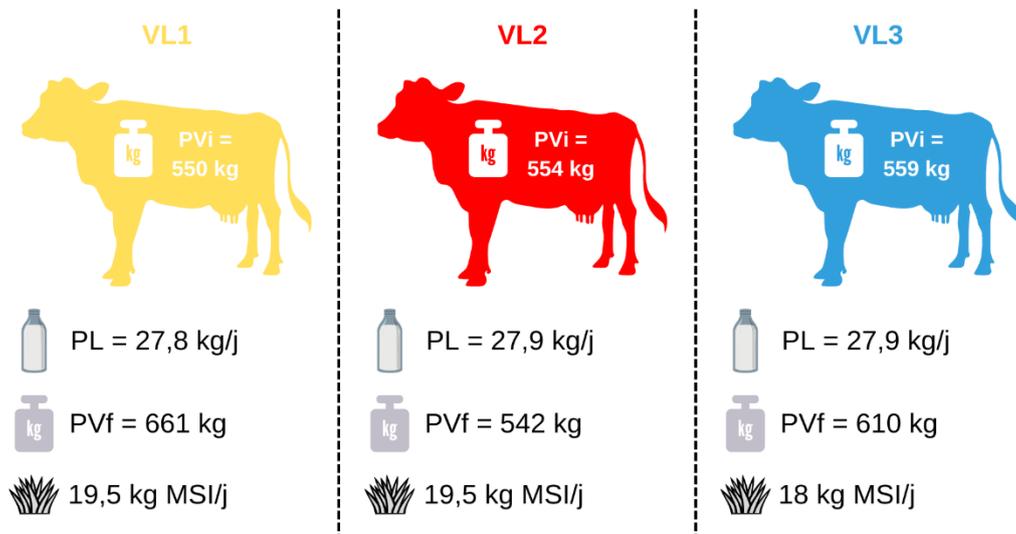


Figure 2 : Performances de 3 vaches primipares alimentées avec une ration complète et unique de la 3^{ème} à la 34^{ème} semaine de lactation avec des caractéristiques initiales identiques, recueillies en 2016 à la ferme des Trinottières (CA 49) dans le cadre du projet ANR Deffilait (d'après Minéry *et al.*, 2017)

VL : Vache Laitière / PVi : Poids Vif initial / PL : Production Laitière / PVf : Poids Vif final / MSI : Matière Sèche Ingérée

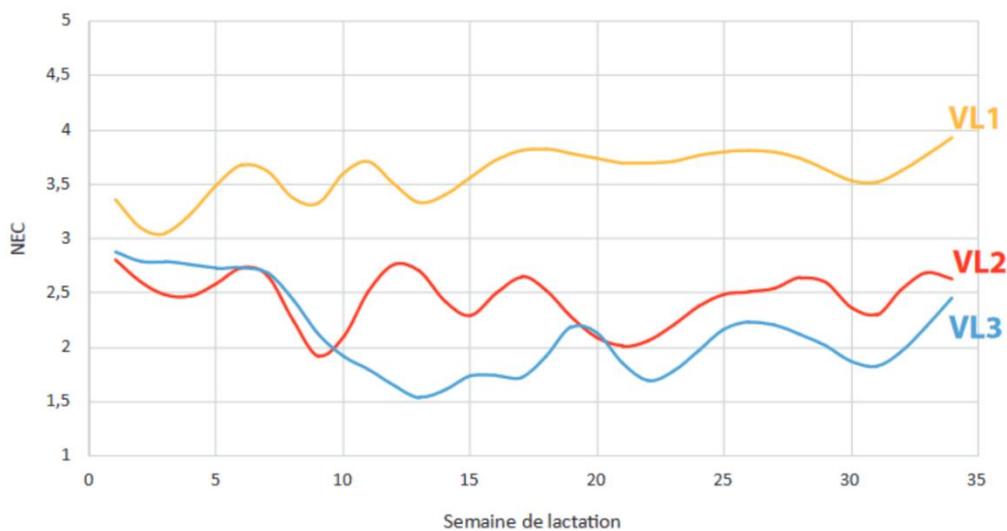


Figure 3 : Suivi de la Note d'État Corporel (NEC) de 3 vaches primipares de la ferme expérimentale des Trinottières (CA 49) en 2016, alimentées avec la même ration complète sur l'ensemble de la durée expérimentale (issu de Minéry *et al.*, 2017 ; projet ANR Deffilait)

de distribuer individuellement une ration ajustée au mieux sur leurs besoins (Minéry *et al.*, 2017).

2. Des outils de phénotypage permettant le développement d'une alimentation individualisée

a. Des instruments de mesures quantitatives disponibles pour personnaliser l'alimentation des vaches laitières

Afin d'individualiser l'alimentation des vaches laitières, il est nécessaire de caractériser à la fois les besoins et les apports alimentaires, ainsi que d'identifier l'animal par un système d'identification. Pour cela, de nombreux outils ont été développés pour permettre ce phénotypage à haut débit en vaches laitières.

Du côté des besoins figurent la synthèse de lait, en quantité et composition, les variations de réserves corporelles, l'entretien et la gestation. La quantité de lait produite est suivie par des compteurs à lait, présents chez 47,2 % des éleveurs laitiers enquêtés par Nicolas et Allain (2024, N = 856 ; Tableau 2) et est complétée par le suivi de la composition du lait via des analyseurs de lait qui équipent 25,6 % des mêmes enquêtés. La détermination de la composition du lait se fait grâce à l'analyse de spectres moyen infrarouge du lait. L'estimation des variations de réserves corporelles, généralement décrites par les variations de la Note d'État Corporel (NEC), a récemment été automatisée et rendu accessible sur le terrain grâce à l'utilisation de technologies d'imagerie 3D (Fischer *et al.*, 2015). Les besoins d'entretien reposent sur le poids vif de l'animal, qui peut être suivi grâce à une stalle de pesée. Cet équipement est actuellement présent chez 11,6 % des éleveurs bovins laitiers (Nicolas et Allain, 2024 ; N = 865).

Du côté des apports alimentaires figurent à la fois les quantités consommées par les animaux et la qualité des aliments distribués. La quantité d'aliments distribués peut être enregistrée et suivie manuellement ou par des dispositifs de pesée automatisés, soit intégrés dans les distributeurs de ration, soit aux DAC pour la totalité ou une partie des concentrés de la ration. La quantité d'aliments consommés est mesurée en faisant la différence de la quantité distribuée et celle non consommée avant la prochaine distribution. Pour les concentrés distribués au DAC, on considère que la quantité consommée correspond à celle qui a été distribuée. Aujourd'hui, 56,2 % des éleveurs bovins laitiers enquêtés possèdent un DAC (Nicolas et Allain, 2024 ; Tableau 2). Pour la consommation de la ration distribuée à l'auge, les auges sur pesons avec accès individuel et par identification électronique permettent d'en avoir un suivi continu et individuel. Il est aussi possible d'estimer la consommation de la ration distribuée à l'auge avec des auges individuelles accessibles par identification électronique, avec une vache par auge, en pesant chaque jour la quantité distribuée dans chaque auge et la quantité restante avant la distribution suivante. Ces deux options ne sont accessibles que pour les installations expérimentales car elles sont onéreuses et nécessitent une métrologie fréquente et un entretien poussé.

Le robot de traite, qui équipe 31,4 % des enquêtés en 2023 (Nicolas et Allain, 2024), est un équipement qui regroupe plusieurs technologies, capables de mesurer la distribution des concentrés, la production laitière, la composition du lait, le poids vif, et pour certains modèles, la NEC des animaux, de manière automatisée et à chaque traite. Ceci en fait donc un équipement particulièrement intéressant pour une application en alimentation individualisée. Contrairement au robot de traite, la plupart des équipements actuels ne permettent de suivre qu'un phénotype

Tableau 2 : Paramètres à suivre et outils existants pour faire de l'alimentation individualisée en élevage bovin laitier

Paramètres	Outils existants	Taux d'équipement en France ¹	Remarques
Identification électronique	Boucle électronique RFID Collier électronique RFID	18 % ²	Les colliers peuvent être remplacés par des boucles électroniques, qui servent à la fois à identifier les animaux au niveau national et aux automates
Apports alimentaires			
Quantité des apports	Distributeur Automatique de Concentrés Auge peseuse	56,2 % Uniquement en ferme expérimentale	Peut être intégré au robot de traite. Très onéreux, besoin de métrologie et entretien réguliers
Qualité des apports (Matières sèches et composition chimique)	Étuve Analyseur NIR portable		Délais d'étuvage Très onéreux pour un usage individuel, développé ailleurs en Europe ³ + qualité des estimations très variable selon les indicateurs
Besoins			
Performances laitières (Quantité et qualité)	Compteur à lait Analyseur de lait	47,2 % 25,6 %	Accessible en salle de traite ou au robot de traite. Accessible en salle de traite ou au robot de traite.
Entretien, croissance et/ou mobilisation des réserves corporelles	Stalle de pesée Caméra 3D	11,6 % 2,3 %	Équipement indépendant ou intégré au robot de traite. Équipement indépendant ou intégré au robot de traite.

¹Données issues de Nicolas et Allain (2024).

²Données issues de Duroy *et al.* (2023).

³D'après Bonneau (2024).

à la fois. Leur utilisation conjointe et coordonnée est un prérequis majeur pour pouvoir faire de l'alimentation à l'individu.

b. L'enjeu du croisement des données : prérequis pour une alimentation individualisée

L'intérêt grandissant des éleveurs pour les outils de phénotypage à haut débit se heurte à la problématique de la faible voire absence d'interopérabilité entre les outils, la plupart du temps mono service. Le manque d'interconnexion entre ces équipements a été cité comme une limite à leur utilisation par 70 % des éleveurs bovin laitier enquêtés (Nicolas et Allain, 2024 ; N = 856). Aujourd'hui, il existe des logiciels qui regroupent plusieurs informations mesurées grâce aux outils de la même marque présents dans l'élevage (DeLaval, 2024 ; Lely, 2024). Mais ils ne permettent pas encore de regrouper les données d'appareils de marques différentes. L'outil DataHub 360® a par exemple été développé pour répondre à cette problématique, en permettant de regrouper les données de la ferme, recueillies automatiquement ou renseignées manuellement, et les données du contrôle laitier sur la même interface (Estel, 2022). Cependant, les données semblent pour l'instant être principalement focalisées sur la reproduction, l'activité et les données de traite, sans intégrer des données d'ingestion. Or, c'est grâce à la fusion de l'ensemble de ces données sur un même support que l'alimentation des animaux pourra être pilotée plus finement, jusqu'à l'échelle individuelle.

c. Les obstacles à l'adoption des outils de phénotypage automatisés

La motivation des éleveurs à s'équiper en automates réside principalement dans le gain de temps et de confort de travail, car ils sont capables de remplacer l'éleveur sur certaines tâches (Nicolas et Allain, 2024). Même s'ils en ont la capacité, ces outils ne sont donc pas prioritairement adoptés pour faire du phénotypage, et le gain de temps obtenu sur certaines tâches est en fait réinvesti dans des nouvelles tâches telles que la maintenance d'appareils et l'analyse de données (Fagon et Hostiou, 2015). Ces nouvelles tâches peuvent faire augmenter la charge mentale chez certains éleveurs, avec des données nombreuses et complexes à traiter, surtout dans le cadre d'une alimentation individualisée. La complexité d'utilisation de nouveaux automates et capteurs a été mentionnée comme un frein à l'adoption par 23 % des éleveurs laitiers non équipés dans l'enquête de Nicolas et Allain (2024), en plus du manque d'interopérabilité précédemment mentionné (cf. I.2.c.).

Dans cette même enquête, le niveau d'investissement a été le frein le plus mentionné, à hauteur de 28 % des enquêtés non équipés qui ne souhaitent pas s'équiper à court ou moyen terme (Nicolas et Allain, 2024). Certains éleveurs considèrent que rien ne vaut le regard d'un professionnel, et donc ne voient pas l'intérêt de cet investissement à long terme. Ce résultat d'enquête montre un véritable besoin d'explication sur l'utilité des nouvelles technologies en élevage, à la fois en tant qu'automates capables de limiter le travail pénible et en tant qu'outils d'aide à la décision grâce à l'interprétation des données collectées (Eilyps, s.d.).

3. Les enjeux de l'alimentation de précision

a. Un concept avec une diversité de définitions

L'alimentation de précision n'a pas de définition universelle à l'heure actuelle ; elle est

plutôt définie en fonction des objectifs spécifiques de chaque personne. Un travail réalisé auprès d'éleveurs et conseillers dans le cadre du projet Harpagon (Igier *et al.*, 2023; Fischer *et al.*, 2023) a fait émerger une multitude de propositions. L'alimentation de précision représente pour certains une réduction du gaspillage alimentaire en « minimisant les pertes en concentrés », pour d'autres un moyen de mieux connaître les besoins nutritionnels des animaux et adapter l'alimentation à chaque individu, ou encore une alimentation qui inclut aussi l'optimisation de sous-catégories de nutriments tels que les acides aminés. Enfin, quelques-uns associent également la précision à des mesures et des analyses plus fréquentes, notamment la pesée (des aliments, des animaux) et l'appréciation de la valeur nutritionnelle des aliments.

D'un point de vue scientifique et général, des spécialistes à la Cornell Cooperative Extension du département du Delaware (E.-U. d'A.) ont défini l'alimentation de précision comme une alimentation qui fournit à l'animal des nutriments en quantité suffisante pour répondre à ses besoins, mais sans excès, à partir d'aliments produits localement, grâce à une gestion fine des ressources disponibles, en garantissant la durabilité économique et environnementale de l'exploitation (Cerosaletti et Dewing, 2008). La définition de Pomar *et al.* (2019) complète la précédente en ajoutant un aspect de respect du bien-être animal, en plus des aspects économiques et environnementaux, et d'adaptation de la ration au cours des différentes périodes de la vie de l'animal. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer précisément et fréquemment les besoins individuels des animaux, les nutriments présents dans les aliments et la formulation des rations grâce à des outils de suivi présents en élevage (Pomar *et al.*, 2019 ; cf. I.2.).

b. Ajuster l'alimentation aux besoins de chaque individu

L'utilisation d'une seule ration complète pour un troupeau entier, calculée d'après les besoins de la vache « moyenne » du cheptel et pour atteindre un objectif de production moyen, peut entraîner des risques de sous-alimentation, ou à l'inverse de suralimentation, d'une partie du troupeau (Van Empel *et al.*, 2016). Kalantari *et al.* (2016) ont montré qu'en distribuant une seule ration complète (formulée sur les besoins moyens en énergie du groupe) à un troupeau de 592 vaches, environ la moitié d'entre elles était sous-alimentée, car leurs besoins étaient supérieurs à ceux de la vache moyenne, et l'autre moitié suralimentée, car leurs besoins étaient inférieurs à ceux de la vache « moyenne ». En effet, en considérant une distribution gaussienne par rapport à l'animal moyen ciblé, la moitié du troupeau se situera au-delà de ses besoins, et l'autre en-deçà. En augmentant le nombre de groupes nutritionnels, la variabilité entre les vaches au sein du groupe a été réduite, ce qui a permis d'offrir aux vaches un régime au plus proche de leurs besoins individuels (Kalantari *et al.*, 2016).

En alimentant les individus selon leurs besoins théoriques et leurs apports alimentaires, il est possible d'approcher au mieux les besoins réels des animaux. (Morey *et al.*, 2023) ont montré qu'une complémentation individuelle basée sur un calcul dynamique des besoins et des apports (moyenne glissante sur 10 jours) permettait de produire autant de lait en quantité et en qualité qu'avec une ration complète, en consommant en moyenne moins de concentrés dans la ration et sans affecter le poids vif des animaux.

Fischer *et al.* (2020) ont montré qu'à même niveau de besoins, la réduction des apports alimentaires des vaches « moins efficaces » au même niveau que celui de leurs semblables plus efficaces n'a pas entraîné de diminution de leurs produits, en quantité et en qualité. Les

résultats de cette alimentation de précision par la restriction alimentaire montre qu'il est important d'ajuster la ration distribuée à chaque individu, pour qu'il la valorise au mieux tout en exprimant pleinement son potentiel.

c. Améliorer le rendement marginal alimentaire des exploitations

Sur la campagne laitière 2022-2023, le coût alimentaire de 2 238 élevages dans le bassin laitier Normand et Nord Pays de Loire représentait environ 69 % des coûts opérationnels des exploitations (Cerfrance, 2023). En élevage laitier, la loi des rendements décroissants s'applique : augmenter la production laitière, toutes choses égales par ailleurs, entraînera une diminution du rendement marginal alimentaire (Bach, 2014). En plus d'augmenter la production laitière, il faut aussi maîtriser les frais d'alimentation pour pouvoir augmenter sa marge sur coût alimentaire¹.

L'augmentation du nombre de lots d'alimentation, homogènes en besoins, est une pratique qui devrait amener à une amélioration du rendement marginal alimentaire car les apports correspondent mieux aux besoins de chaque individu (cf. I.3.b.). Ce type d'alimentation de précision par augmentation du nombre de lots d'alimentation profiterait surtout aux exploitations dont la taille du troupeau ne permet pas de bénéficier d'économies d'échelle, c'est-à-dire de moins de trois cents animaux (Bach, 2014). En pratique, l'augmentation du nombre de lots d'alimentation améliore effectivement la marge sur coût alimentaire, autour de 31-33 \$/vache/an au minimum, notamment lors du passage de un à deux lots (Kalantari *et al.*, 2016; Barrientos-Blanco *et al.*, 2020).

L'alimentation de précision peut aussi conduire à diminuer la consommation de ressources alimentaires, sans détériorer les fonctions productives et non productives. Certaines vaches, dites « moins efficaces » dans un troupeau, consomment plus d'aliments que leurs congénères qui ont pourtant un même niveau de besoins. Même en faisant exactement correspondre les apports avec les besoins de chaque vache, certaines vont surconsommer « naturellement », sans pour autant produire plus. Dans l'étude de Fischer *et al.* (2020), l'alimentation de précision a permis de couvrir les besoins de chaque vache, mais aussi d'éviter les surconsommations alimentaires en maintenant les niveaux de production. Ce type d'approche permettrait donc d'aboutir à une réduction de la consommation alimentaire des vaches moins efficaces en maintenant les produits, c'est-à-dire d'améliorer la marge sur coût alimentaire.

L'amélioration de la marge sur coût alimentaire bien qu'importante pour l'optimisation économique de l'atelier de production laitière ne semble pas primordiale pour les éleveurs, comme en témoigne la faible adoption des solutions proposées sur le terrain. Le module d'alimentation développé par Lely (Dynamic Linear Model ; Lely Center Holsworthy, 2021) pour piloter individuellement l'apport en concentrés au DAC et améliorer la marge sur coût alimentaire du troupeau a été peu adopté en France. Ce modèle permet de déterminer une quantité de concentrés apportés individuellement selon un optimum économique défini à partir du produit lait et de fait de l'alimentation. L'apport en concentrés est redéfini chaque jour, en fonction de la variation de production laitière de chaque vache et de la marge économique : la distribution de concentrés continue d'augmenter (de baisser) tant que la vache augmente (diminue) sa production laitière suite à une augmentation des apports en concentrés, et tant que

¹ Marge sur coût alimentaire = recette laitière – dépenses alimentaires.

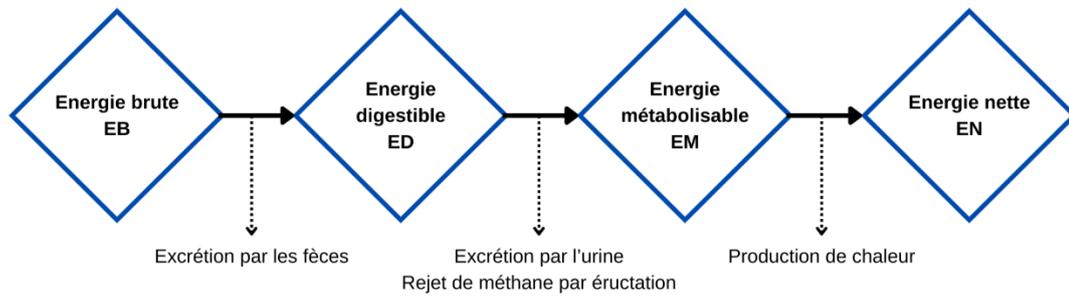


Figure 4 : Principales étapes de l'utilisation de l'énergie de la ration par les vaches laitières (adapté de INRA, 2018)

la marge économique augmente (André *et al.*, 2010). L'utilisation de cet outil conduit à des évolutions de consommation de concentrés très variables selon la situation initiale, et peut entraîner une baisse de la production laitière. Ainsi, un système initial plutôt économe en concentrés tendra à consommer plus de concentrés avec ce module, et inversement pour un système initialement fort consommateur en concentrés (André *et al.*, 2010).

Bien qu'il améliore la marge sur coût alimentaire de l'atelier laitier, ce dispositif n'a pas été adopté par les éleveurs français pour plusieurs raisons : la mise en place d'une pratique nouvelle et pilotée par ordinateur (cf. I.2.c.) ; le manque de transparence et compréhension du modèle (cf. I.2.c.) ; la potentielle perte de production et le besoin de mettre à jour fréquemment les indicateurs économiques pour éviter les dérives. Par ailleurs, ce module ne se base que sur la variation de production laitière en réponse à une variation d'apport en concentré sans prendre en compte les autres leviers majeurs mobilisés tels que la variation individuelle de consommation de la ration à l'auge et la mobilisation des réserves corporelles (Minéry *et al.*, 2017; Fischer *et al.*, 2018). Ce type d'approche devrait donc non seulement être plus transparent et compréhensible par les utilisateurs finaux mais en plus intégrer l'ensemble des leviers mobilisables par la vache pour répondre à une variation des apports alimentaires pour être au plus proche de la réalité.

d. Une volonté de réduire l'impact environnemental de l'élevage

L'alimentation de précision ou plus individualisée apporte les aliments en quantité et qualité sans excès ni défaut pour couvrir les besoins de chaque animal avec une adaptation au cours du temps. En adaptant les apports exactement aux besoins de chaque individu, la valorisation des aliments devrait être optimale et les rejets vers l'environnement réduits. Pour un élevage bovin laitier, les principaux rejets environnementaux proviennent d'une part des fermentations entériques, dont les émissions de méthane, qui sont le plus gros poste d'émission de Gaz à Effet de Serre (GES), et d'autre part les rejets azotés (Dollé *et al.*, 2015). La synthèse de méthane entérique est très corrélée à la consommation alimentaire des animaux et au pourcentage de concentrés dans la ration (Sauvant *et al.*, 2011). De la même manière, les rejets azotés, qui découlent du processus métabolique de valorisation de la ration (Figure 4 ; INRA, 2018), sont largement déterminés par l'alimentation. L'alimentation de précision pourrait, dans ces deux cas, limiter les rejets dans l'environnement.

Une alimentation plus individualisée contribue à réduire les émissions de méthane entérique et les rejets azotés. En effet, la mise en place d'une ration complète individuelle, adaptée aux besoins individuels chez des vaches, a réduit les émissions de méthane entérique par kilo de lait produit de l'ordre de 10 à 20 % par rapport à une ration complète unique (Garg *et al.*, 2013). Par ailleurs, étant donné le lien entre les émissions de méthane entérique et le ratio concentrés/fourrages de la ration (Sauvant *et al.*, 2011), un pilotage plus fin de ce ratio pourrait réduire les émissions de méthane entérique. Avec une ration à moins de 77 % de fourrages, il serait possible de diminuer les rejets de méthane entérique (Sauvant *et al.*, 2011). Or, avec des niveaux de ratios fourrages/concentrés dans la ration, le risque de gaspillage des ressources, notamment l'azote, est plus important. En effet, les apports azotés augmentent en proportion dans la ration avec l'apport plus important de concentrés, et risquent d'être supérieurs aux besoins de l'animal.

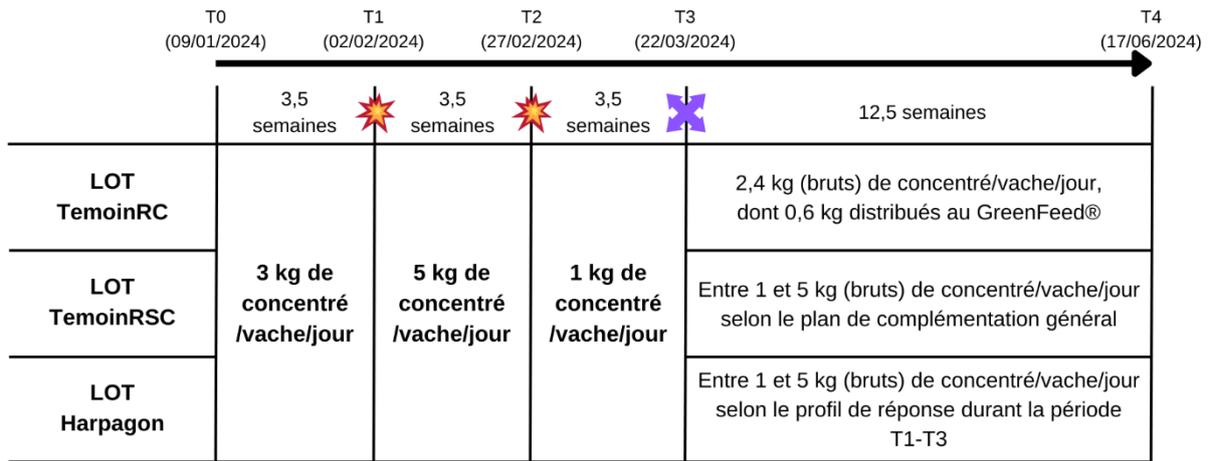
Un apport en protéines brutes supérieur aux besoins de l'animal n'améliore pas l'absorption d'acides aminés par l'animal et donc le rendement PDI² (Cutullic *et al.*, 2013; Van Empel *et al.*, 2016). Le surplus sera alors perdu dans les urines, et donc dans l'environnement (Van Empel *et al.*, 2016). À l'inverse, une sous-alimentation azotée peut entraîner des rejets de méthane plus importants dans l'air (Dijkstra *et al.*, 2011). Une alimentation par lots tend à améliorer le rendement azote du lait (27,1 %) par rapport à une ration unique (26,6% ; Kalantari *et al.*, 2016). Par ailleurs, la comparaison d'une ration complète avec une allocation individuelle du concentré sur 21 jours montre une différence significative de la quantité d'azote dans les urines, avec 196 g/jour pour une ration complète contre 140 g/jour pour une allocation individuelle du concentré (Morey *et al.*, 2023).

Avec cet état des connaissances et pratiques, nous avons donc constaté que la ration des vaches laitières était soit sous forme d'une ration complète unique satisfaisant les besoins de l'animal moyen, soit sous forme de ration semi-complète dont l'allocation du concentré repose souvent sur la production laitière et le stade de lactation de la vache. La plus-value zootechnique, économique ou environnementale de cette pratique de ration semi-complète indexée sur la production laitière et le stade de lactation n'a pour l'instant pas été prouvée par rapport à une ration complète, lorsque la seule différence est le mode d'allocation du concentré et non les quantités. Ces modes d'allocation individualisée du concentré reposent pour la plupart sur la synthèse de lait, sans prendre en compte les autres leviers mobilisés par la vache pour répondre à une variation des apports de concentrés : la variation de consommation de la ration de base et de réserves corporelles.

Nous avons aussi vu que l'individualisation de l'alimentation ne pourra se faire que par le phénotypage, à la fois des apports alimentaires et des besoins. Cela est aujourd'hui possible en élevage commercial grâce à des équipements connectés et automatisés. Cependant, ces outils sont principalement adoptés car ils permettent de gagner du temps, d'automatiser des pratiques déjà existantes, et non pour faire spécifiquement du phénotypage et de l'alimentation individualisée.

Pour évaluer les bénéfices d'une allocation individualisée du concentré, il semble primordial de prendre en compte l'ensemble des leviers zootechniques mobilisés par la vache pour répondre à une variation de l'apport en concentrés (consommation de la ration de base, réserves corporelles et synthèse de lait). Par ailleurs, le développement d'un tel outil et son adoption par les éleveurs et conseillers nécessitera de créer des outils faciles à utiliser, minimisant la fréquence de mise à jour des paramètres, dont la méthodologie soit transparente et compréhensible. C'est dans cette optique que s'inscrit le projet CASDAR HARPAGON (Fischer et Jurquet, 2023) dont l'objectif est de développer et faire la preuve d'un concept d'allocation du concentré de production indexé sur le profil de réponses de chaque vache sur les trois leviers mobilisables à une baisse de l'apport en concentré et sur les objectifs de l'éleveur. Ce concept est développé avec les utilisateurs finaux et à partir de technologies déjà disponibles en élevage commercial pour faciliter son adoption.

² Rendement PDI (Protéines Digestibles dans l'Intestin grêle) = matière protéique du lait / (PDI permises par l'énergie de la ration ingérées – besoins PDI pour la croissance et l'entretien)



 Changement de niveau de concentré de production distribué au GreenFeed® pour toutes les vaches

 Allotement

Figure 5 : Schéma expérimental

Lot TemoinRC : lot témoin en ration complète / Lot TemoinRSC : lot témoin en ration semi-complète / Lot Harpagon : lot expérimental

L'objectif de ce stage s'inscrit dans le cadre de la dernière action du projet qui consiste à faire la preuve du concept en faisant une analyse comparative sur les plans zootechnique et économique du concept développé dans le projet avec les deux modes d'alimentation standard en vaches laitières : la ration complète et la ration semi-complète indexée sur la production laitière. Pour y répondre, le stage s'appuiera 1/ sur la mise en place et le suivi d'une expérimentation en ferme expérimentale laitière mettant en œuvre les trois approches en parallèle pour collecter les données nécessaires et 2/ sur l'analyse des données issues de cet essai.

L'essai mis en place à la SAS Ferme Expérimentale laitière des Trinottières (CA 49) avait deux objectifs :

- Mettre en œuvre le concept d'alimentation de précision tel que défini dans le projet Harpagon. Ce concept est basé sur le principe de la ration semi-complète et indexe l'apport individuel en concentré de production de chaque vache sur son profil de variation de lait et d'ingestion à l'auge suite à une réduction de l'apport en concentré de production
- Comparer sur les plans zootechnique, environnemental et économique le concept d'alimentation de précision du projet Harpagon avec deux modes d'alimentation classiques adoptés en fermes commerciales, la ration complète et la ration semi-complète. La question est donc de savoir si, pour une même quantité de concentré de production disponible, la stratégie d'allocation du concentré a un effet ou non sur les performances zootechnique, économique et environnementale.

À cet effet, deux niveaux d'approche d'allocation du concentré ont été comparés : l'allocation individuelle de l'apport en concentré de production en ration semi-complète et le niveau d'individualisation de l'allocation du concentré de production. La première approche vise à comparer une alimentation conduite en ration semi-complète dont l'allocation individuelle du concentré de production est soit indexée sur la PL comme en ferme commerciale (approche TemoinRSC), soit indexée sur le profil de réponses à une réduction de l'apport en concentré de production durant une période de référence (approche Harpagon). La seconde approche vise à comparer une alimentation conduite en ration complète, c'est-à-dire où le concentré de production est apporté dans la ration mélangée à l'auge et dans des proportions identiques pour toutes les vaches (approche TemoinRC), avec une alimentation conduite en ration semi-complète (approches TemoinRSC et Harpagon).

II. Matériel et méthodes

1. Le schéma expérimental

L'essai s'est déroulé en trois temps : une phase d'adaptation au régime alimentaire de 3,5 semaines, puis une phase pré-expérimentale de 7 semaines, et une expérimentale de 12,5 semaines (Figure 5). La phase pré-expérimentale correspond à la phase de challenge alimentaire nécessaire à la caractérisation du profil de réponses en lait et en ingestion à l'auge pour l'approche Harpagon. Ce challenge alimentaire doit passer d'un niveau d'alimentation haut à un niveau bas en concentré de production (concentré énergétique composé majoritairement de pulpes de betteraves, Annexe I), en étant chacun appliqué durant 3 semaines (Lehuraux, 2022). Dans cet essai, le niveau haut a été défini à 5 kg brut/j/vache (P5kg) et le niveau bas à 1 kg brut/j/vache (P1kg) ; chacun des niveaux étant appliqués durant 3,5 semaines (Figure 5). La pé-

Tableau 3 : Composition et caractéristiques nutritionnelles des rations de base distribuées à l'auge

Composition Ration de base distribuée à l'auge (% MS)	Pré-expé (T0 à T3)	Période expérimentale		
		TemoinRC	TemoinRSC	Harpagon
Ensilage de maïs	62,4	58,4	62,4	
Ensilage d'herbe	12,6	11,8	12,6	
Paille de blé	3,0	2,8	3,0	
Tourteau de colza	21,0	19,7	21,0	
Concentré de production	-	6,4	-	
Compléments Minéraux Vitamines	1,0	1,0	1,0	
TOTAL ration auge	100,0	100,0	100,0	
Caractéristiques de la ration de base¹				
Matières Azotées Totales (en %)	13,6	13,9	13,6	
NDF (en %)	48,1	47,4	48,1	
Amidon total (en %)	16,2	16,0	16,2	
UFL (/kg MS)	0,86	0,85	0,86	
PDI (g/kg MS)	79	81	79	
BalProRu (g/kgMS)	3	4	3	

¹Calculées avec INRAtion®V5 pour un troupeau constitué de 39 % de primipares et 61 % de multipares avec un poids vif de 700 kg, un stade de lactation de 3,5 mois, potentiel de production de 10 500 kg de lait ; correspondant aux caractéristiques des vaches suivies dans l'essai.

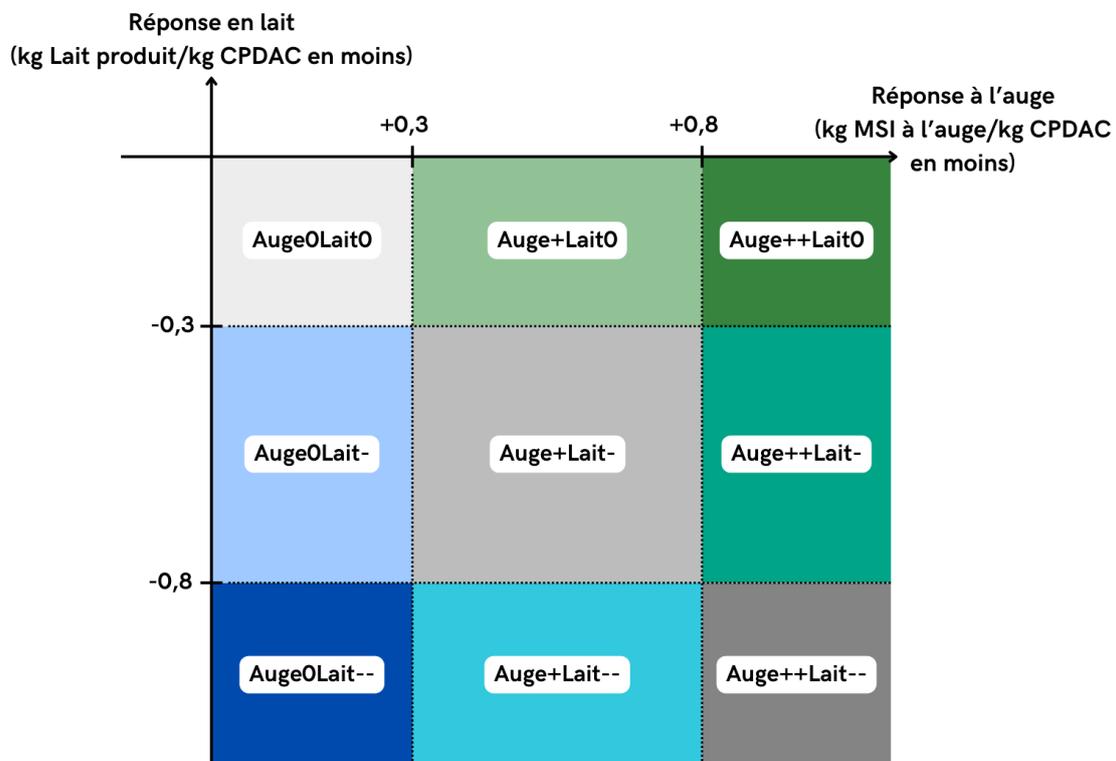


Figure 6 : Classement des vaches laitières d'après leur profil de réponses à une diminution du niveau de concentrés

Exemple de profil : Auge0Lait0 = profil caractérisé par une faible variation de consommation à l'auge (réponse à l'auge $\leq 0,3$) et en lait (réponse en lait $\geq -0,3$)

-riode d'adaptation de 3,5 semaines (T0 à T1, Figure 5) a servi d'adaptation alimentaire pour les vaches entre leur ration précédente et la ration semi-complète distribuée durant P5kg et P1kg : les vaches ont donc reçu un niveau de concentré de production intermédiaire entre le niveau de P5kg et P1kg (Figure 5).

Lors des phases d'adaptation et pré-expérimentale, 75 vaches Prim'Holstein à 93 jours de lactation à T0 (+/- 28j) dont 29 primipares étaient alimentées en ration semi-complète avec une ration de base distribuée à l'auge (Tableau 3) complétée par un apport de concentré de production distribué au GreenFeed® (N = 3, C-lock Inc., E.-U. d'A). Deux niveaux d'apport en concentré de production se sont succédé durant la phase pré-expérimentale (Figure 5) : P5kg et P1kg. À l'issue de cette phase, 69 vaches ont été allotées en 3 lots (cf. partie II.1.b.) : deux lots témoins, l'un alimenté selon une approche en ration complète (lot TémoinRC) et le second alimenté selon une approche en ration semi-complète (lot TémoinRSC) ; et un lot expérimental alimenté selon l'approche Harpagon (lot Harpagon). Chaque lot contenait 23 vaches, correspondant à l'effectif maximal recommandé par GreenFeed® pour le suivi des émissions de méthane entérique.

a. Détermination des profils de réponses durant la période pré-expérimentale

Les profils de réponses se basent sur la variation de la production laitière (PL) et sur la variation de la consommation de la ration de base à l'auge (MSI_{Auge}) suite à la réduction de l'apport en concentré de production (CP_{DAC}). La procédure de calcul est disponible dans Lehuraux (2022). En bref, pour chaque vache la variation de réponse a été calculée comme suit pour chacune des deux réponses, MSI_{Auge} et PL :

$$\Delta X = \frac{\mu X (P1kg) - \mu X (P5kg)}{\mu DAC (P1kg) - \mu DAC (P5kg)} \quad [1]$$

où X est l'une des deux réponses, MSI_{Auge} et PL ; ΔX est la variation de X exprimée en kg MS ingérée à l'auge/kg MS de CP_{DAC} en moins pour la réponse MSI_{Auge} et en kg de lait produit/kg MS CP_{DAC} en moins pour la réponse PL ; $\mu X (P5kg)$ et $\mu X (P1kg)$ sont les moyennes de X sur P5kg et P1kg, respectivement ; et $\mu DAC (P5kg)$ et $\mu DAC (P1kg)$ sont les moyennes de la consommation de CP_{DAC} sur les périodes P5kg et P1kg, respectivement.

Les moyennes utilisées dans ce calcul [1] sont basées sur les données des périodes P5kg et P1kg auxquelles ont été retirés les sept premiers et le dernier jour car ce sont des jours de transition et d'adaptation à la consigne (Lehuraux, 2022).

Les animaux ont ensuite été classés dans des profils de réponses, chacun défini par des seuils. Ces seuils ont au préalable été définis par un groupe d'experts impliqués dans le projet HARPAGON : pour la réponse en lait, les seuils ont été fixés à -0,3 et -0,8 kg de lait en moins par kg de CP_{DAC} en moins et pour la réponse MSI_{Auge} , les seuils ont été fixés à +0,3 et +0,8 kg de MSI en plus par kg de CP_{DAC} en moins (Figure 6). Pour la réponse en lait, les vaches ont été classées en 3 profils : Lait0 pour celles dont la réponse était supérieure strictement à -0,3 kg lait/kg CP_{DAC} , Lait- pour celles dont la réponse en lait était comprise entre les deux seuils et Lait++ pour celles dont la réponse en lait était inférieure strictement à -0,8 kg lait/kg CP_{DAC} . Pour la réponse à l'auge, les vaches ont été classées en 3 profils : Auge0 pour celles dont la réponse était inférieure strictement à +0,3 kg MSI_{Auge} /kg CP_{DAC} , Auge+ pour celles dont la réponse auge était comprise entre les deux seuils et Auge++ pour celles dont la réponse était supérieure strictement à +0,8 kg MSI_{Auge} /kg CP_{DAC} . La combinaison des profils de réponse en

Tableau 4 : Caractéristiques des vaches laitières des trois lots à l'allotement (**moyenne** ± **écart-type**)

Valeurs ¹	LOT TemoinRC	LOT TemoinRSC	LOT Harpagon	TOTAL
Effectif	23	23	23	69
Rang de lactation	2,5 ± 1,5	2,0 ± 1,0	2,3 ± 1,3	2,2 ± 1,3
Stade de lactation au 22/03/24	168 ± 30,2	167 ± 30,2	163 ± 25,4	166 ± 28,4
Matière Sèche Ingérée (MSI) (kg/jour/vache)	24,9 ± 2,9	25,1 ± 2,7	25,1 ± 2,9	25 ± 2,8
Production laitière (kg/jour/vache)	33,2 ± 5,1	33,7 ± 6,1	33,8 ± 5,6	33,6 ± 5,6
Taux butyreux du lait (g/kg)	42,0 ± 4,3	42,0 ± 4,5	41,8 ± 4,7	42,0 ± 4,4
Taux protéique du lait (g/kg)	33,7 ± 2,6	33,6 ± 2,3	33,3 ± 2,2	33,5 ± 2,3
Poids vif (kg)	710 ± 81,1	691 ± 66,5	697 ± 65,2	699 ± 70,7
Réponse au challenge en lait (kg de lait/kg de concentré de production en moins)	-0,3 ± 0,3	-0,4 ± 0,2	-0,4 ± 0,2	-0,4 ± 0,3
Réponse au challenge à l'auge (kg de MSI à l'auge/kg de concentré de production en moins)	0,8 ± 0,3	0,7 ± 0,2	0,8 ± 0,2	0,8 ± 0,2

¹Moyennes calculées sur la période de challenge T1 à T3.

Tableau 5 : Plan de complémentation général des vaches du lot Harpagon au cours de la période expérimentale

Réponse en ingestion à l'auge (kg de MSI _{Auge} /kg MS de CP _{DAC} en moins)	Réponse lait (kg de lait en moins/kg MS de CP _{DAC} en moins)		
	Inférieure à - 0,8	- 0,3 à - 0,8	Supérieure à - 0,3
Supérieure à 0,8	3	2	1
0,3 à 0,8	4	3	2
Inférieure à 0,3	5	4	3

CP_{DAC} : concentré de production distribué au GreenFeed® ; MSI_{Auge} : matière sèche ingérée à l'auge.

Tableau 6 : Plan de complémentation général des vaches du lot TemoinRSC au cours de la période expérimentale

Production laitière (kg/j/vache)	Quantité de CP _{DAC} distribuée au GreenFeed (kg brut/j/vache)
Inférieur à 29,5	1
[29,5 à 32,5[2
[32,5 à 35,5[3
[35,5 à 38,5[4
Supérieur à 38,5	5

CP_{DAC} : concentré de production distribué au GreenFeed®

lait avec ceux de la réponse en MSI_{Auge} a permis d'établir 9 profils de réponses potentiels (Figure 6).

b. Allotement

L'allotement avait pour objectif de former 3 lots qui soient les plus identiques possible afin de pouvoir les comparer ensuite (Tableau 4). Ces lots ont été construits et équilibrés sur les critères suivants, par ordre de priorité : le rang de lactation, le stade de lactation, la production laitière moyenne, la variation de réponses en lait et à l'auge suite au challenge alimentaire, la matière sèche ingérée moyenne, les taux butyreux et protéique moyens, et le poids vif moyen. Les moyennes ont été calculées sur la période entre T1 et T3. L'affectation de chaque vache à chaque lot s'est faite par blocs équilibrés, chacun constitué de trois vaches, avec une vache par lot. Pour chaque bloc, l'attribution des vaches à chaque lot a ensuite été réalisée par tirage aléatoire.

2. Composition des rations alimentaires et plans de complémentation

a. Rations distribuées à l'auge

Les rations distribuées à l'auge étaient de trois types : une ration unique semi-complète lors de la phase pré-expérimentale, une ration unique semi-complète pour les lots Harpagon et TemoinRSC lors de la phase expérimentale, et une ration complète unique pour le lot TemoinRC lors de la phase expérimentale (Tableau 3). La ration était distribuée une fois par jour, dans des auges peseuses ($N = 42$, CRFI BioControl, Norvège), accessibles par une seule vache à la fois, grâce à un système d'identification de type RFID. Les quantités distribuées étaient calculées de sorte que les vaches aient un accès à volonté sur l'ensemble de l'essai, à savoir entre 5 à 10 % de refus à l'auge chaque jour.

b. Plans de complémentation généraux

i. Lot Harpagon

Le plan de complémentation du lot Harpagon a été calculé individuellement, et indexé sur le profil de réponses établi sur la période de référence T1 à T3 (cf. II.1.a.). Les consignes attribuées pouvaient varier de 1 à 5 kg (Tableau 5) et étaient maintenues pour chaque animal sur toute la phase expérimentale (T3 à T4). La moyenne des consignes de ce lot a servi de référence pour atteindre la même consigne moyenne cible dans les deux autres lots.

ii. Lot TemoinRC

Pour le lot TemoinRC la majorité du concentré de production était incluse dans la ration à l'auge (Tableau 4), et 0,6 kg brut/j/vache était distribué au GreenFeed®. Ce complément au GreenFeed® était nécessaire pour les attirer au DAC afin de collecter des mesures régulières d'émissions de méthane entérique. La quantité de CP_{DAC} distribuée à l'auge a été établie de sorte que la consommation totale de concentrés de production du lot TemoinRC (auge + DAC) soit la même que celle du lot Harpagon.

iii. Lot TemoinRSC

Le plan de complémentation du lot TemoinRSC a été calculé individuellement et indexé sur la production laitière moyenne de chaque vache du lot durant la période expérimentale (Tableau 6). La consigne a été définie au début de la période expérimentale pour la première fois, et a ensuite été révisée toutes les 3 semaines pour suivre l'évolution de la PL de chaque

vache. Les nouvelles consignes étaient recalculées en se basant sur la production laitière moyenne des 10 derniers jours précédant la révision de la consigne, en écartant les valeurs aberrantes du calcul. Une valeur était considérée comme aberrante lorsqu'elle était supérieure ou inférieure à plus de 15 % par rapport à la moyenne de production des 10 jours précédents. Le niveau des consignes par tranche de PL (Tableau 6) a été choisi pour que la moyenne de CP_{DAC} consommé sur la phase expérimentale par ce lot TemoinRSC soit égale à celle du lot Harpagon, en se basant sur les persistances moyennes des vaches de la ferme expérimentale des Trinottières (49).

3. Mesures et suivi réalisés

a. Ingestion

L'ingestion, en matière brute, était mesurée chaque jour en additionnant la consommation de la ration à l'auge avec la consommation de CP_{DAC} au GreenFeed®. La mesure de la consommation de la ration à l'auge s'est faite grâce aux auges peseuses, qui assurent un suivi continu du poids de la ration restante dans l'auge et des visites de chaque vache (cf. II.2.a.). Des échantillons étaient prélevés quotidiennement pour chaque ration distribuée et pour les fourrages (ensilages de maïs et d'herbe), toutes les deux semaines pour le CP_{DAC}, et une fois par mois pour le tourteau de colza. Ces échantillons ont ensuite été étuvés chaque semaine pour obtenir leur matière sèche (MS). En parallèle, chaque aliment de la ration a été prélevé puis conservé au congélateur pour réaliser des analyses de valeurs nutritives a posteriori. À cet effet, les fourrages étaient prélevés une fois par mois, tandis que les concentrés ont chacun été prélevés à chaque livraison. La consommation brute par aliment de la ration a été estimée à partir de la composition de la ration distribuée chaque jour, puis convertie en MS grâce aux mesures faites par étuve. Les sommes des MS ingérées de chaque aliment de la ration donnent la MS ingérée totale (MSI).

b. Quantité et composition du lait

La production laitière des vaches était mesurée et enregistrée automatiquement, à chaque traite, soit deux fois par jour, par des compteurs à lait DeLaval®. Des prélèvements de lait étaient réalisés pour chaque vache pour déterminer la composition du lait produit sur 4 traites par semaine : lundi soir, mardi matin, jeudi soir et vendredi matin. À chaque prélèvement, les échantillons de lait sont mélangés au bronopol, pour assurer sa conservation jusqu'aux analyses. Ces analyses sont réalisées par le laboratoire Agreelia (Saint-Berthevin, Mayenne) pour déterminer la composition en matières grasses (TB) et protéiques (TP), et en lactose.

c. Poids vif et état corporel

Les animaux étaient pesés quotidiennement, le matin et le soir, en sortie de traite, par une stalle de pesée automatique à identification RFID.

L'état corporel des vaches est noté en se basant sur une grille de notation, avec des notes allant de 0 pour une vache maigre à 5 pour une vache grasse (Bazin, 1984). Le suivi a été fait manuellement toutes les deux semaines, par deux notateurs habilités de la ferme. À la fin de chaque séance de notation, les notateurs mettaient en commun leur NEC pour les harmoniser et aboutir à une seule note par vache.

d. Mesures des émissions de méthane entérique

Les émissions de méthane entérique étaient mesurées et enregistrées automatiquement à chaque visite des vaches au GreenFeed®. Les données étaient ensuite traitées et additionnées quotidiennement pour chaque vache grâce à l'algorithme développé par C-lock Inc. (E.-U. d'A), pour obtenir des émissions de méthane entérique en g/j/vache.

e. Suivi sanitaire

Un carnet de suivi sanitaire a été complété tout au long de l'essai pour enregistrer les événements sur les animaux, tels que des mammites, des boiteries, des chaleurs, ou l'isolement d'un animal dans un box sans accès aux auges peseuses. Les interventions sur les animaux, par un vétérinaire ou un pareur, étaient également notifiées dans ce carnet.

4. Traitement des données

a. Procédure de nettoyage des données

Le nettoyage des données a été fait en deux étapes :

- Étape 1 : une réunion de suivi d'essai était organisée une fois par mois, pour vérifier le bon déroulement de l'expérimentation et détecter les données aberrantes grâce au carnet de suivi sanitaire et aux observations des techniciens à la ferme. À cet effet, la réunion s'appuyait sur les courbes dynamiques moyennes de chaque lot et individuelle de chaque paramètre suivi. Les données étaient considérées comme aberrantes si elles étaient associées à une panne ou un dysfonctionnement du matériel, à un isolement d'un animal ou si une donnée ponctuelle était à plus de 2 écarts-types de la moyenne du paramètre mesuré pour une vache donnée, sans explication physiologique.
- Étape 2 : chaque semaine, l'ensemble des données mesurées était remonté et rassemblé pour pouvoir ensuite être compilé sous R (R Core Team, 2024). Pour les données d'ingestion à l'auge, tous les repas avec une vitesse d'ingestion supérieure à 21 g/s étaient supprimés du jeu de données car incohérents d'un point de vue physiologique. Pour les données de poids vif, les données aberrantes étaient détectées grâce à un lissage de type LOESS (Locally Estimated Scatterplot Smoothing), dont la valeur à chaque date était définie par la moyenne des 20 % des données les plus proches dans le temps. Si la valeur de poids vif testée était en dehors de l'intervalle de la valeur du LOESS du jour testé ± 2 écarts-types des valeurs de poids vif des 20 % plus proches voisins, alors elle était considérée comme aberrante et supprimée.

b. Analyses des données

i. Comparaison des résultats moyens par lot

Le premier objectif de l'essai était de caractériser et comparer les performances moyennes de chaque lot sur l'ensemble de la période expérimentale. Les performances zootechniques incluent l'ingestion en MS à l'auge, au GreenFeed®, totale, la production laitière, le TB, TP, l'énergie nette du lait, la NEC, le PV, et la variation de NEC. L'énergie nette du lait a été calculée à partir de l'équation suivante (INRA, 2018) :

$$ENL = PL \times [0,42 + [0,0053 \times (TB - 40)] + [0,0032 \times (TP - 31)]] \quad [2]$$

Où ENL est l'Énergie Nette du Lait, exprimée en UFL/j ; PL est la production laitière, exprimée

en kg/j ; TB et TP sont les taux butyreux et protéique, respectivement, exprimés en g/kg de lait.

La variation de NEC a été calculée pour chaque vache comme la différence entre la dernière et la première note de la période concernée. Les performances environnementales concernent les émissions de méthane entérique. Pour chacune de ces performances suivies, la moyenne a été calculée par vache et pour chacune des deux périodes, la période pré-expérimentale et la période expérimentale. Pour la période pré-expérimentale, les moyennes ont été calculées selon la même procédure que pour l'allotement. Pour la période expérimentale, la moyenne a été calculée en incluant toute la période expérimentale.

L'effet moyen de la stratégie d'allocation du concentré, c'est-à-dire l'effet moyen du lot en période expérimentale, a été testé et vérifié en deux étapes successives :

- Étape 1 : Une analyse de variance [2] afin de s'assurer de l'absence de différences entre les trois lots au moment de l'allotement ;

$$Y = Lot + (Bloc) + \varepsilon \quad [3]$$

Où Y est la variable observée moyennée sur la période pré-expérimentale ; Lot est l'effet fixe du lot avec 3 modalités (TemoinRC, TemoinRSC, et Harpagon) ; Bloc est l'effet aléatoire du bloc expérimental sur l'ordonnée à l'origine du modèle, il corrige de la construction aléatoire des blocs d'animaux ; ε est l'erreur résiduelle du modèle.

- Étape 2 : Une analyse de variance [3] pour comparer les résultats moyens des trois lots en période expérimentale

$$Y = Lot + Y_{Préexpé} + Lot * Y_{Préexpé} + (Bloc) + \varepsilon \quad [4]$$

Où Y est la variable observée moyennée sur la période expérimentale ; Lot est l'effet fixe du lot avec 3 modalités (TemoinRC, TemoinRSC, et Harpagon) ; $Y_{Préexpé}$ est la moyenne de Y durant la période pré-expérimentale ; $Lot * Y_{Préexpé}$ est l'interaction entre l'effet Lot et $Y_{Préexpé}$; Bloc est l'effet aléatoire du bloc expérimental sur l'ordonnée à l'origine du modèle, il corrige de la construction aléatoire des blocs d'animaux ; ε est l'erreur résiduelle du modèle.

Si l'étape 1 confirmait une différence entre 2 lots déjà existante avant la période expérimentale, toute différence observée entre ces deux lots en phase expérimentale ne pourra donc pas être associée aux différences de traitement. Pour les deux étapes, le modèle utilisé est une analyse de variance avec un effet aléatoire du bloc expérimental. Il a été construit grâce au package lmerTest (Kuznetsova *et al.*, 2017), et le package car (Fox et Weisberg, 2019) a été utilisé pour en faire l'analyse.

Dans l'hypothèse où il y aurait des performances différentes entre au moins deux lots, une comparaison économique de chacun des lots sera réalisée. Cette analyse repose d'une part sur le calcul des produits par lot, et d'autre part le calcul des charges opérationnelles par lot, afin de dégager une marge brute pour chacun des trois lots. Les produits sont constitués de la rémunération de la production laitière, calculée à partir du prix du lait moyen payé lors de la période expérimentale. Les charges comprennent le coût de la consommation de fourrages et de concentrés. Le coût de production de l'ensilage de maïs a été estimé à partir des estimations des coûts de production d'un maïs conventionnel irrigué avec un rendement moyen de 15 tMS/ha (Chambre d'agriculture des Pays de la Loire, 2024). Le coût de production de l'ensilage

Tableau 7 : Répartition des vaches au sein des profils de réponses déterminés suite au challenge alimentaire

Profil de réponse en ingestion à l'auge		Auge0			Auge+			Auge++			Total	
		TemoinRC	TemoinRSC	Harpagon	TemoinRC	TemoinRSC	Harpagon	TemoinRC	TemoinRSC	Harpagon		
Lait0	TemoinRC	0			3			7			10	25
	TemoinRSC		0			6			2		8	
	Harpagon			0			2			5	7	
Lait-	TemoinRC	0			8			3			11	38
	TemoinRSC		1			9			3		13	
	Harpagon			0			9			5	14	
Lait--	TemoinRC	0			2			0			2	6
	TemoinRSC		0			2			0		2	
	Harpagon			0			2			0	2	
Total		0	1	0	13	17	13	10	5	10	69	
		1			43			25				

Profil Auge0 : réponse en ingestion à l'auge inférieure à 0,3 kg MS/kg de CP_{DAC} en moins / Profil Auge+ : réponse en ingestion à l'auge comprise entre 0,3 et 0,8 kg MS/kg de CP_{DAC} en moins / Profil Auge++ : réponse en ingestion à l'auge supérieure à 0,8 kg MS/kg de CP_{DAC} en moins / Profil Lait0 : perte de lait inférieure à 0,3 kg/kg de CP_{DAC} en moins / Profil Lait- : perte de lait comprise entre 0,3 et 0,8 kg/kg de CP_{DAC} en moins / Profil Lait-- : perte de lait supérieure à 0,8 kg/kg de CP_{DAC} en moins

d'herbe a été estimé à partir des estimations des coûts de production d'un Ray-grass d'Italie (18 mois) avec un rendement moyen de 6 tMS/ha (Chambre d'agriculture des Pays de la Loire, 2024).

ii. Différence de variabilité individuelle des réponses entre les lots

L'objectif est ici d'analyser l'effet des trois stratégies d'allocation du concentré de production sur la variabilité individuelle des performances. Cette variabilité est approchée par l'analyse de forme des courbes de performances individuelles : la stratégie d'allocation du concentré de production a-t-elle une incidence sur la forme des courbes des performances individuelles ? Cette approche s'est faite pour chacune des performances suivies en deux temps : une première étape de caractérisation de groupes de forme de courbes individuelles et une seconde étape de comparaison de la répartition de ces groupes entre les trois lots expérimentaux. Les performances individuelles analysées par cette approche sont l'ingestion du CP_{DAC}, l'ingestion de la ration de base à l'auge, la production laitière brute et le poids vif. L'étape de mise en groupe des animaux selon les formes de courbe a été réalisée avec le package kml (Genolini *et al.*, 2015) sur R (R Core Team, 2024). La seconde étape repose sur un test de Fisher pour vérifier l'homogénéité de répartition des différents groupes de forme de courbes entre les trois lots.

iii. Valeur ajoutée de la caractérisation du profil de réponses à une réduction en concentré

L'objectif est d'analyser la valeur ajoutée de la prise en compte de la caractérisation du profil de réponses à une réduction de l'apport en CP_{DAC} dans la stratégie d'allocation du concentré : les trois stratégies alimentaires testées ont-elles abouti à des performances différentes pour des vaches ayant le même profil de réponses ? Pour chacun des profils de réponses, l'analyse consiste à comparer les moyennes des performances et des ingestions de la phase expérimentale des trois lots. Ceci sera réalisé par une analyse de variance incluant un effet fixe du lot et un effet aléatoire du bloc expérimental sur l'ordonnée à l'origine (cf. équation [2]). Ce modèle sera appliqué indépendamment pour chaque profil de réponse (Tableau 7) et pour chaque variable mesurée : ingestion du CP_{DAC}, ingestion de la ration de base à l'auge, ingestion totale, PL, ENL et variation de NEC.

III. Résultats

Les résultats présentés dans cette partie porteront sur les performances zootechniques et économiques des lots expérimentaux. Les performances environnementales n'étant pas disponibles au moment de la rédaction, ces dernières ne seront pas présentées.

1. Effet du mode d'allocation des concentrés sur les performances zootechniques et économiques moyennes de chaque lot

La consommation de CP_{DAC} a été en moyenne de 2,0 kg MS/j/vache pour le lot Harpagon, 2,1 kg MS/j/vache pour le lot TemoinRC et 2,2 kg MS/j/vache pour le lot TemoinRSC sur la période expérimentale ($P = 0,25$; Tableau 8). À cela s'est ajoutée la consommation de la ration de base à l'auge qui s'élevait à 23,1 kg MS/j/vache en moyenne pour le lot Harpagon, 23,2 kg MS/j/vache pour le lot TemoinRC et 22,6 kg MS/j/vache pour le lot TemoinRSC ($P = 0,61$; Tableau 8). Au total, le lot Harpagon aura consommé en moyenne 25,2 kg MS/j/vache, et les

Tableau 8 : Moyennes ajustées de l'ingestion, des performances et des événements sanitaires par lot expérimental (TemoinRC, TemoinRSC et Harpagon) sur la période expérimentale

	Moyennes			ER	P
	TemoinRC	TemoinRSC	Harpagon		
Ingestion (kg MS/j/vache)					
Ration de base	23,2	22,6	23,1	0,75	0,61
Concentrés de production	2,1	2,2	2,0	0,58	0,25
Total	25,4	24,9	25,2	0,79	0,13
Performances					
Production laitière (kg/j/vache)	30,8	31,0	30,8	2,27	0,37
Taux butyreux (g/kg)	41,6	42,2	41,4	1,52	0,36
Taux protéique (g/kg)	33,2	33,1	32,9	0,82	0,80
Lactose (g/kg)	46,1 ^b	46,8 ^a	45,6 ^b	1,05	0,02
ENL ¹ (UFL/j/vache)	13,6	13,8	13,7	0,95	0,17
Poids vif (kg)	720	714	716	10,6	0,17
NEC	2,99	2,95	2,94	0,14	0,46
Variation de NEC ²	0,15 ^a	-0,07 ^b	0,04 ^{ab}	0,22	0,01
Évènements sanitaires (nombre/vache)					
Mammites	0,6	0,4	0,7	0,59	0,32
Boiteries	0,2	0,2	0,3	0,22	0,20
Autres (nécessitant un isolement)	0,1	0,1	0,3	0,40	0,32

¹Energie Nette exportée dans le Lait

²Différence entre la dernière et la première note de la période expérimentale.

La comparaison des moyennes par lot a été réalisée par une analyse de variance, caractérisée par l'erreur résiduelle (ER) et la probabilité critique (P) associée à l'effet du lot.

Tableau 9 : Résultats économiques par lot expérimental (TemoinRC, TemoinRSC et Harpagon) sur la période expérimentale

	TemoinRC	TemoinRSC	Harpagon
Produits ¹	28 738	28 925	28 738
Charges opérationnelles ²	7 132	7 140	7 042
Marge brute alimentaire ³	21 606	21 785	21 696

¹Les produits sont composés de la rémunération du lait vendu.

²Les charges opérationnelles sont composées du coût de l'ensilage de maïs, de l'ensilage d'herbe (Raygrass Italien), du tourteau de colza, et du concentré de production qui ont été consommés.

³La marge brute alimentaire est calculée à partir de la différence entre les produits et les charges opérationnelles.

lots TemoinRC et TemoinRSC ont consommé respectivement 25,4 et 24,9 kg MS/j/vache (P = 0,13 ; Tableau 8).

Les performances de la fonction de lactation se sont traduites par une quantité d'Énergie Nette Exportée dans le lait (ENL) en moyenne de 13,7 UFL/j/vache pour le lot Harpagon, et 13,6 et 13,8 UFL/j/vache pour les lots TemoinRC et TemoinRSC respectivement (P = 0,17 ; Tableau 8). Cette ENL correspond à une production laitière moyenne de 30,8 kg/j/vache pour les lots Harpagon et TemoinRC, et de 31 kg/j/vache pour le lot TemoinRSC (P = 0,37 ; Tableau 8). Cette production était associée à des taux butyreux de 41,4 g/kg pour le lot Harpagon, 41,6 g/kg pour le lot TemoinRC et 42,2 g/kg pour le lot TemoinRSC (P = 0,36), et des taux protéiques de 32,9, 33,2 et 33,1 g/kg pour les lots Harpagon, TemoinRC et TemoinRSC respectivement (P = 0,80 ; Tableau 8). En parallèle de la synthèse de lait figure la fonction d'entretien des réserves corporelles, caractérisées par la NEC et sa variation entre le début et la fin de la période expérimentale. L'état de réserves corporelles était en moyenne de 2,94 pour le lot Harpagon, et de 2,99 et 2,95 pour les lots TemoinRC et TemoinRSC respectivement (P = 0,46 ; Tableau 8). La variation de NEC moyenne était positive pour les lots Harpagon et TemoinRC, avec en moyenne 0,04 et 0,17 point de gain de NEC respectivement, et négative pour le lot TemoinRSC avec une perte de NEC de 0,09 point (P = 0,01 ; Tableau 8).

Les évènements sanitaires recensés dans le carnet sanitaire ont été divisés en trois catégories : les mammites, les boiteries et les autres évènements sanitaires ayant nécessité un isolement de l'animal. Le lot Harpagon a eu en moyenne 0,7 mammite/vache recensées sur la période expérimentale, et les vaches des lots TemoinRC et TemoinRSC ont eu en moyenne 0,6 et 0,4 mammite/vache respectivement (P = 0,32 ; Tableau 8). Les vaches du lot Harpagon ont été touchées par des boiteries en moyenne 0,3 fois par vache, et les vaches des lots témoins en ont eu en moyenne 0,2 par vache au cours de la période expérimentale (P = 0,20 ; Tableau 8). Enfin, le nombre d'évènements sanitaires autres recensé pour le lot Harpagon s'élevait en moyenne à 0,3 par vache, alors qu'il était en moyenne de 0,1 par vache pour les deux autres lots témoins (P = 0,32 ; Tableau 8).

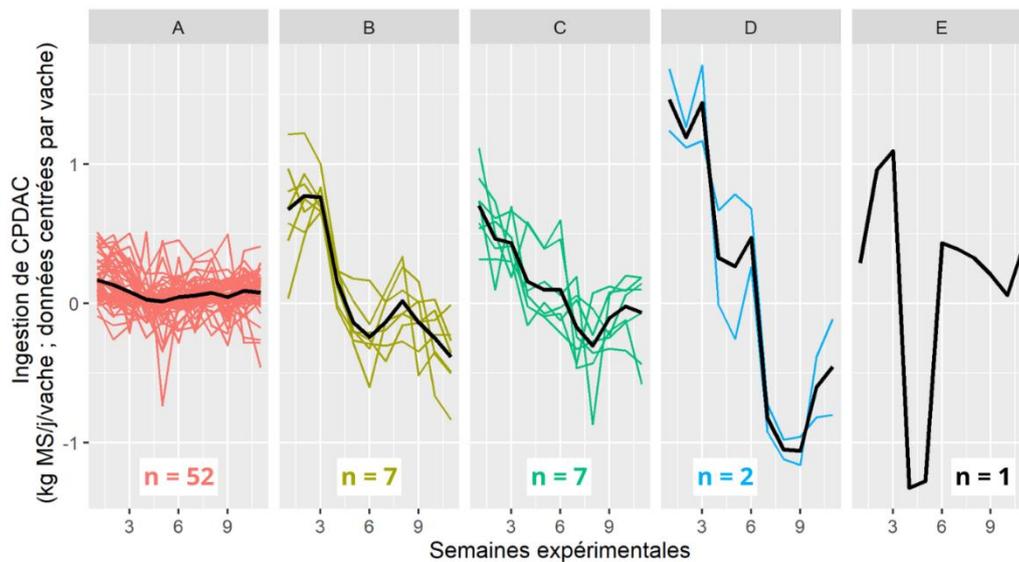
Sur la période expérimentale, la marge brute alimentaire de chaque lot, calculée à partir du prix de vente du lait produit et des charges opérationnelles alimentaires, s'élevait à 21 696 € pour le lot Harpagon et de 21 606 € et 21 785 € pour les lots TemoinRC et TemoinRSC respectivement (Tableau 9).

2. Différence des réponses individuelles entre les lots

L'analyse des réponses individuelles a consisté à étudier les dynamiques d'évolutions individuelles de la consommation de CP_{DAC} et de ration de base, la production laitière et du poids vif. Pour cela, une typologie des courbes a été réalisée et a permis d'aboutir à 5 groupes d'animaux pour l'ingestion de CP_{DAC} (Figure 7), 4 groupes pour l'ingestion de la ration de base (Figure 8), 5 groupes pour la production laitière (Figure 9) et 5 groupes pour le poids vif (Figure 10).

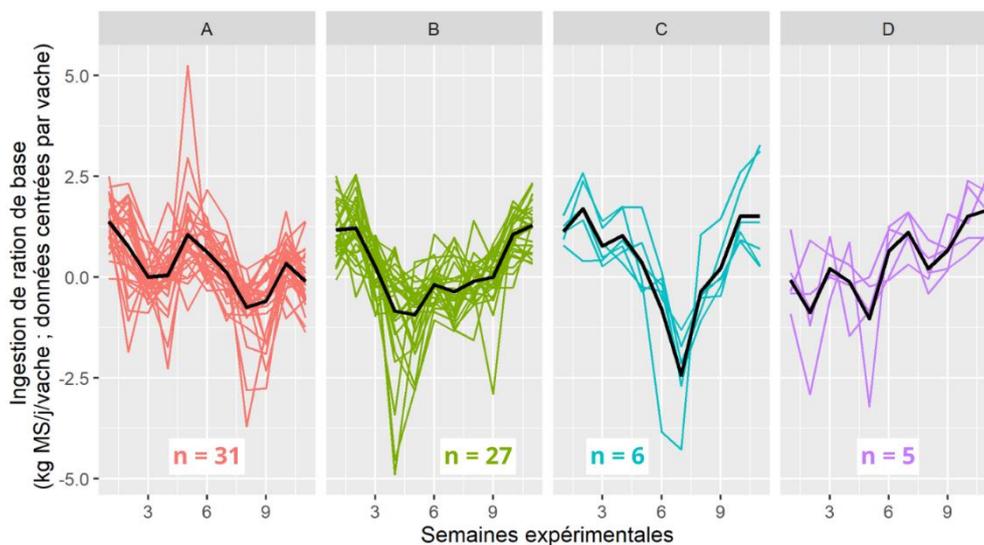
a. Description des courbes individuelles d'ingestion de concentré de production

Les 5 groupes identifiés pour l'analyse de la typologie des courbes d'ingestion de CP_{DAC} sont nommés A, B, C, D, et E (Figure 7). Le groupe A recense la majorité des vaches (52 vaches sur 69), incluant tout le lot TemoinRC et 20 vaches du lot Harpagon. Ce groupe de courbes est



	Groupes					P
	A	B	C	D	E	
Nombre de primipares	21	2	3	0	0	0,87
Lots						< 0,01
TemoinRC	23	0	0	0	0	
TemoinRSC	9	6	5	2	1	
Harpagon	20	1	2	0	0	

Figure 7 : Courbes d'évolutions moyennes et individuelles d'ingestion de CP_{DAC} des vaches de chacun des 5 groupes identifiés (A, B, C, D et E)
Moyenne du groupe en noir ; moyenne individuelle en couleur.



	Groupes				P
	A	B	C	D	
Nombre de primipares	12	9	3	2	0,89
Lots					< 0,01
TemoinRC	22	1	0	0	
TemoinRSC	5	14	4	0	
Harpagon	4	12	2	5	

Figure 8 : Courbes d'évolutions moyennes et individuelles d'ingestion de la ration de base des vaches de chacun des 4 groupes identifiés (A, B, C, et D)
Moyenne du groupe en noir ; moyenne individuelle en couleur.

caractérisé par une ingestion de CP_{DAC} constante sur toute la période expérimentale (Figure 7, A). Le groupe B recense 7 vaches, dont 6 du lot TemoinRSC. Il se caractérise par une évolution d'ingestion de CP_{DAC} à la baisse, en 2 paliers (Figure 7, B). Le groupe C rassemble également 7 vaches, dont 5 du lot TemoinRSC, avec cette fois des vaches qui réduisent leur ingestion du CP_{DAC} de façon plus régulière que les vaches du groupe B (Figure 7, C). Le groupe D est composé de 2 vaches du lot TemoinRSC, qui ont toutes les deux un profil d'ingestion de CP_{DAC} à la baisse, en 3 paliers (Figure 7, D). Le groupe E ne compte qu'une vache du lot TemoinRSC, avec un profil de courbe accidenté (Figure 7, E).

b. Description des courbes individuelles d'ingestion de la ration de base

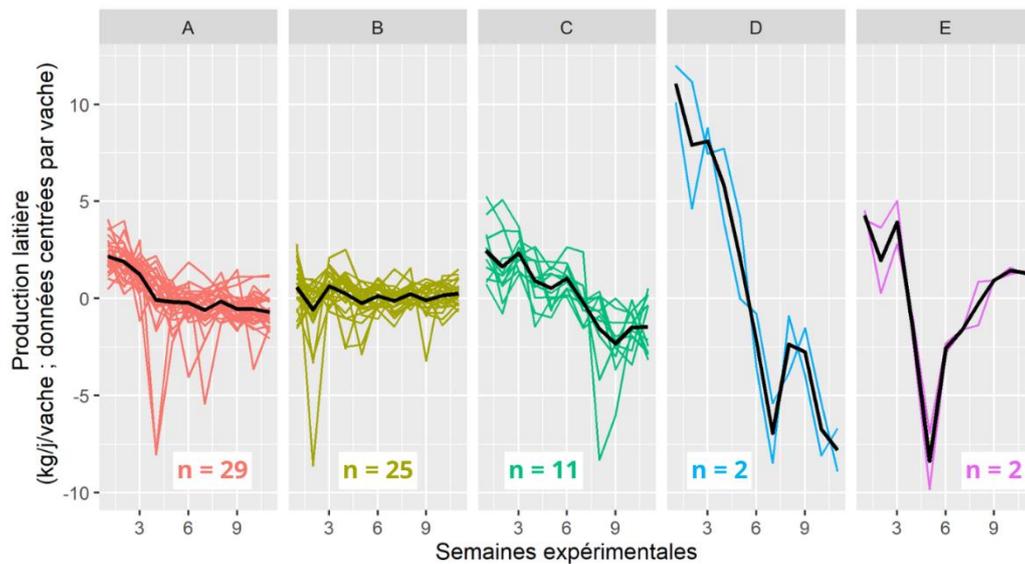
Quatre groupes, nommés A, B, C et D, ont été identifiés pour l'évolution de l'ingestion de la ration de base (Figure 8). Le groupe A recense 31 vaches, dont 22 vaches du lot TemoinRC. Ce groupe se caractérise par une baisse de l'ingestion de la ration de base sur toute la période expérimentale avec quelques rebonds ponctuels (Figure 8, A). Le groupe B regroupe 27 vaches, dont 14 du lot TemoinRSC et 12 du lot Harpagon. Il se caractérise par des courbes d'ingestion de ration de base avec une forme convexe étendue sur la période expérimentale (Figure 8, B). Le groupe C se compose de 6 vaches, dont 4 du lot TemoinRSC, avec cette fois un groupe de courbes d'ingestion de ration de base de forme convexe avec un creux plus marqué que celui du groupe B à la 7^{ème} semaine expérimentale (Figure 8, C). Le groupe D compte 5 vaches du lot Harpagon, qui ont toutes une dynamique d'ingestion de ration de base croissante accidentée (Figure 8, D).

c. Description des courbes individuelles de production laitière

Les 5 groupes identifiés par l'analyse des profils de courbes de production laitière sont nommés A, B, C, D, E (Figure 9). Les 3 premiers groupes, A, B et C, concentrent 65 des 69 vaches suivies. Ils se caractérisent par une production en diminution puis stable pour le groupe A (29 vaches), une production stable pour le groupe B (25 vaches dont 70 % de primipares), et une production en diminution progressive d'environ $-0,4$ kg/semaine pour le groupe C (Figure 9, A, B, C). Les deux autres groupes, D et E, recensent 2 vaches chacun. Le groupe D, se caractérise par une production laitière en forte diminution (plus de 15 kg/j de baisse entre le début et la fin de la période expérimentale) (Figure 9, D). Enfin, le groupe E, composé de 2 vaches du lot TemoinRSC, a un profil de courbe dessinant un creux entre la 4^{ème} à la 6^{ème} semaine (Figure 9, E).

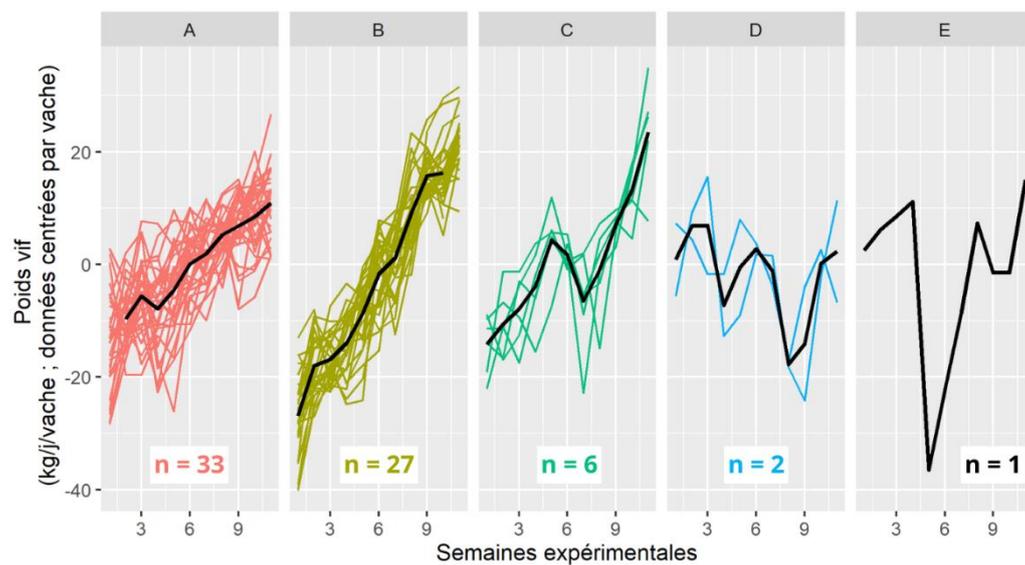
d. Description des courbes individuelles de poids vif

Les 5 groupes identifiés par l'analyse des courbes individuelles de poids vif sont nommés A, B, C, D et E (Figure 10). Les groupes A et B recensent 60 vaches sur les 69 de l'essai. Ces deux groupes se caractérisent par un gain de poids vif régulier, de 1,8 kg/semaine pour le groupe A et de 4 kg/semaine pour le groupe B (Figure 10, A, B). Le groupe C est composé de 6 vaches, et se caractérise aussi par un gain de poids vif, de 3,2 kg/semaine en moyenne, mais avec une perte autour de la 7^e semaine expérimentale (Figure 10, C). Les groupes D et E recensent respectivement 2 et 1 vaches, avec des profils de courbes plus accidentés, dont le bilan est nul ou quasi nul entre la fin et le début de la période expérimentale (Figure 10, D, E).



	Groupes					P
	A	B	C	D	E	
Nombre de primipares	4	17	5	0	0	< 0,01
Lots						0,43
TemoinRC	12	6	4	1	0	
TemoinRSC	8	8	5	0	2	
Harpagon	9	11	2	1	0	

Figure 9 : Courbes d'évolutions moyennes et individuelles de production laitière des vaches de chacun des 5 groupes identifiés (A, B, C, D et E)
Moyenne du groupe en noir ; moyenne individuelle en couleur.



	Groupes					P
	A	B	C	D	E	
Nombre de primipares	13	12	1	0	0	0,62
Lots						0,82
TemoinRC	10	11	1	1	0	
TemoinRSC	11	7	3	1	1	
Harpagon	12	9	2	0	0	

Figure 10 : Courbes d'évolutions moyennes et individuelles de poids vif des vaches de chacun des 5 groupes identifiés (A, B, C, D et E)
Moyenne du groupe en noir ; moyenne individuelle en couleur.

3. Différences de performances entre lots pour un même profil de réponse à une réduction en concentrés

L'objectif est ici de comparer les ingestions moyennes par lot et les performances de chaque profil de réponse à la réduction en apport de CP_{DAC} . Cette analyse a été faite uniquement sur les profils de réponse regroupant un nombre suffisant d'individus, à savoir les profils Auge++ et Auge+ pour la réponse à l'auge, et Lait0 et Lait- pour la réponse en production laitière. Les profils Lait-- et Auge0 étaient constitués de respectivement 6 et 1 vaches, représentant des effectifs trop faibles pour les analyses envisagées.

a. Description du profil de réponse Auge+

Pour le groupe des vaches qui ont compensé à l'auge modérément (Auge+) durant la phase-pré-expérimentale, on dénombre 13 vaches des lots TemoinRC et Harpagon, et 18 du lot TemoinRSC (Tableau 10). L'ingestion de CP_{DAC} était de 2,4 kg MS/j/vache en moyenne pour les 13 vaches du lot Harpagon, de 2,1 kg MS/j/vache en moyenne pour les 13 vaches du lot TemoinRC et de 2,2 kg MS/j/vache en moyenne pour les 17 vaches du lot TemoinRSC ($P = 0,45$; Tableau 10). L'ingestion de la ration de base s'élevait en moyenne à 23,1 kg MS/j/vache pour le lot Harpagon, et pour les deux lots témoins TemoinRC et TemoinRSC, elle était de 23,4 et 22,4 kg MS/j/vache respectivement ($P = 0,18$; Tableau 10). Finalement, les vaches du lot Harpagon et du lot TemoinRC ont en moyenne consommé 25,5 kg MS/j/vache de ration totale, et les vaches du lot TemoinRSC ont consommé 24,7 kg MS/j/vache ($P = 0,25$; Tableau 10). L'énergie nette exportée dans le lait pour les vaches du lot Harpagon s'élevait en moyenne à 13,7 UFL/j/vache, avec une production laitière moyenne de 30,7 kg/j/vache, et à 13,8 UFL/j/vache pour les deux autres lots, avec des niveaux de production laitière de 31,0 et 30,8 kg/j/vache pour les lots TemoinRC et TemoinRSC respectivement ($P_{\text{Production laitière}} = P_{\text{ENL}} = 0,99$; Tableau 10). Les vaches du lot Harpagon ont gagné 0,06 point de NEC sur la période expérimentale, tandis que les vaches du lot TemoinRC ont gagné 0,18 point et les vaches du lot TemoinRSC perdu 0,13 point de NEC ($P = 0,02$; Tableau 10).

b. Description du profil de réponse Auge++

Le groupe des vaches qui ont fortement compensé à l'auge durant la phase pré-expérimentale (Auge++) est composé de 10 vaches du lot TemoinRC, 5 vaches du lot TemoinRSC, et 10 vaches du lot Harpagon (Tableau 10). La consommation de CP_{DAC} des 13 vaches du lot Harpagon était de 1,5 kg MS/j/vache, soit 0,7 et 0,8 kg MS/j/vache de moins en moyenne par rapport aux 5 vaches du lot TemoinRC et aux 10 vaches du lot TemoinRSC respectivement ($P < 0,01$; Tableau 10). L'ingestion de la ration de base était en moyenne de 23,5 kg MS/j/vache pour le lot Harpagon, et s'élevait à 22,8 et 22,3 kg MS/j/vache pour les lots TemoinRC et TemoinRSC, respectivement ($P = 0,14$; Tableau 10). Finalement, les vaches du lot Harpagon ont consommé en moyenne 25,2 kg MS/j/vache de ration totale, celles du lot TemoinRC ont consommé en moyenne 25,1 kg MS/j/vache, et celles du lot TemoinRSC ont consommé 24,5 kg MS/j/vache ($P = 0,77$; Tableau 10). L'énergie nette exportée dans le lait des vaches du lot Harpagon s'élevait en moyenne à 13,5 UFL/j/vache, avec une production laitière moyenne de 30,7 kg/j/vache, 13,2 UFL/j/vache pour le lot TemoinRC qui avait une production laitière moyenne de 29,6 kg/j/vache, et 13,8 UFL/j/vache pour le lot TemoinRSC qui a produit en moyenne 30,3 kg/j/vache ($P_{\text{Production laitière}} = 0,60$; $P_{\text{ENL}} = 0,47$; Tableau 10). Les vaches du lot Harpagon ont gagné 0,01 point de NEC sur la période expérimentale, tandis que les vaches

Tableau 10 : Moyennes ajustées des ingestions et performances zootechniques des trois lots expérimentaux (TemoinRC, TemoinRSC, Harpagon) sur la période expérimentale pour les profils de réponse Lait0, Lait-, Auge+ et Auge++ caractérisés lors de la phase pré-expérimentale de réduction de l'apport en concentrés de production.

	Moyennes			ER	P
	TemoinRC	TemoinRSC	Harpagon		
Profil Auge+ (réponse d'ingestion à l'auge comprise entre 0,3 et 0,8 kg MS/kg de CP_{DAC} en moins)					
Effectif (N = 43)	13	17	13		
Ingestion (en kg MS/j/vache)					
Ration de base	23,4	22,4	23,1	1,16	0,18
Concentrés de production	2,1	2,2	2,4	0,67	0,45
Total	25,5	24,7	25,5	1,20	0,25
Performances					
Production laitière (kg/j/vache)	31,0	30,8	30,7	3,89	0,99
ENL ¹ (UFL/j/vache)	13,8	13,8	13,7	1,44	0,99
Variation de NEC ²	0,18 ^a	-0,13 ^b	0,06 ^{ab}	0,29	0,02
Profil Auge++ (réponse d'ingestion à l'auge supérieur à 0,8 kg MS/kg de CP_{DAC} en moins)					
Effectif (N = 25)	10	5	10		
Ingestion (en kg MS/j/vache)					
Ration de base	22,8	22,3	23,5	0,73	0,14
Concentrés de production	2,2 ^a	2,3 ^a	1,5 ^b	0,48	< 0,01
Total	25,1	24,5	25,2	0,93	0,77
Performances					
Production laitière (kg/j/vache)	29,6	30,3	30,7	1,59	0,60
ENL ¹ (UFL/j/vache)	13,2	13,8	13,5	0,52	0,47
Variation de NEC ²	0,16	0,05	0,01	0,18	0,31
Profil Lait0 (perte de lait inférieure à 0,3 kg/kg de CP_{DAC} en moins)					
Effectif (N = 25)	10	8	7		
Ingestion (en kg MS/j/vache)					
Ration de base	22,4	21,5	22,6	0,69	0,10
Concentrés de production	2,2 ^a	2,3 ^a	1,4 ^b	0,49	< 0,01
Total	24,7	23,9	24,1	0,86	0,39
Performances					
Production laitière (kg/j/vache)	30,7	30,6	30,8	1,44	0,98
ENL ¹ (UFL/j/vache)	13,5	13,3	13,3	0,45	0,73
Variation de NEC ²	0,08	-0,15	0,08	0,24	0,09
Profil Lait- (perte de lait entre 0,3 et 0,8 kg/kg de CP_{DAC} en moins)					
Effectif (N = 38)	11	13	14		
Ingestion (en kg MS/j/vache)					
Ration de base	23,5	22,8	24	1,26	0,19
Concentrés de production	2,1	2,1	2,2	0,59	0,88
Total	25,7	25,0	26,2	1,41	0,21
Performances					
Production laitière (kg/j/vache)	29,8	30,6	32,4	3,77	0,35
ENL ¹ (UFL/j/vache)	13,3	13,6	14,6	0,59	0,12
Variation de NEC ²	0,30 ^a	-0,03 ^b	0,02 ^b	0,24	0,01

¹Energie Nette exportée dans le Lait

²Différence entre la dernière et la première note de la période expérimentale.

La comparaison des moyennes par lot a été réalisée par une analyse de variance, caractérisée par l'erreur résiduelle (ER) et la probabilité critique (P) associée à l'effet du lot.

des lots TemoinRC et TemoinRSC ont gagné 0,16 et 0,05 point de NEC respectivement ($P = 0,31$; Tableau 10).

c. Description du profil de réponse Lait0

Sur les 25 vaches qui n'ont pas perdu de lait à la suite de la diminution du CP_{DAC} (Lait0) en période pré-expérimentale, 10 appartenaient au lot TemoinRC, 8 au lot TemoinRSC et 7 au lot Harpagon (Tableau 10). Pour ce profil de réponse, ce sont les vaches du lot Harpagon qui ont consommé le moins de CP_{DAC} avec une moyenne de 1,4 kg MS/j/vache. Les vaches des lots TemoinRC et TemoinRSC ont respectivement consommé 0,8 et 0,9 kg MS/j/vache de CP_{DAC} de plus que les vaches du lot Harpagon ($P < 0,01$; Tableau 10). Les vaches du lot Harpagon ont ingéré en moyenne de 22,6 kg MS/j/vache de la ration de base, tandis que les vaches des lots TemoinRC et TemoinRSC en ont ingéré 22,4 et 21,5 kg MS/j/vache, respectivement ($P = 0,10$; Tableau 10). Sur l'ingestion totale, la moyenne de consommation était de 24,1 kg MS/j/vache pour le lot Harpagon, 24,7 kg MS/j/vache pour le lot TemoinRC et 23,9 kg MS/j/vache pour le lot TemoinRSC ($P = 0,39$; Tableau 10). Les vaches du lot Harpagon ont produit en moyenne 30,8 kg de lait/j/vache, et les vaches des lots TemoinRC et TemoinRSC ont produit en moyenne 30,7 et 30,6 kg/j/vache respectivement ($P = 0,98$; Tableau 10). Cela s'est traduit en une énergie nette exportée dans le lait de 13,3 UFL/j/vache pour les lots Harpagon et TemoinRSC, et de 13,5 UFL/j/vache pour le lot TemoinRC ($P = 0,73$; Tableau 10). Les vaches des lots Harpagon et TemoinRC enregistrent en moyenne un gain de 0,08 point d'état corporel, alors que les vaches du lot TemoinRSC ont perdu en moyenne 0,15 point de NEC pendant la période expérimentale ($P = 0,09$; Tableau 10).

d. Description du profil de réponse Lait-

Les vaches ayant réduit modérément leur production de lait en réponse au challenge en CP_{DAC} (Lait-) étaient 44 au total, dont 11 dans le lot TemoinRC, 13 dans le lot TemoinRSC et 14 dans le lot Harpagon (Tableau 10). Pour ce profil de réponse en lait, la consommation moyenne de CP_{DAC} était de 2,2 kg MS/j/vache pour le lot Harpagon, et de 2,1 kg MS/j/vache pour les deux lots témoins ($P = 0,88$; Tableau 10). La consommation moyenne de ration de base s'élevait à 24 kg MS/j/vache pour le lot Harpagon, 23,5 kg MS/j/vache pour le lot TemoinRC et 22,8 kg MS/j/vache pour le lot TemoinRSC ($P = 0,19$; Tableau 10). Sur l'ingestion de ration totale, le lot Harpagon a enregistré une consommation moyenne de 26,2 kg MS/j/vache. Elle s'élevait en moyenne à 25,7 et 25 kg MS/j/vache pour les lots TemoinRC et TemoinRSC respectivement ($P = 0,21$; Tableau 10). La production laitière moyenne du lot Harpagon était de 32,4 kg/j/vache, et elle était de 29,8 et 30,6 kg/j/vache pour les lots TemoinRC et TemoinRSC respectivement ($P = 0,35$; Tableau 10). L'ENL était en moyenne de 14,6 UFL/j/vache pour les vaches du lot Harpagon, 13,3 UFL/j/vache pour le lot TemoinRC et 14,6 UFL/j/vache pour le lot TemoinRSC ($P = 0,12$; Tableau 10). Le gain d'état corporel était de 0,02 point pour le lot Harpagon et de 0,30 pour le lot TemoinRC, alors que le lot TemoinRSC a enregistré une perte moyenne de 0,03 point de NEC ($P = 0,01$; Tableau 10).

IV. Analyse et discussion

1. Des performances de production et d'ingestion comparables entre les lots Harpagon et TemoinRSC malgré des stratégies d'allocation individuelle du concentré différentes

Les lots TemoinRSC et Harpagon ont été menés avec une ration semi-complète, avec une part de concentré attribuée individuellement selon la production laitière pour le lot TemoinRSC et selon le profil de réponses après la période de challenge alimentaire pour le lot Harpagon. Avec une différence de consommation de concentrés de production non significative entre ces deux lots (Tableau 8) de seulement 0,2 kg MS/j/vache, nous pouvons considérer que les deux lots ont consommé en moyenne la même quantité de concentré individuel. Les résultats moyens d'ingestion, de performances et le recensement des évènements sanitaires (Tableau 8) ainsi que leurs évolutions moyennes au cours de l'essai (Annexe II) ne diffèrent pas entre ces deux lots, à l'exception de la teneur en lactose. En effet, la teneur moyenne en lactose du lait est significativement supérieure de 1,2 g/kg pour le lot TemoinRSC (Tableau 8, Annexe III). Cependant, cette différence n'est expliquée que par 3 individus du lot Harpagon, dont la teneur moyenne en lactose du lait entre la période de challenge et la période expérimentale a fortement chuté (- 10 g/kg environ) par rapport à la différence moyenne du lot (- 3,7 g/kg). Des mammites ou acidoses subcliniques peuvent être à l'origine d'une baisse de la teneur en lactose du lait (BROLIS HerdLine, s.d.). Bien qu'aucun évènement sanitaire (mammité ou problème métabolique) n'ait été recensé pour ces 3 individus, il est possible que ces vaches aient rencontré un problème de cette nature. Ces écarts de teneur moyenne en lactose du lait ne s'expliquent donc probablement pas par la différence de traitement des deux lots.

Malgré une consommation moyenne comparable entre les lots Harpagon et TemoinRSC durant la période expérimentale, l'analyse des courbes individuelles de consommation de CP_{DAC} met en évidence des différences significatives de dynamique d'évolution entre les vaches des deux lots (Figure 7). En effet, la quasi-totalité des vaches du lot Harpagon (20/23) se retrouve dans le groupe A, avec des courbes d'ingestion de CP_{DAC} plates et constantes, alors que les vaches du lot TemoinRSC se disséminent dans les 5 groupes, la majorité se caractérisant par des consommations décroissantes (13 vaches/23). Ces résultats sont cohérents avec les stratégies d'allocation du concentré adoptées pour ces deux lots : alors que la consigne de CP_{DAC} était établie en début de période expérimentale et constante pour les vaches du lot Harpagon, la consigne des vaches du lot TemoinRSC était soumise à révision toutes les 3 semaines. Pour autant, ces variations de dynamique d'ingestion du CP_{DAC} ne semblent pas avoir eu de conséquences sur les dynamiques individuelles d'ingestion de la ration de base, de production laitière ou encore du poids vif. En effet, la répartition des animaux des deux lots dans les groupes de courbes est relativement similaire (Figures 8, 9, 10). La différence entre les deux stratégies ne portait que sur une petite partie de la ration ce qui peut expliquer ces résultats. D'autre part, les changements de consigne sur la période expérimentale des vaches du lot TemoinRSC s'élevaient en moyenne à - 0,7 kg MS de CP_{DAC} ($\pm 0,7$). Dans un contexte de rations déjà bien pourvues en énergie et protéines, comme c'était le cas ici, les réponses marginales à un apport ou retrait d'1 kg de concentré énergétique se situent entre 0 kg lait/kg de concentré (Brun-Lafleur *et al.*, 2009) et $\pm 0,3$ kg lait/kg de concentré (Agabriel, 2007). Cela peut donc expliquer la relative similitude des distributions des courbes de production laitière des lots Harpagon et TemoinRSC.

Tableau 11 : Résultats de simulations des performances économiques des profils de réponse Lait0 et Auge++ pour les vaches des lots TemoinRSC et Harpagon d'après les résultats zootechniques expérimentaux (simulation pour 70 vaches sur 245 jours de lactation).

	Marge brute alimentaire ¹ (€)
Profil Lait0	
Lot TemoinRSC	183 249
Lot Harpagon	188 761
Différence Harpagon - TemoinRSC	5 512
Profil Auge++	
Lot TemoinRSC	179 266
Lot Harpagon	185 483
Différence Harpagon - TemoinRSC	6 217

¹Marge brute alimentaire = Produits – Charges opérationnelles

Les produits sont composés de la rémunération du lait vendu.

Les charges opérationnelles sont composées du coût de l'ensilage de maïs, de l'ensilage d'herbe (Raygrass Italien), du tourteau de colza, et du concentré de production qui ont été consommés.

Les simulations économiques chiffrent la marge brute alimentaire à 21 785 € pour le lot TemoinRSC et 21 696 € pour le lot Harpagon (Tableau 9). En extrapolant à un troupeau de 70 vaches, représentatif de l'élevage laitier français moyen (Gautié *et al.*, 2023), et une période de 245 jours de lactation après le pic (Chaire bien-être animal, 2021), la différence de marge brute alimentaire entre les lots TemoinRSC et Harpagon s'élèverait à 751 €, soit 0,4 % de plus pour le lot TemoinRSC par rapport au lot Harpagon. Les ingestions et performances de production très proches de ces deux lots expliquent ces résultats.

2. La stratégie d'alimentation de précision favorable à des profils de vaches capables de compenser à l'auge et/ou de maintenir leur production laitière

Les ingestions totales et les performances des vaches aux profils Auge++ et Lait0 durant la période expérimentale ne diffèrent pas (Tableau 10). Cependant, l'ingestion de concentrés de production est significativement plus faible pour le lot Harpagon dans le cas du profil Auge++, avec une moyenne à 1,5 kg de MSI/j contre 2,3 kg de MSI/j pour le lot TemoinRSC. Il en est de même pour le profil Lait0, avec une moyenne de consommation des concentrés de production de 1,4 kg de MSI/j pour le lot Harpagon et de 2,3 kg de MSI/j pour le lot TemoinRSC. Pour des profils qui compensent beaucoup à l'auge et/ou réduisent peu leur production laitière, il pourrait donc être intéressant d'alimenter ces derniers avec une stratégie d'alimentation de précision pour produire autant en diminuant la part des concentrés dans l'alimentation. Cela pourrait amortir les effets d'une fluctuation du prix des concentrés de production (Rouillé, 2022) et/ou améliorer l'autonomie alimentaire de la ferme (seulement 24% des concentrés consommés par les animaux sont produits sur la ferme ; Corre et Brasseur, 2023).

Les simulations économiques réalisées à partir des résultats zootechniques obtenus pour ces deux profils (Auge++ et Lait0) sont favorables à la stratégie d'alimentation de précision par rapport à la stratégie d'alimentation en ration semi-complète basée sur la production laitière (Tableau 11). En effet, pour un troupeau de 70 vaches sur 245 jours de lactation et pour le profil Lait0, la marge brute alimentaire est supérieure de 5 512 € en faveur du lot Harpagon. Dans le même contexte, pour le profil Auge++, la marge brute alimentaire du lot Harpagon est également supérieure par rapport à celle du lot TemoinRSC, avec 6 217 € de différence. Néanmoins, dans un contexte d'augmentation du prix du lait et/ou de baisse du prix des concentrés, la différence entre les deux stratégies serait réduite en raison de leur production laitière équivalente (Tableau 10).

Même si les résultats des profils Auge++ et Lait0 alimentés avec une stratégie d'alimentation de précision semblent intéressants par rapport à l'utilisation des ressources et d'un point de vue économique, il existe des contraintes à la mise en place de ces protocoles en ferme commerciale. En effet, la mise en place de la stratégie Harpagon suppose de pouvoir caractériser les profils de réponses à une réduction de CP_{DAC} . Et cela passe par l'utilisation d'outils de phénotypage, rarement acquis et conçus dans le but de faire de l'alimentation de précision mais plutôt pour remplacer une tâche d'astreinte (Nicolas et Allain, 2024). La présence de compteurs à lait en salle de traite ou sur des robots se démocratise de plus en plus en France (Nicolas et Allain, 2024), rendant possible aujourd'hui l'identification des vaches au profil Lait0. Néanmoins, caractériser le profil Auge++ ne peut se faire qu'en fermes expérimentales équipées de systèmes de mesure de l'ingestion individuelle à l'auge. Enfin, les économies potentielles attribuées à la stratégie Harpagon ne reposent que sur les animaux de

profils types Auge++ et Lait0. Or, ces profils ne représentent qu'une partie du troupeau (36% chacun dans notre essai) ce qui limite les économies potentielles à l'échelle du troupeau, et donc l'intérêt de cette méthode d'alimentation.

3. Des résultats de performance de production et d'ingestion proches entre la stratégie d'alimentation de précision et la ration complète

Les résultats moyens du lot TemoinRC, conduit en ration complète, et ceux du lot Harpagon, ne laissent apparaître aucune différence significative concernant l'ingestion du CP_{DAC} sur la période expérimentale (Tableau 8). Cela se vérifie également sur les courbes individuelles d'ingestion du CP_{DAC}, puisque l'intégralité des vaches du lot TemoinRC et la majorité de celle du lot Harpagon (20/23) se retrouvent dans le groupe A, avec une évolution plate et constante (Figure 7). Ce résultat permet d'étudier l'effet de la stratégie d'allocation du CP_{DAC} sur les performances des deux lots sans biais (quantités de CP_{DAC} équivalentes). Aucune différence d'ingestion, de production ou d'occurrences d'évènements sanitaires n'est mise en évidence entre les deux lots sur la période expérimentale (Tableau 8). L'absence de différences de performances zootechniques entre ces deux stratégies, en conditions iso-concentrés, sont en accord avec plusieurs études comparant une ration complète et une ration semi-complète standard (concentré individuel indexé sur la production laitière) dans des conditions proches (Purcell *et al.*, 2016 ; INRA, 2018). L'analyse des courbes individuelles ne montre pas non plus de différences de profils entre le lot TemoinRC et le lot Harpagon sur la production laitière et le poids vif (Figure 9, Figure 10). Concernant l'ingestion de la ration de base, la majorité des vaches du lot TemoinRC se trouve dans le groupe A (22 vaches sur les 23 du lot), qui a un profil plutôt décroissant mais avec un pic à la fin du mois d'avril (Figure 8). Cette période de pic correspond à la fin de la transition entre deux silos de maïs, à laquelle toutes les vaches du troupeau expérimental ont été soumises de manière équivalente. Il est donc important de prendre en compte le rôle et les effets de l'environnement dans l'interprétation de ces résultats, dont les différences ne sont pas toujours liées à la conduite alimentaire de chacun des lots.

4. Une preuve de concept réalisée mais un intérêt limité

Le premier objectif de cette expérimentation était de faire la preuve du concept d'alimentation de précision tel que défini dans le projet Harpagon. La caractérisation des profils de réponses et la mise en place du concept d'alimentation de précision ont été réalisées comme prévu. La mise en place de ce mode d'alimentation dit « de précision » nécessite des équipements et des modes de fonctionnement spécifiques (Van Empel *et al.*, 2016). Dans le cadre de ce projet, la réussite de la mise en place du protocole de restriction alimentaire et la distribution de différentes rations a principalement reposé sur l'équipement spécifique de la ferme expérimentale dans laquelle l'essai a eu lieu (DAC, compteurs à lait, auges peseuses). Cela a également été rendu possible grâce à la forte implication des techniciens présents sur place, et de leur temps passé pour le suivi des animaux et des appareils de mesure. Il semble donc actuellement compliqué, tant au niveau de l'investissement que de la main d'œuvre nécessaire, d'appliquer ce protocole d'alimentation de précision dans une ferme commerciale non équipée. En effet, même si les fermes s'équipent de plus en plus d'automates aujourd'hui (Nicolas et Allain, 2024), le retour d'investissement dans un robot de traite (388 000 € d'investissement brut pour 2 stalles ; Rubin, 2022), regroupant à la fois un compteur à lait et un DAC, est nul ou très long (plus de 60 ans ; Rubin, 2022). La priorité des éleveurs souhaitant

s'équiper ne sera donc pas de faire de l'alimentation de précision, mais bien d'alléger les contraintes horaires et diminuer la pénibilité du travail. De plus, le temps nécessaire à l'établissement de la règle de décision pour l'allocation des concentrés et la détermination des profils de réponses est trop important et peu optimisé à ce jour.

Le deuxième objectif de l'essai était de comparer un mode d'alimentation de précision, tel que défini dans le projet, avec deux modes d'alimentation classiques pratiqués en fermes commerciales : la ration complète et la ration semi-complète indexée sur la production laitière. Afin de comparer uniquement les résultats des lots expérimentaux sur la méthode d'allocation du concentré de production, il était nécessaire de se placer en conditions iso-concentrés. Cet objectif a été atteint et nous a permis de comparer les résultats obtenus sur les plans zootechnique et économique. Cette comparaison n'a pas permis de mettre en avant des bénéfices significatifs de l'alimentation de précision par rapport aux deux autres modes d'alimentation (Tableau 8). Malgré le cadre expérimental imposé, ces résultats ont été soumis à des influences environnementales indépendantes du mode d'alimentation de chacun des lots (événements sanitaires, qualité des aliments, changement de silo), et auraient donc pu être différents dans un autre contexte. Toutefois, si on ne cherche pas à atteindre un niveau équivalent de consommation de CP_{DAC} , l'identification des profils des animaux pourrait tout de même être une perspective intéressante pour faire des économies en ciblant les animaux nécessitant moins de concentrés (profils Auge++ et Lait0). Néanmoins, pour s'assurer de la validité de ces résultats sur le long terme, il sera nécessaire de s'assurer que les profils établis à un moment donné de la lactation perdurent dans le temps (Lehuraux, 2022).

Conclusion

L'essai réalisé à la ferme expérimentale des Trinottières (49) en 2024 a permis de mettre en œuvre le concept d'alimentation de précision proposé dans le projet Harpagon dans son intégralité. Dans un premier temps, des profils de réponses ont été établis pour chaque vache à la suite d'une restriction alimentaire en concentrés de production. Pour chaque profil de vache, une règle de décision d'allocation individuelle du concentré de production a été définie et mise en œuvre. Enfin, l'ingestion et les performances zootechniques des vaches alimentées avec cette méthode (lot expérimental) ont été comparées avec celles de deux autres lots témoins, l'un alimenté avec une ration complète et l'autre avec une ration semi-complète standard (concentré de production indexé sur la production laitière). Chaque lot a consommé en moyenne la même quantité de concentré de production, ce qui a permis d'étudier l'effet propre du mode d'alimentation sur les performances zootechniques des vaches des trois lots.

À l'échelle du lot, la mise en œuvre de l'alimentation de précision n'a pas mené à des niveaux d'ingestion et de performances différents. En consommant en moyenne la même quantité de concentré de production et de ration de base, les vaches ont eu les mêmes performances moyennes de production et variations corporelles à l'échelle du lot. Les résultats économiques, associés à ces performances zootechniques, n'ont pas non plus mis en évidence de différences entre le lot expérimental et les deux témoins.

A l'échelle individuelle, seules les dynamiques d'évolution de l'ingestion du concentré de production étaient différentes entre les vaches des 3 lots, avec une évolution constante et stable pour les vaches du lot expérimental et celles en ration complète, et plutôt décroissante pour les

vaches en ration semi-complète. Ces différences n'ont pas eu d'effet sur les dynamiques individuelles de production laitière.

Cet essai a permis d'identifier des vaches qui compensent beaucoup à l'auge et/ou perdent peu de lait lors d'une diminution d'apport en concentré de production. Celles-ci sont capables de maintenir leur production avec moins de concentré. L'alimentation de précision pourrait donc permettre de tirer parti de ces profils de vaches en leur offrant moins de concentré de production sans dégrader leurs performances. Il sera cependant nécessaire de vérifier la rémanence de ces profils au cours du temps. Enfin, la mise en œuvre du concept d'alimentation de précision en ferme commerciale nécessitera de simplifier le protocole, qui reste très chronophage par rapport aux gains économiques espérés.

Bibliographie

AGABRIEL, J., 2007. *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. Versailles : Quae. ISBN 978-2-7592-0020-7.

ANDRÉ, G., BERENTSEN, P. B. M., VAN DUINKERKEN, G., ENGEL, B. et LANSINK, A. G. J. M. Oude, 2010. Economic potential of individual variation in milk yield response to concentrate intake of dairy cows. *The Journal of Agricultural Science* [en ligne]. juin 2010. Vol. 148, n° 3, pp. 263-276. [Consulté le 24 avril 2024]. DOI 10.1017/S0021859610000134. Disponible à l'adresse : https://www.cambridge.org/core/product/identifieur/S0021859610000134/type/journal_article

BACH, A., 2014. Precision Feeding to Increase Efficiency for Milk Production. *WCDS Advances in Dairy Technology* [en ligne]. 2014. Vol. 26, pp. 177-189. [Consulté le 6 mars 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.semanticscholar.org/paper/Precision-Feeding-to-Increase-Efficiency-for-Milk-Bach/5e06ee848b30610d56bc49dc8afc6d54b7984df0>

BARRIENTOS-BLANCO, J.A., WHITE, H., SHAVER, R.D. et CABRERA, V.E., 2020. Improving nutritional accuracy and economics through a multiple ration-grouping strategy. *Journal of Dairy Science* [en ligne]. avril 2020. Vol. 103, n° 4, pp. 3774-3785. [Consulté le 6 mars 2024]. DOI 10.3168/jds.2019-17608. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022030220300953>

BAZIN, S., 1984. *Grille de notation de l'état d'engraissement des vaches Pie Noires*. Paris, France : Institut Technique de l'Élevage Bovin.

BENCHAAR, C. et HASSANAT, F., 2021. Method of diet delivery to dairy cows: Effects on nutrient digestion, rumen fermentation, methane emissions from enteric fermentation and stored manure, nitrogen excretion, and milk production. *Journal of Dairy Science* [en ligne]. novembre 2021. Vol. 104, n° 11, pp. 11686-11698. [Consulté le 29 mai 2024]. DOI 10.3168/jds.2021-20466. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022030221007943>

BONNEAU, H., 2024. Aurora Nir : un laboratoire d'analyse à portée de main. *Agri79* [en ligne]. 4 mai 2024. [Consulté le 30 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.caracterres.fr/aurora-nir-un-laboratoire-danalyse-portee-de-main>

BROLIS HERDLIN, s.d. Valeur diagnostique du lactose dans le lait. [en ligne]. s.d. [Consulté le 16 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://brolisherdlin.com/fr/lactose-dans-le-lait/>

BRUN-LAFLEUR, L., DELABY, L., LASSALAS, J., FARGETTON, M., HUSSON, F. et FAVERDIN, P., 2009. Prédiction de l'effet des interactions énergie × protéines sur la production et la composition du lait chez la vache laitière. *Rencontres Recherches Ruminants* [en ligne]. 2009. Vol. 16, pp. 37-40. Disponible à l'adresse : <https://www.journees3r.fr/spip.php?article2777>

CASSEL, E.K., MERRILL, W.G., MILLIGAN, R.A. et GUEST, R.W., 1984. Evaluation of Systems for Feeding Supplemental Concentrate to Cows in Groups. *Journal of Dairy Science* [en ligne]. mars 1984. Vol. 67, n° 3, pp. 560-568. [Consulté le 4 juillet 2024]. DOI 10.3168/jds.S0022-0302(84)81339-9. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022030284813399>

CERFRANCE, 2023. Observatoire production laitière - Campagne 2022-2023. *L'Atelier des études économiques* [en ligne]. 15 septembre 2023. [Consulté le 6 juin 2024]. Disponible à l'adresse : <https://normandiemaine.cerfrance.fr/latelier/observatoire-production-laitiere-campagne-2022-2023/>

CEROSALETTI, P. et DEWING, D., 2008. What is precision feed management? *Northeast Dairy Business*. 1 janvier 2008. pp. 15.

CHAIRE BIEN-ÊTRE ANIMAL, 2021. Les vaches laitières produisent spontanément du lait toute l'année, vrai ou faux ? [en ligne]. 30 juin 2021. [Consulté le 16 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://chaire-bea.vetagro-sup.fr/les-vaches-laitieres-produisent-elles-spontanement-du-lait-toute-lannee/>

CHAMBRE D'AGRICULTURE DES PAYS DE LA LOIRE, 2024. Coûts des fourrages. [en ligne]. 24 avril 2024. [Consulté le 22 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.perel.autonomie-fourragere-des-elevages.fr/couts-des-fourrages/>

CHASTAND-MAILLARD, S. et SAINT-DIZIER, M., 2016. *Elevage de précision*. Editions France Agricole. Agriproduction. ISBN 978-2-85557-460-8.

CNIEL, 2023. *Economie laitière en chiffres - Édition 2023* [en ligne]. [Consulté le 28 mars 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.calameo.com/read/002230051f03d65734467Z>

CORRE, C. et BRASSEUR, C., 2023. *Les chiffres clés de l'alimentation des vaches laitières* [en ligne]. Institut de l'Élevage. [Consulté le 5 avril 2024]. ISBN 978-2-7148-0287-3. Disponible à l'adresse : <https://idele.fr/detail-article/chiffres-cles-de-lalimentation-des-vaches-laitieres>

CUTULLIC, E., DELABY, L., EDOUARD, N. et FAVERDIN, P., 2013. Rôle de l'équilibre en azote dégradable et de l'alimentation protéique individualisée sur l'efficacité d'utilisation de l'azote. In : [en ligne]. 2013. [Consulté le 10 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.journees3r.fr/spip.php?article3597>

DELAVAL, 2024. DelPro™ FarmManager - DeLaval. [en ligne]. 2024. [Consulté le 25 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.delaval.com/fr/decouvrez/gestion-de-troupeau/delaval-delpro/applications/delpro-farmmanager/>

DEVUN, J. et GUINOT, C., 2012. *Alimentation des bovins : rations moyennes et autonomie alimentaire* [en ligne]. Compte-rendu. Institut de l'Élevage. [Consulté le 27 mars 2024]. Résultats. Disponible à l'adresse : https://www.idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace:/SpacesStore/b78e5cd9-7c5f-4d8f-a284-99369ffa33ff

DIJKSTRA, J, OENEMA, O et BANNINK, A, 2011. Dietary strategies to reducing N excretion from cattle: implications for methane emissions. *Current Opinion in Environmental Sustainability* [en ligne]. octobre 2011. Vol. 3, n° 5, pp. 414-422. [Consulté le 8 mars 2024]. DOI 10.1016/j.cosust.2011.07.008. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877343511000650>

DOLLÉ, J.B., DELABY, L., PLANTUREUX, S., MOREAU, S., AMIAUD, B., CHARPIOT, A., MANNEVILLE, V., CHANSEAUME, A., CHAMBAUT, H. et LE GALL, A., 2013. Impact environnemental des systèmes bovins laitiers français. FAVERDIN, P., LEROUX, C. et BAUMONT, R. (éd.), *INRA Productions Animales* [en ligne]. 2013. Vol. 26, n° 2, pp. 207-220. [Consulté le 1 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hal.science/hal-01210434>

DOLLÉ, J.B., MOREAU, S., BROCAS, C., GAC, A., RAYNAL, J. et DUCLOS, A., 2015. *Elevage de ruminants et changement climatique*. Institut de l'Elevage. L'Essentiel. ISBN 978-2-36343-625-2.

DUROY, S., COUET, S. et PROUDOM, Y., 2023. Identification électronique des bovins. [en ligne]. 12 mai 2023. [Consulté le 30 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://idele.fr/identification-tracabilite/publications/detail-article?tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Baction%5D=showArticle&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bcontroller%5D=Detail&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bpublication%5D=5696&cHash=2a30c2fa7a419d5bb46b3d9bbda0572c

EILYPS, s.d. L'élevage : terrain de jeux des innovations et nouvelles technologies. *Eilyps* [en ligne]. s.d. [Consulté le 28 mars 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.eilyps.fr/developpement/innovation-elevage/>

ESTEL, 2022. DATAHUB 360°®. [en ligne]. 23 juin 2022. [Consulté le 5 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.estel-numerique.com/portfolio/datahub-360/>

FAGON, J. et HOSTIOU, N., 2015. L'utilisation de nouvelles technologies en élevage : quels équilibres pour le travail des éleveurs ? *4ès Rencontres Nationales Travail en élevage* [en ligne]. Dijon. 5 novembre 2015. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://idele.fr/rmt-travail/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2Fb49831c2-d6e6-45e6-9762-77f78621a3fd&cHash=2042a42a7a591cf722f5c12624c126ef

FISCHER, A., 2017. *Etude de la variabilité interindividuelle de l'efficacité alimentaire de la vache laitière* [en ligne]. Rennes : Agrocampus Ouest. [Consulté le 26 mars 2024]. Disponible à l'adresse : <http://www.theses.fr/2017NSARB296>

FISCHER, A., DELAGARDE, R. et FAVERDIN, P., 2018. Identification of biological traits associated with differences in residual energy intake among lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science* [en ligne]. mai 2018. Vol. 101, n° 5, pp. 4193-4211. [Consulté le 21 mai 2024]. DOI 10.3168/jds.2017-12636. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022030218300274>

FISCHER, A., EDOUARD, N. et FAVERDIN, P., 2020. Precision feed restriction improves feed and milk efficiencies and reduces methane emissions of less efficient lactating Holstein cows without impairing their performance. *Journal of Dairy Science* [en ligne]. mai 2020. Vol. 103, n° 5, pp. 4408-4422. [Consulté le 26 mars 2024]. DOI 10.3168/jds.2019-17654. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022030220301594>

FISCHER, A. et JURQUET, J., 2023. CASDAR Harpagon : Pilotage de précision de l'alimentation des vaches laitières pour un élevage multi-performant. [en ligne]. 11 janvier 2023. [Consulté le 22 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://idele.fr/harpagon/publications/detail?tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Baction%5D=showArticle&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bcontroller%5D=Detail&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bpublication%5D=18106&cHash=db10b5071c52e9d475e1abaa249842d3

FISCHER, A., JURQUET, J. et CHEVALIER, G., 2023. L'alimentation à la Harpagon : qu'en dit le terrain ? [Replay] *Webinaire Harpagon #3* [en ligne]. 18 décembre 2023. [Consulté le 24 avril 2024]. Disponible à l'adresse : https://idele.fr/harpagon/publications/detail?tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Baction%5D=showArticle&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bcontroller%5D=Detail&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bpublication%5D=19989&cHash=3a8656cce015dbbc64d0a7dd806dcba7

FISCHER, A., LUGINBÜHL, T., DELATTRE, L., DELOUARD, J.M. et FAVERDIN, P., 2015. Rear shape in 3 dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science* [en ligne]. juillet 2015. Vol. 98, n° 7, pp. 4465-4476. [Consulté le 19 juin 2024]. DOI 10.3168/jds.2014-8969. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022030215002933>

FOX, J. et WEISBERG, S., 2019. *An R Companion to Applied Regression* [en ligne]. 3. Thousand Oaks CA : Sage. Disponible à l'adresse : <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>

GARG, M. R., SHERASIA, P. L., BHANDERI, B. M., PHONDBA, B. T., SHELKE, S. K. et MAKKAR, H. P. S., 2013. Effects of feeding nutritionally balanced rations on animal productivity, feed conversion efficiency, feed nitrogen use efficiency, rumen microbial protein supply, parasitic load, immunity and enteric methane emissions of milking animals under field conditions. *Animal Feed Science and Technology* [en ligne]. 2013. Vol. 179, n° 1, pp. 24-35. DOI <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.11.005>. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377840112003902>

GAUTIÉ, I., PAILLETTE, E., FRÉTIÈRE, K. et GROSMEISNIL, O., 2023. 4 : *Les exploitations bovines laitières en France métropolitaine en 2020* [en ligne]. Agreste. Les dossiers. Disponible à l'adresse : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Dos2304/Dossiers2023-4_BovinsLait.pdf

GENOLINI, C., ALACOQUE, X., SENTENAC, M. et ARNAUD, C., 2015. kml and kml3d: R Packages to Cluster Longitudinal Data. *Journal of Statistical Software*. 2015. Vol. 65, n° 4, pp. 1-34. DOI 10.18637/jss.v065.i04.

IGIER, A., PETILLON-PRONK, A., MARTIN, J., HERTAULT, E., GAUDILLIERE, N., JURQUET, J., FISCHER, A. et LE COZLER, Y., 2023. Precision feeding in dairy cows: what do professionals in ruminant nutrition think about it ? In : *EAAP*. Lyon. 28 août 2023. pp. 897.

INRA, 2018. *Alimentation des ruminants*. Versailles, France : Editions Quae. ISBN 978-2-7592-2867-6.

INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2022a. Synthèse BL plaine spécialisé - Evolution pluriannuelle. *Institut de l'Élevage* [en ligne]. 2022. [Consulté le 1 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : https://idele.fr/observatoire-inosys?tx_ideleinosys_inosys%5Baction%5D=synthese&tx_ideleinosys_inosys%5Bcontrôle%5D=Inosys&cHash=882ea4a3123808ab552c55d36ee67303

INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2022b. Synthèse BL tous systèmes (livreurs conventionnels). *Observatoire INOSYS - Réseaux d'élevage* [en ligne]. 2022. [Consulté le 28 mars 2024]. Disponible à l'adresse : https://idele.fr/observatoire-inosys?tx_ideleinosys_inosys%5Baction%5D=synthese&tx_ideleinosys_inosys%5Bcontrôle%5D=Inosys&cHash=882ea4a3123808ab552c55d36ee67303

KALANTARI, A.S., ARMENTANO, L.E., SHAVER, R.D. et CABRERA, V.E., 2016. Economic impact of nutritional grouping in dairy herds. *Journal of Dairy Science* [en ligne]. février 2016. Vol. 99, n° 2, pp. 1672-1692. [Consulté le 6 mars 2024]. DOI 10.3168/jds.2015-9810. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022030215008784>

KUZNETSOVA, A., BROCKHOFF, P.B. et CHRISTENSEN, R.H.B., 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software* [en ligne]. 2017. Vol. 82, n° 13, pp. 1-26. DOI 10.18637/jss.v082.i13. Disponible à l'adresse : <https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v082i13>

LEHURAUX, R., 2022. *Caractérisation de profils individuels de réponses de vaches laitières à une réduction en concentré de production*. L'Institut Agro Dijon.

LELY, 2024. Lely Horizon. [en ligne]. 2024. [Consulté le 25 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.ley.com/fr/solutions/farm-management/horizon/>

LELY CENTER HOLSWORTHY, 2021. DLM feeding module webinar. [en ligne]. 29 janvier 2021. [Consulté le 25 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=wydUNtWymXQ>

MINÉRY, S., FISCHER, A., JURQUET, J., ROUILLÉ, B. et BALLOT, N., 2017. *Comprendre les facteurs de variation de l'efficacité alimentaire des vaches laitières* [en ligne]. avril 2017. Institut de l'Élevage. [Consulté le 21 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://idele.fr/umt-ebis/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F6298e05b-9a6a-4e1a-ae6d-e64fa61e2625&cHash=8f6c37e78fbd9b983aa2ffec6adb0a50

MOREY, L., BACH, A., SABRIÀ, D., RIAU, V., FERNÁNDEZ, B. et TERRÉ, M., 2023. Effectiveness of precision feeding in reducing N excretion in dairy cattle. *Animal Feed Science and Technology* [en ligne]. octobre 2023. Vol. 304, pp. 115722. [Consulté le 6 mars 2024]. DOI 10.1016/j.anifeedsci.2023.115722. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377840123001566>

NICOLAS, E. et ALLAIN, C., 2024. Les équipements numériques des élevages bovins laitiers. *Sm@rt élevage* [en ligne]. 16 janvier 2024. [Consulté le 8 mars 2024]. Disponible à l'adresse : https://idele.fr/smartelevage/publications/detail-article?tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Baction%5D=showArticle&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bcontroller%5D=Detail&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bpublication%5D=20040&cHash=23159bfc54e250b9c3ec7469e1d9c524

PERREAU, J.M., 2021. *Conduire son troupeau de vaches laitières*. 2. Editions France Agricole. Elevage bovin. ISBN 978-2-85557-711-1.

POMAR, C., VAN MILGEN, J. et REMUS, A., 2019. 18: Precision livestock feeding, principle and practice. In : *Poultry and pig nutrition* [en ligne]. Brill | Wageningen Academic. pp. 397-418. [Consulté le 6 juin 2024]. ISBN 978-90-8686-884-1. Disponible à l'adresse : <https://brill.com/view/book/9789086868841/BP000019.xml>

PURCELL, P.J., LAW, R.A., GORDON, A.W., MCGETTRICK, S.A. et FERRIS, C.P., 2016. Effect of concentrate feeding method on the performance of dairy cows in early to mid lactation. *Journal of Dairy Science* [en ligne]. avril 2016. Vol. 99, n° 4, pp. 2811-2824. [Consulté le 24 avril 2024]. DOI 10.3168/jds.2015-9988. Disponible à l'adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022030216000564>

R CORE TEAM, 2024. *R: A Language and Environment for Statistical Computing* [en ligne]. 2024. Vienne, Autriche : R Foundation for Statistical Computing. Disponible à l'adresse : <https://www.R-project.org/>

ROUILLÉ, B., 2022. En élevage bovins lait, des solutions pour maîtriser son coût alimentaire. *Institut de l'Élevage* [en ligne]. 23 mars 2022. [Consulté le 19 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://idele.fr/detail-article/en-elevage-bovins-lait-des-solutions-pour-maitriser-son-cout-alimentaire>

RUBIN, B., 2022. Evaluer la rentabilité des investissements en élevage laitier. *Institut de l'Élevage* [en ligne]. 19 décembre 2022. [Consulté le 23 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://idele.fr/detail-article/evaluer-la-rentabilite-des-investissements-en-elevage-laitier>

SAUVANT, D., GIGER-REVERDIN, S., SERMENT, A. et BROUDISCOU, L., 2011. Influences des régimes et de leur fermentation dans le rumen sur la production de méthane par les ruminants. *INRAE Productions Animales* [en ligne]. 8 décembre 2011. Vol. 24, n° 5, pp. 433-446. [Consulté le 26 mars 2024]. DOI 10.20870/productions-animales.2011.24.5.3276. Disponible à l'adresse : <https://productions-animales.org/article/view/3276>

SINGH, N., AWASTHI, A., PATEL, P. et KUMAR, G., 2022. Total Mixed Ration Feeding of Dairy Cows. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*. 27 avril 2022. Vol. 15, n° 4, pp. 25-27. DOI 10.9790/2380-1504012527.

VAN EMPEL, M.J.M., MAKKAR, H.P.S., DIJKSTRA, J. et LUND, P., 2016. Nutritional, technological and managerial parameters for precision feeding to enhance feed nutrient utilization and productivity in different dairy cattle production systems. *CABI Reviews* [en ligne]. 7 décembre 2016. pp. 1-27. [Consulté le 7 mars 2024]. DOI 10.1079/PAVSNNR201611037. Disponible à l'adresse : <http://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/PAVSNNR201611037>

WOLTER, R. et PONTER, A., 2019. *Alimentation de la vache laitière*. 5. Editions France Agricole. Agriproduction. ISBN 978-2-85557-598-8.

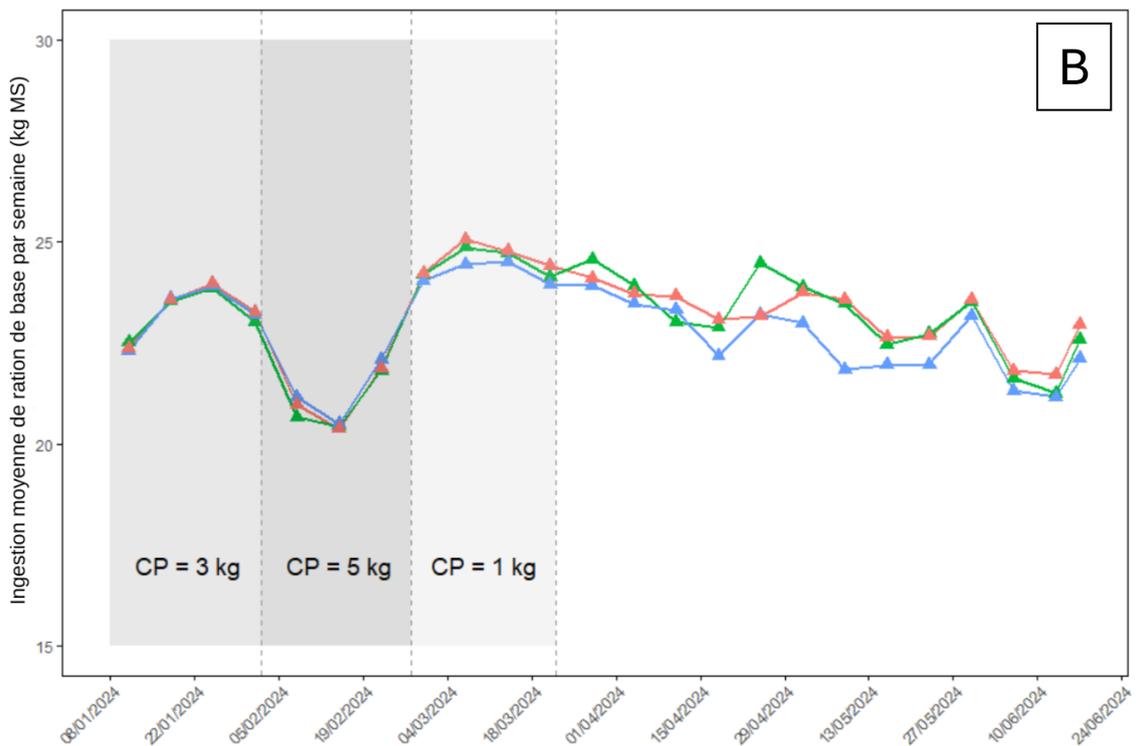
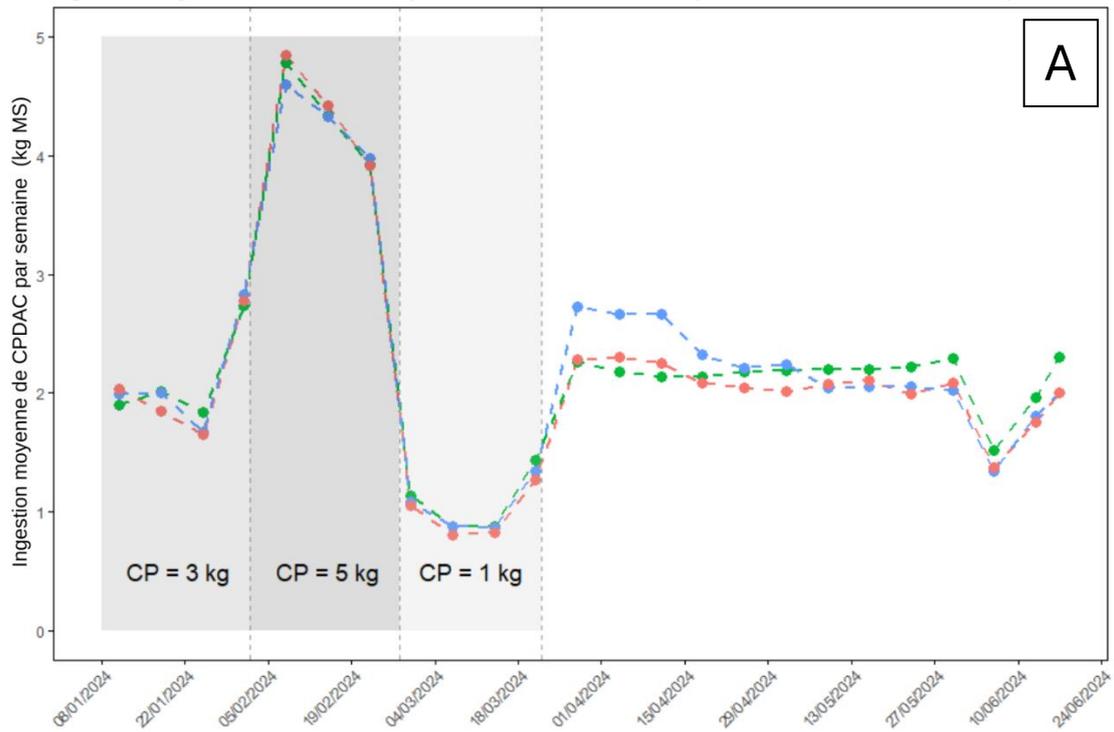
Annexes

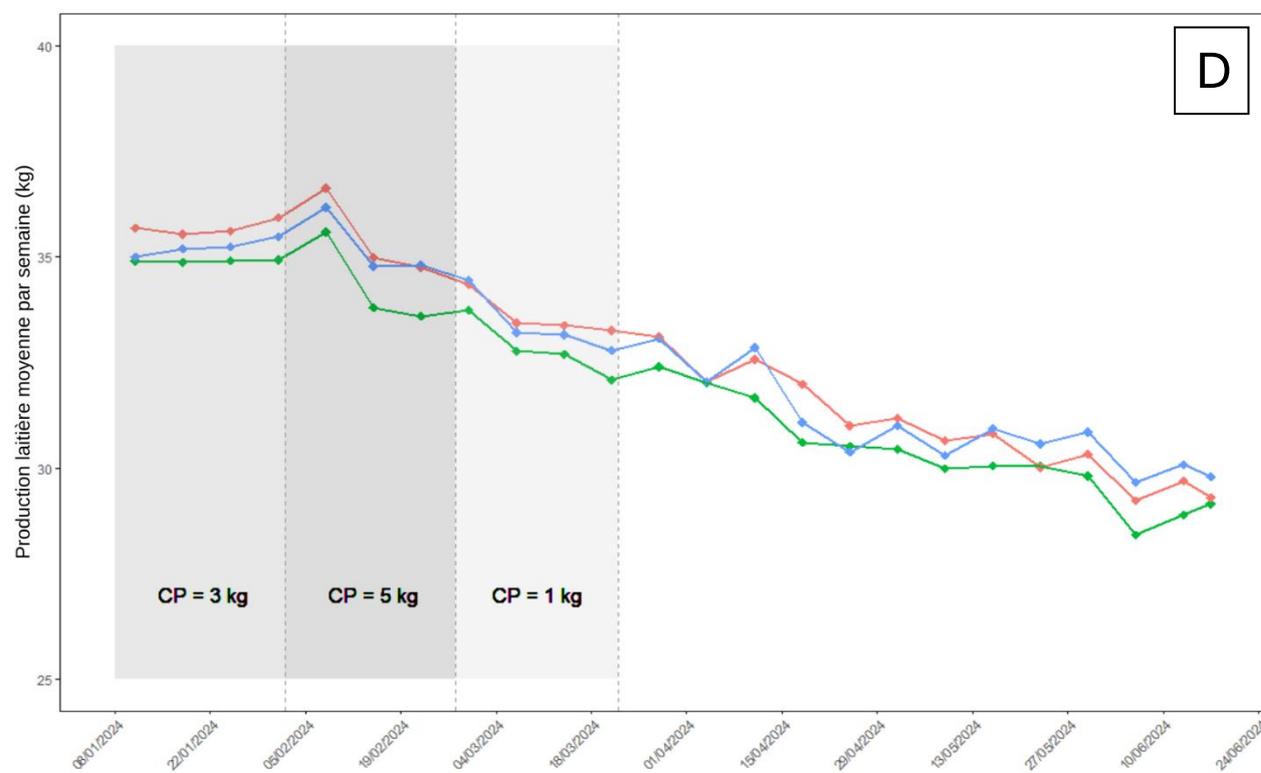
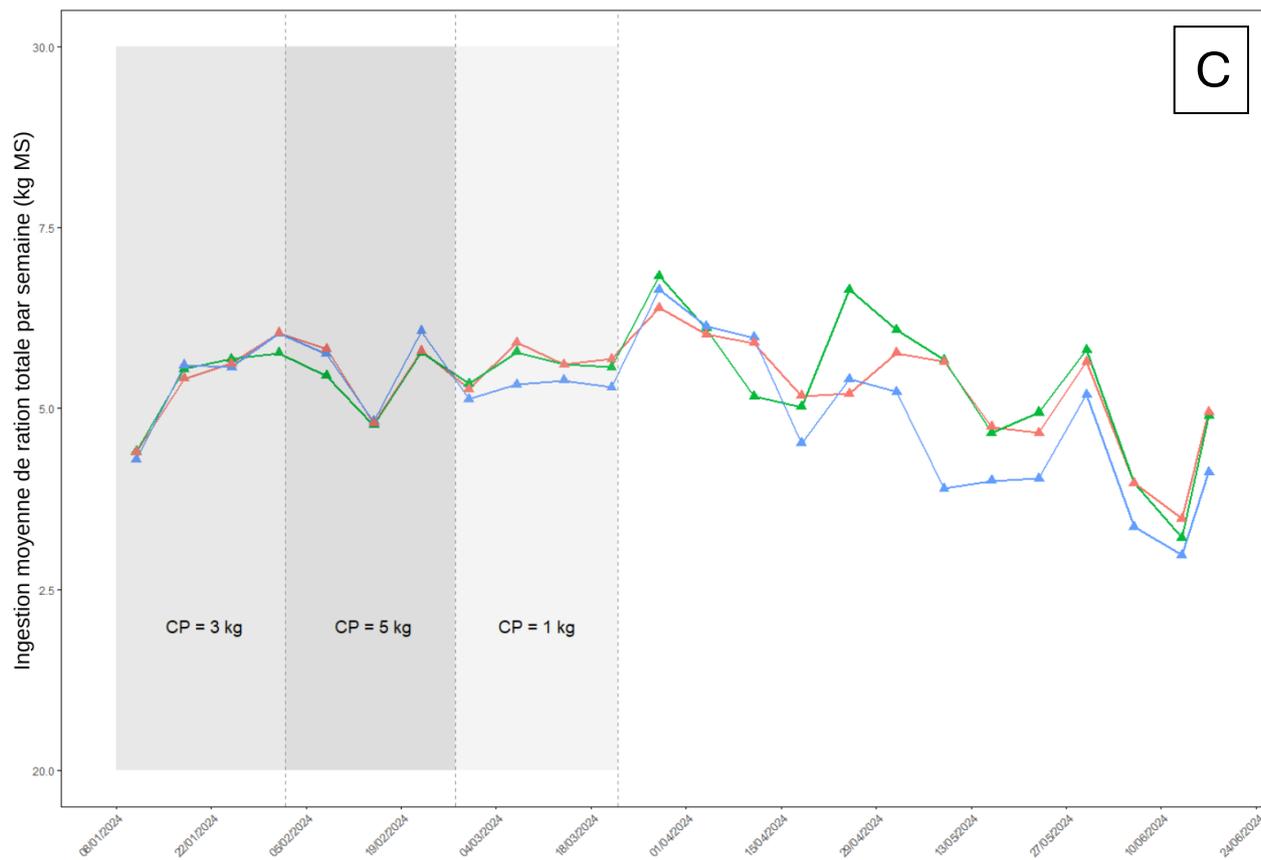
Annexe I : Composition du concentré de production

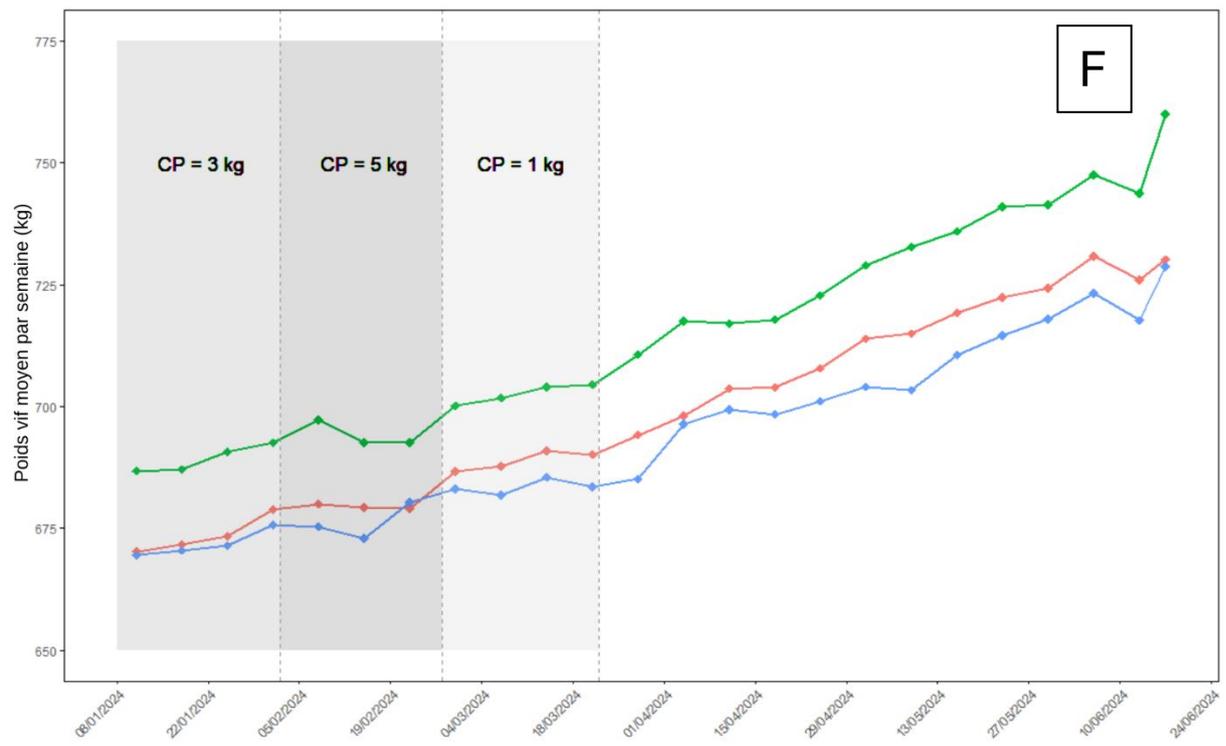
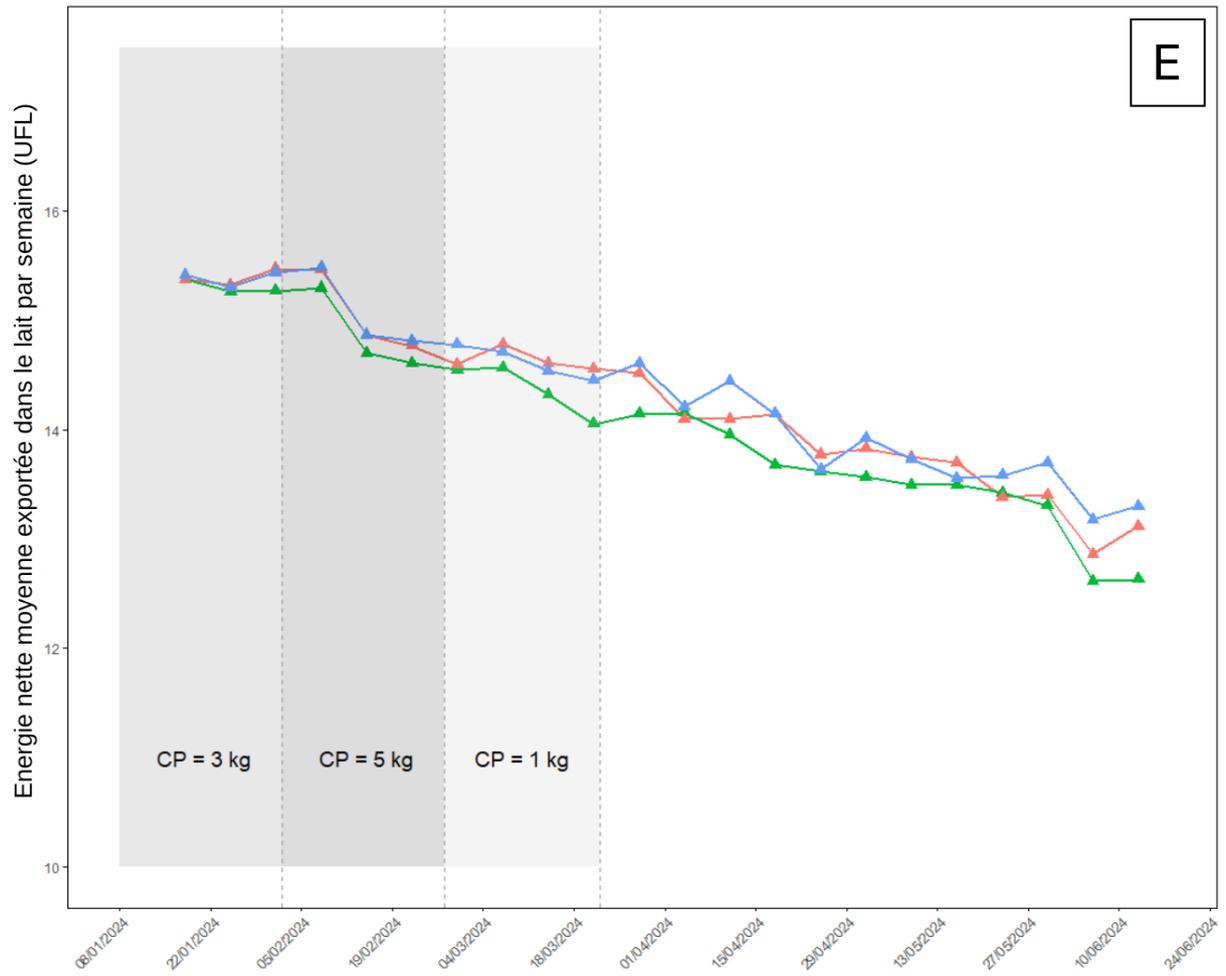
Composition (%)	
Pulpes de betteraves déshydratées	40
Tourteau industriel de colza	25
Son de blé	23
Maïs grain	10
Mélasses de betterave	2
Caractéristiques	
Matière sèche (%)	87,6
UFL (/kg MS)	1,02
PDI (g/kg MS)	105
BalProRu (/kg MS)	22
MAT (g/kg MS)	183
CB (g/kg MS)	147
Amidon (g/kg MS)	144

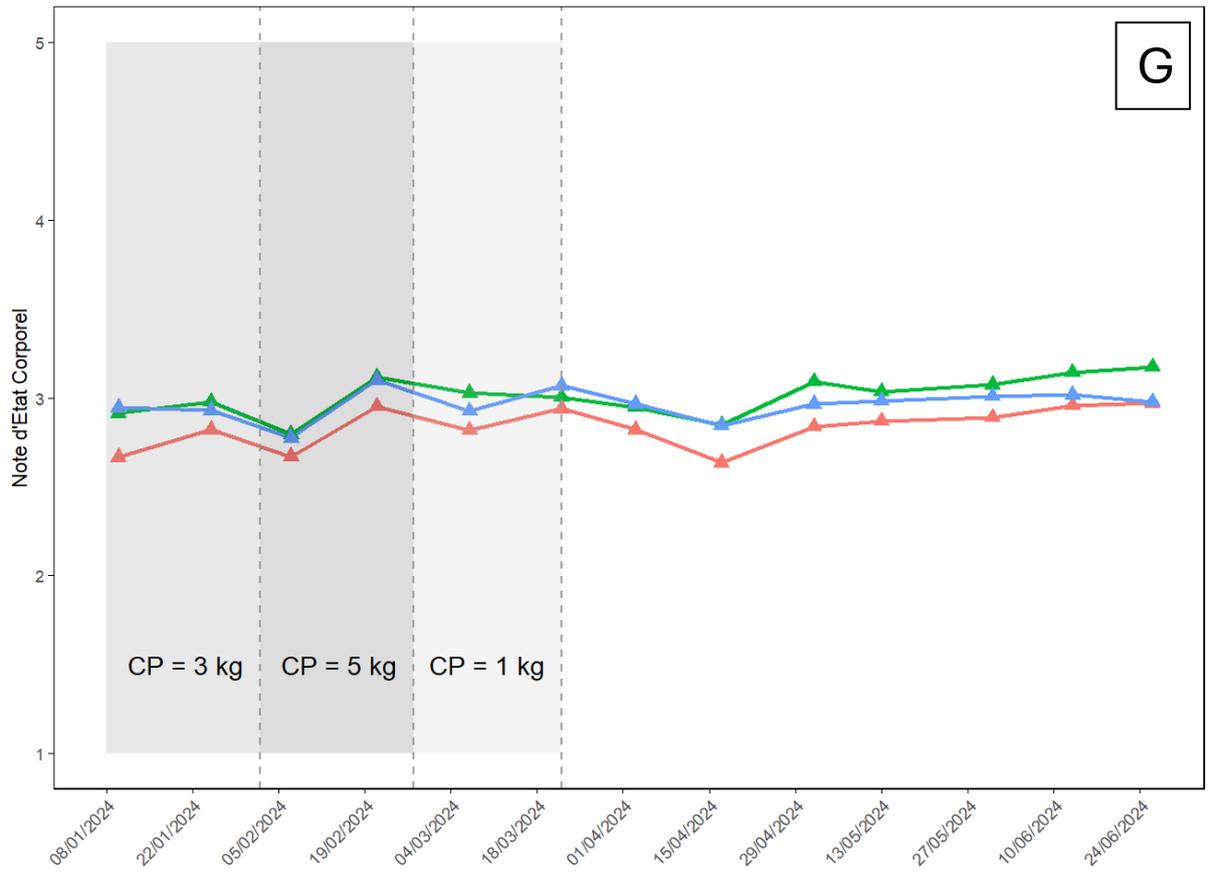
Annexe II : Dynamiques d'évolution des courbes moyennes des lots pour l'ingestion du concentré de production (A), de la ration de base (B), de la ration totale (C), la production laitière (D), l'énergie nette exportée dans le lait (E), le poids vif (F) et la note d'état corporel (G) sur l'ensemble de l'essai

Lot TemoinRC en vert / Lot TemoinRSC en bleu / Lot Harpagon en rouge / CP : Concentré de Production. La période pré-expérimentale est colorée en nuances de gris, correspondant aux niveaux de concentré distribué.



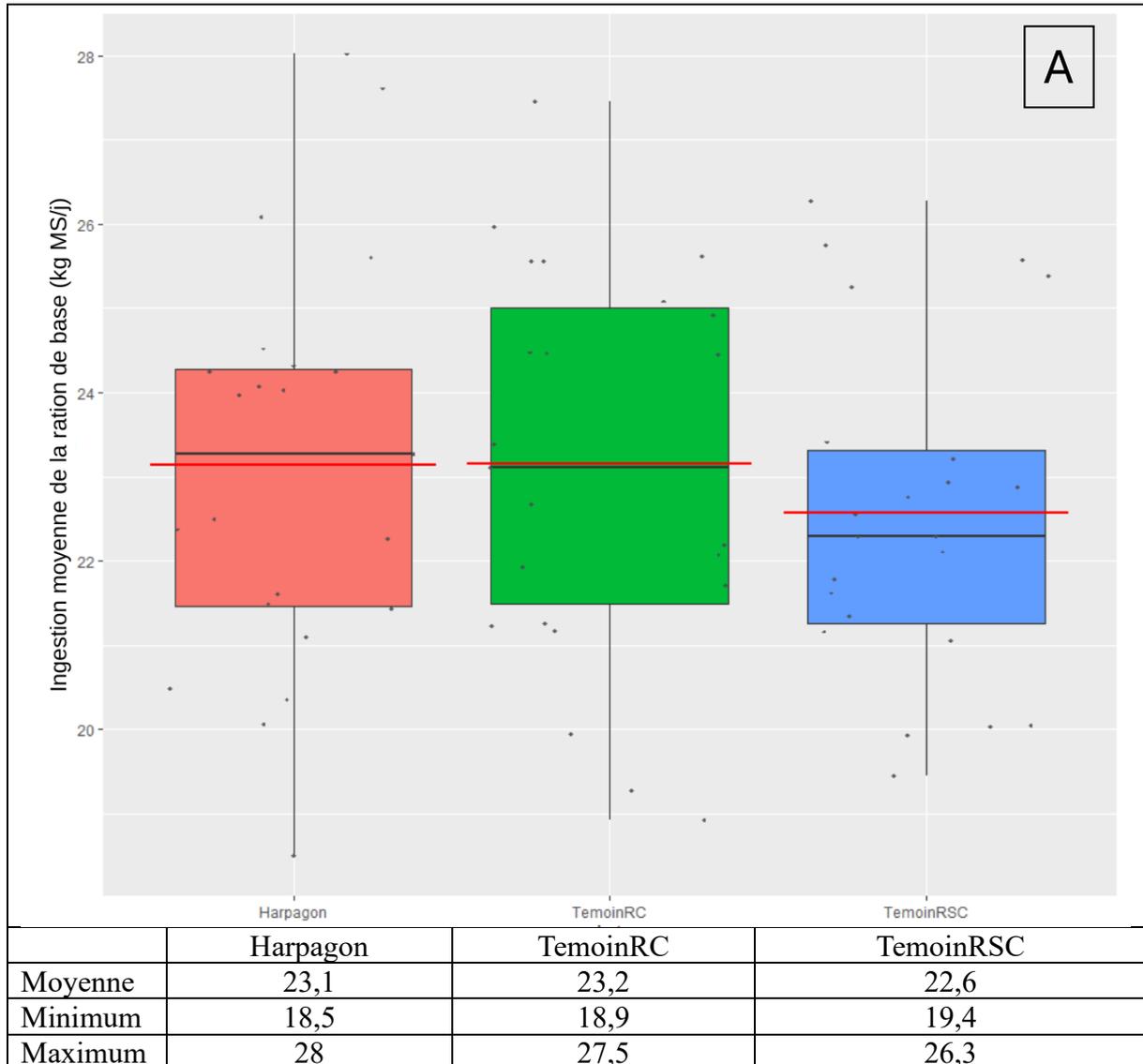


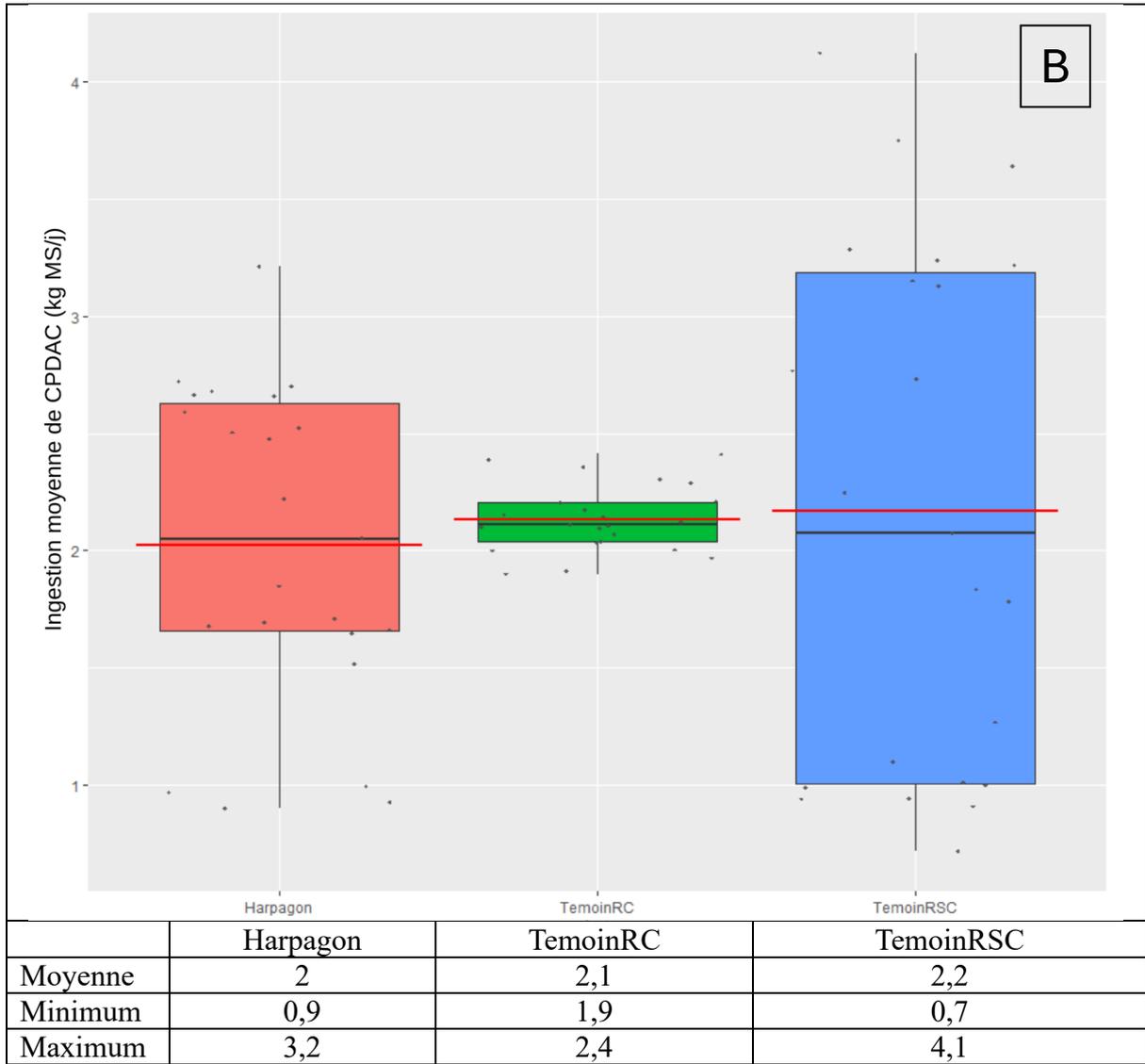


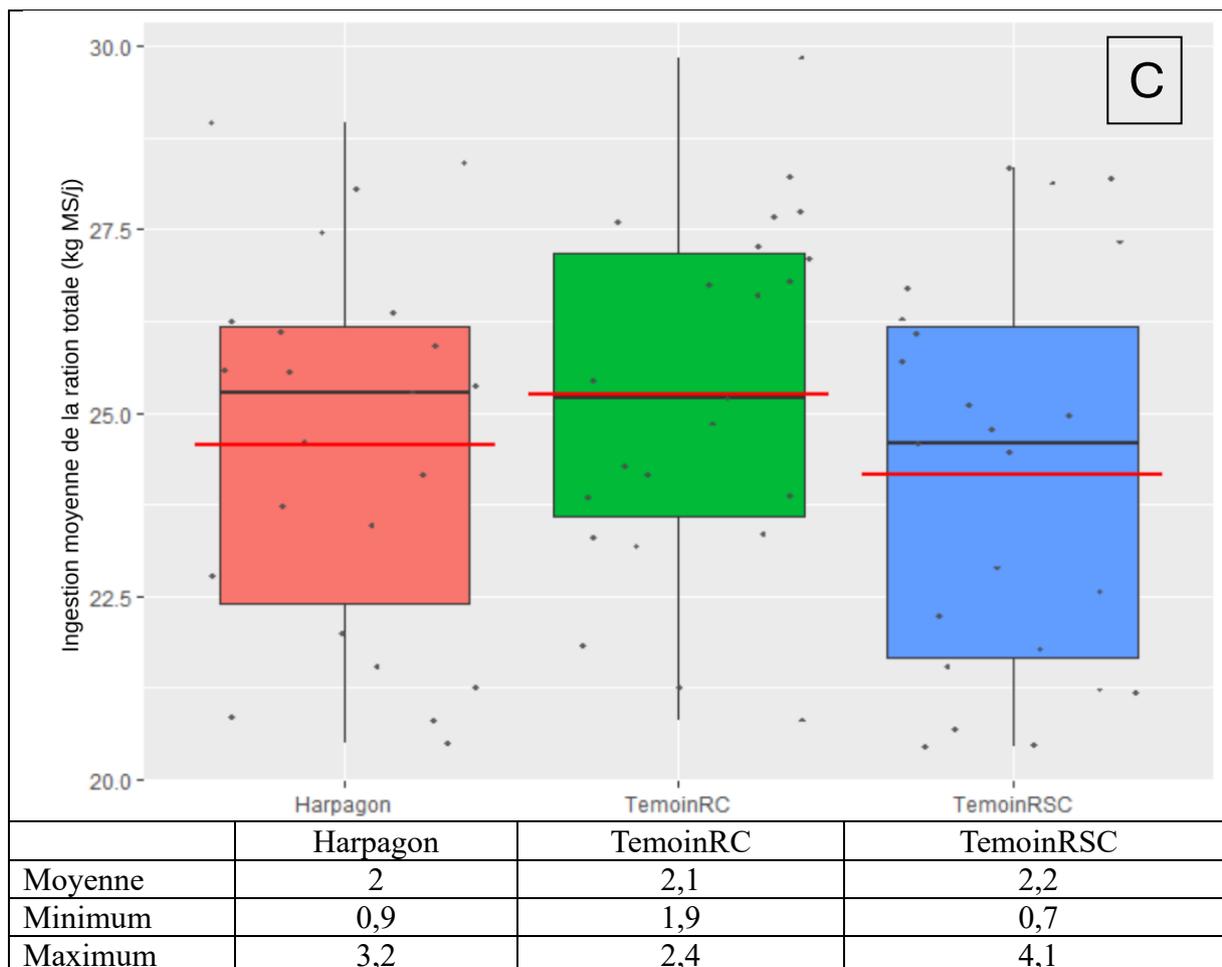


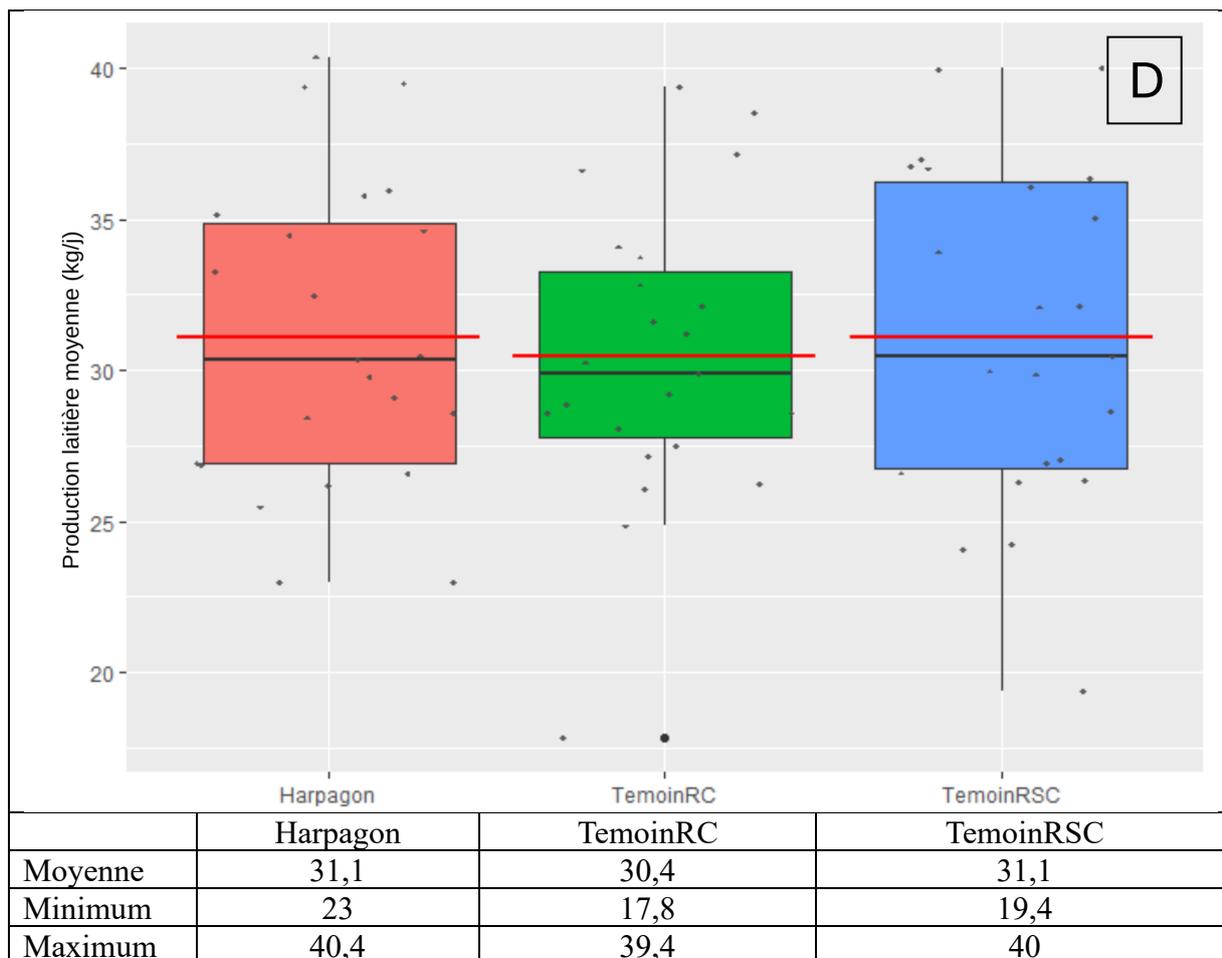
Annexe III : Boîtes à moustache des moyennes des variables mesurées lors de l'essai (ingestion de la ration de base (A), ingestion du concentré de production (B), ingestion totale (C), production laitière (D), taux butyreux (E), taux protéique (F), lactose (G), énergie nette exportée dans le lait (H), poids vif (I), note d'état corporel (J)) pour chacun des lots

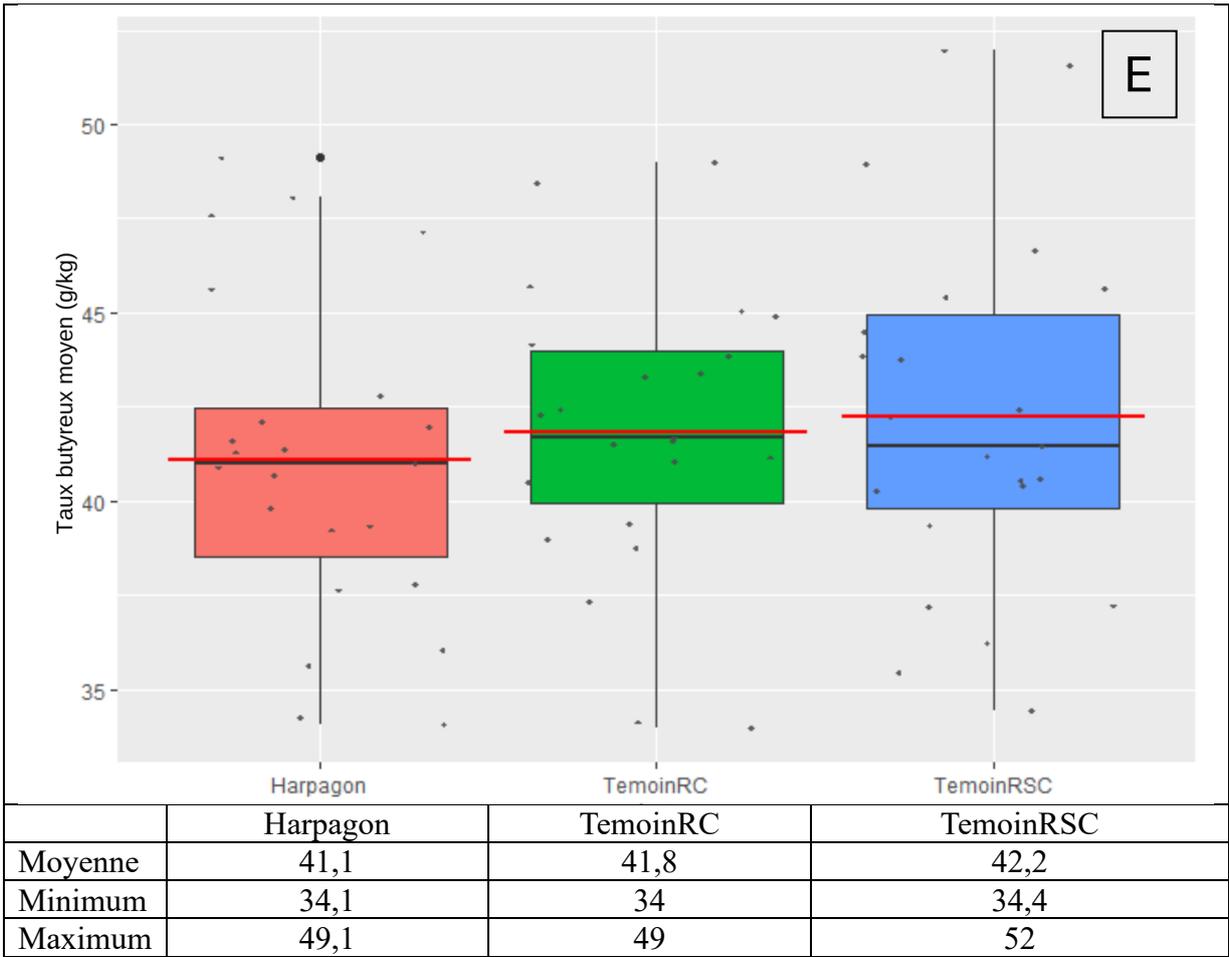
Lot TemoinRC en vert / Lot TemoinRSC en bleu / Lot Harpagon en rouge / CPDAC : Concentré de Production. La médiane est représentée par le trait horizontal noir, la moyenne est représentée par le trait horizontal rouge.

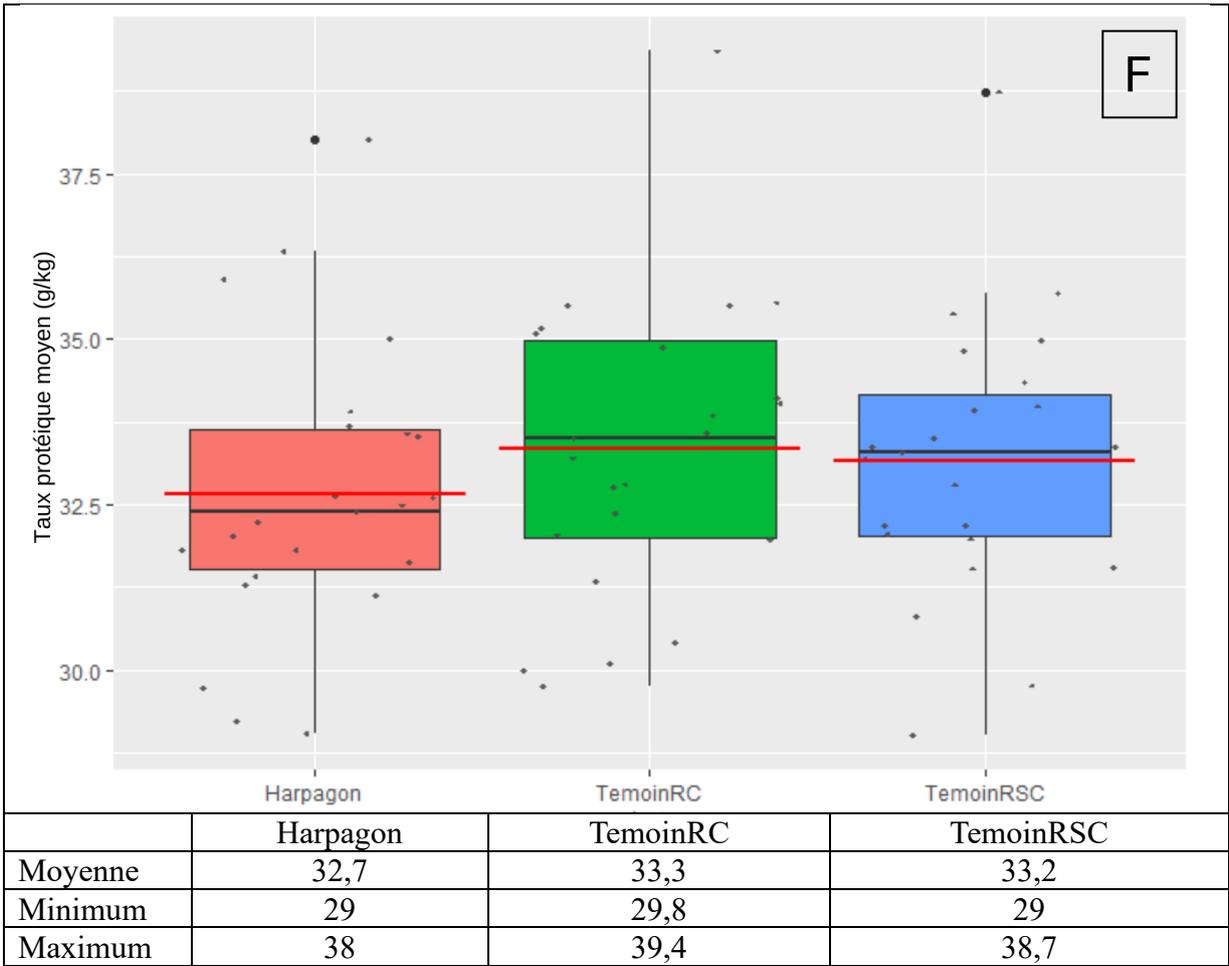


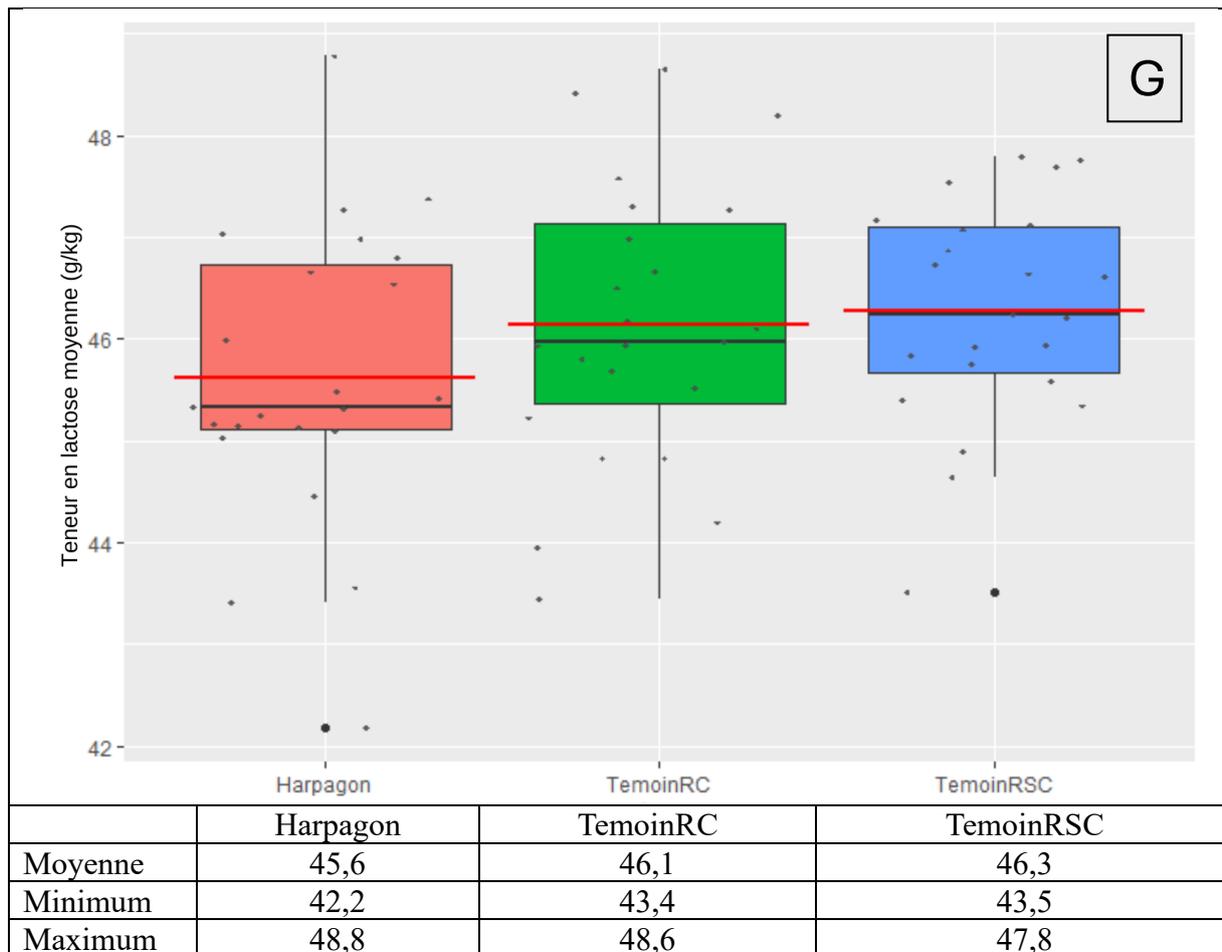


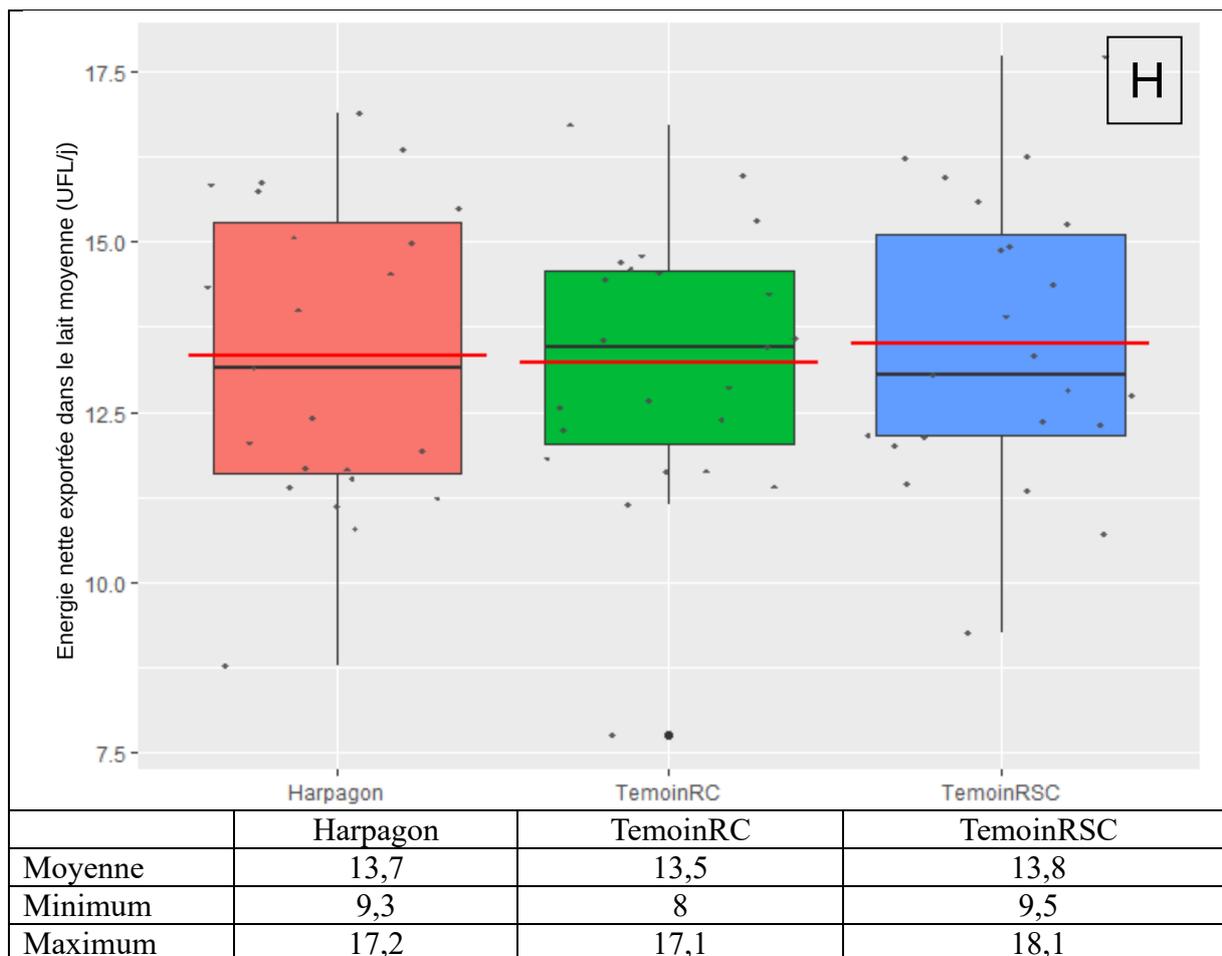


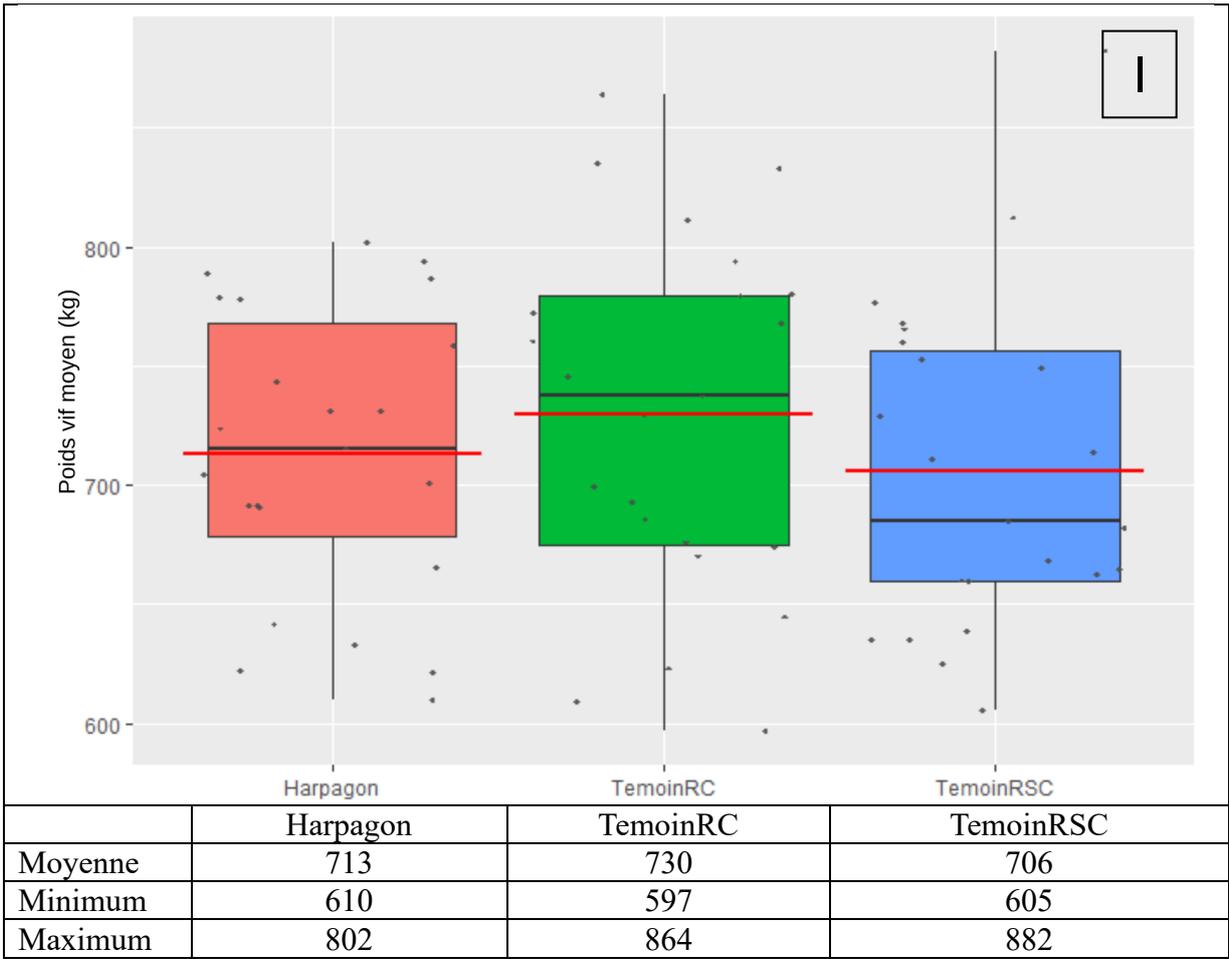


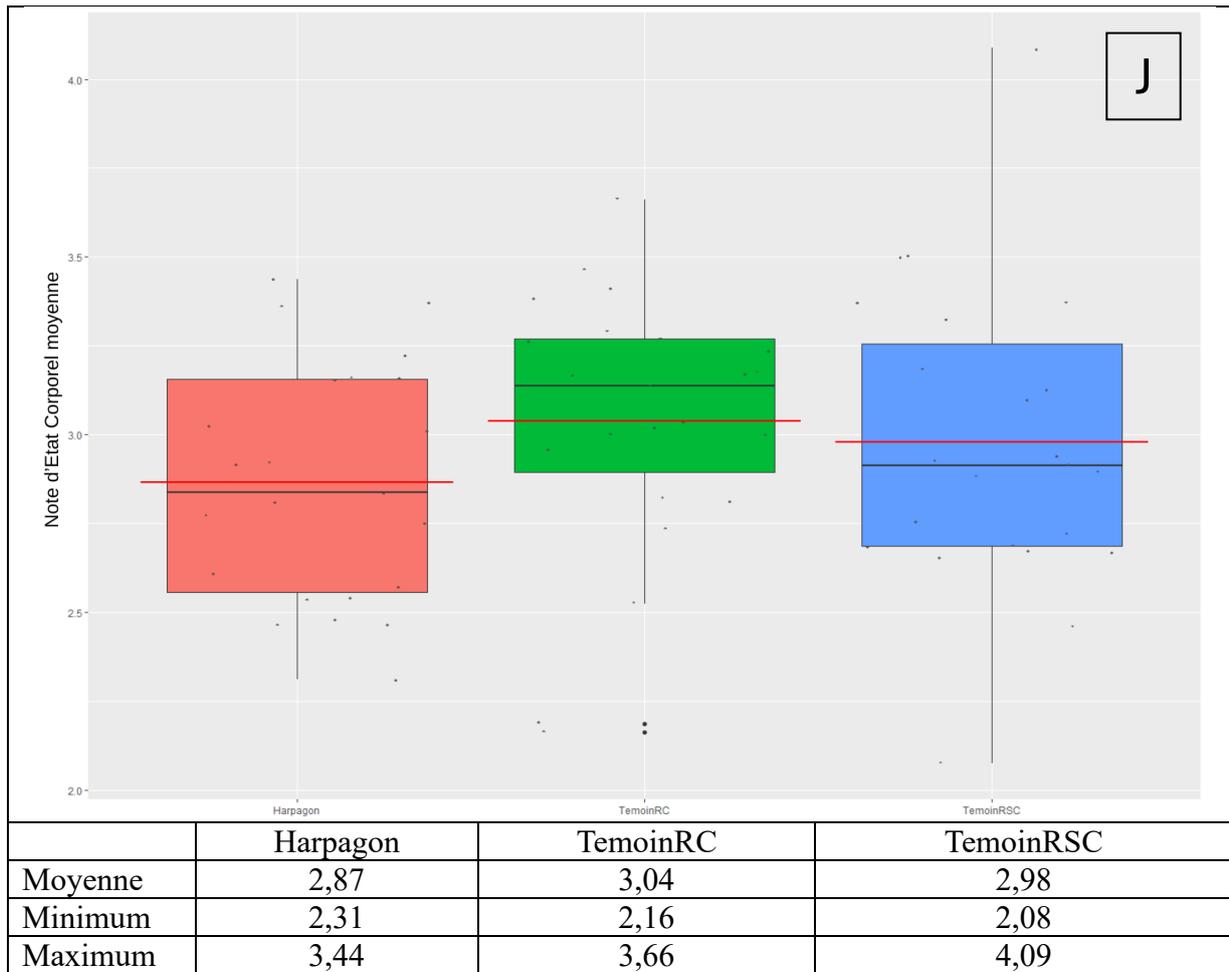












	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Ingénieur Agronome Spécialisation / option : Sciences et Ingénierie en Productions Animales (SIPA) Enseignant référent : Yannick LE COZLER	
Auteur(s) : Valentine LANDAIS Date de naissance* : 19/12/2001		Organisme d'accueil : Institut de l'Elevage Adresse : 42 Rue Georges Morel
Nb pages : 108	Annexe(s) : 3	49070 BEAUCOUZE
Année de soutenance : 2024		Maîtres de stage : Amélie FISCHER & Julien JURQUET
Titre français : Analyse comparative d'une alimentation de précision avec une alimentation standard en production bovine laitière sur les plans zootechnique et économique		
Titre anglais : Comparative analysis of precision feeding and standard feeding in dairy cattle production in terms of production and economics performances		
Résumé (1600 caractères maximum) :		
<p>En élevage laitier, l'allocation individuelle du concentré de production (CP_{DAC}) se fait principalement en fonction de la production laitière et du stade de lactation de la vache. Grâce à de nouveaux outils, il pourrait être possible de phénotyper plus précisément les besoins des animaux. L'objectif du projet Harpagon était de faire la preuve d'un concept d'alimentation de précision, et de le comparer avec deux modes d'alimentation standards. 69 vaches Holstein ont été alimentées ad libitum avec une ration unique distribuée dans des auges peseuses et complémentées individuellement à un distributeur automatique avec 5 kg/j/vache de CP_{DAC} pendant 3,5 semaines, puis 1 kg/j/vache pendant les 3,5 semaines suivantes. Cette période a permis de déterminer le profil de réponse en lait et en ingestion à l'auge pour chaque vache. Les 69 vaches ont ensuite été réparties en 3 lots pour une période de 12,5 semaines. 46 d'entre elles étaient complémentées individuellement, selon leur profil de réponse pour la moitié (Harpagon), ou selon leur production laitière pour l'autre moitié (TemoinRSC). Les 23 restantes étaient nourries avec une ration complète (TemoinRC). A l'échelle du lot, les animaux ont tous consommé la même quantité moyenne de CP_{DAC} et n'ont pas eu de performances différentes. Cependant, certains profils ont continué à produire autant avec moins de CP_{DAC} et pourraient être intéressants à identifier pour mieux adapter les quantités de CP_{DAC} distribuées. Pour valider ces résultats, il faudra s'assurer de la robustesse du profil sur la vie productive d'une vache laitière.</p>		
Abstract (1600 caractères maximum) :		
<p>The individual allocation of concentrates in lactating dairy cows is usually based on each cow's milk production and lactation stage only, without considering other requirements. Thanks to the development of on-farm technologies, a more precise estimate of cow's needs is conceivable. The objective of this study was to demonstrate the feasibility of precision feeding as described in the Harpagon project and compare it with two standard feeding methods. 69 Holstein dairy cows were fed ad libitum with a unique balanced diet distributed in individual weighing bins and supplemented individually via an electronic feeder with 5 kg/d/cow (P5kg) of concentrate for 3.5 weeks and 1 kg/d/cow (P1kg) for the following 3.5 weeks. A response profile based on milk production and feed intake during the feed restriction period (P5kg-P1kg) was used to design the treatments. Cows were divided into 3 batches for a 12.5-week period: 23 cows were fed concentrates individually according to their response profile (Harpagon), while 23 others were fed according solely to their milk production (TemoinRSC). The 23 remaining cows were fed a total mixed ration (TemoinRC). On a batch scale, the animals were all fed the same average amount of concentrate, and batches did not differ in production or intake levels. However, some profiles maintained similar production with less concentrate and could be worth identifying to adapt the quantities of concentrates distributed. To validate those results, the next step is to investigate the profile robustness throughout the entire productive life of a dairy cow.</p>		
Mots-clés : alimentation de précision, profil de réponse, variabilité individuelle, élevage laitier		
Key Words: precision feeding, response profile, individual variability, dairy cattle		