

APPROCHE BIOECONOMIQUE D'OPTIMISATION DE LA GESTION DE LA REPRODUCTION DANS LES POPULATIONS DE BOVINS LAITIERS

THESE
pour obtenir le titre de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

TASSAIN Manon
Née le 16/09/1993
à BRIVE-LA-GAILLARDE (19)

Directeur de thèse : M. Didier RABOISSON

JURY

PRESIDENT :
M. Laurent MOLINIER

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :
M. Didier RABOISSON
Mme Agnès WARET-SZKUTA

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

MEMBRE INVITE :
M. Ahmed FERCHIOU

Docteur Vétérinaire

**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE DE TOULOUSE**

Directeur : Professeur Pierre SANS

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Pharmacologie - Thérapeutique*
- Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la Reproduction*
- Mme **CLAUW Martine**, *Pharmacie-Toxicologie*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie Pathologique*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
- M. **PETIT Claude**, (Emérite) - *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **SHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

PROFESSEURS 1° CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des aliments*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des aliments d'Origine animale*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie Vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootecnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- Mme **HAGEN-PICARD, Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie Médicale Animale et Comparée*

PROFESSEURS 2° CLASSE

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*
- Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation animale*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*
- Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles*
- M. **RABOISSON Didier**, *Médecine de population et Économie de la santé animale*

PROFESSEURS CERTIFIÉS DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
- M. **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

MAÎTRES DE CONFÉRENCES HORS CLASSE

- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*

- Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
 M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
 M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
 M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
 Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
 M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie*

MAITRES DE CONFERENCES (classe normale)

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
 Mme **BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
 Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
 Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*
 M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
 M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
 Mme **DANIELS Hélène**, *Immunologie- Bactériologie-Pathologie infectieuse*
 Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et Industrie des aliments*
 Mme **DEVIERS Alexandra**, *Anatomie-Imagerie*
 M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et Industrie des aliments*
 M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie vétérinaire et comparée*
 Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*
 Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*
 Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie - Analgésie*
 Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des Equidés*
 Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
 M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*
 M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
 Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*
 Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*
 M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
 Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
 M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire – Maladies animales règlementées*
 Mme **WASET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

CHARGES D'ENSEIGNEMENT CONTRACTUELS

- M. **BOLON Pierrick**, *Production et pathologie aviaire*
 M. **FERCHIOU Ahmed**, *Economie, production animale,*
 M. **LEYNAUD Vincent**, *Médecine interne*
 Mme **ROBIN Marie-Claire**, *Ophthalmologie*
 Mme **TOUSSAIN Marion**, *Pathologie des équidés*

ENSEIGNANT DE PREMIERE ANNEE COMMUNE AUX ETUDES VETERINAIRES

- Mme **GAUCHARD Cécile**, *Biologie-écologie-santé*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

- M **BESSIERE Pierre**, *Microbiologie infectiologie*
 Mme **BLONDEL Margaux**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
 M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie-Imagerie médicale*
 M. **COMBARROS-GARCIA Daniel**, *Dermatologie vétérinaire*
 M. **GAIDE Nicolas**, *Histologie, Anatomie Pathologique*
 M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*
 M. **LESUEUR Jérémy**, *Gestion de la santé des ruminants – Médecine collective de précision*
 M. **TOUITOU Florian**, *Alimentation animale*

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur Laurent MOLINIER

Professeur des Universités

Praticien hospitalier

Département d'Epidémiologie, Economie de la Santé et Santé Publique, Université Toulouse III

Département d'information médicale, CHU de Toulouse

Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de thèse,

Hommages respectueux.

A Madame le Docteur Agnès WARET-SZKUTA

Maître de Conférences à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse

Production et pathologie porcine

Qui a aimablement accepté de faire partie de mon jury de thèse,

Sincères remerciements.

A Monsieur le Docteur Didier RABOISSON

Professeur à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse

Médecine des populations et économie de la santé animale

Qui m'a confié ce sujet et guidé tout au long de l'élaboration de cette thèse,

Pour son soutien, sa disponibilité, ses conseils et sa confiance,

Sincères remerciements.

A Monsieur le Docteur Ahmed FERCHIOU

Chargé d'enseignement et de recherche à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse

Médecine des populations et économie de la santé animale

Pour son aide, sa disponibilité, sa gentillesse et son soutien tout au long de l'élaboration de cette thèse,

Sincères remerciements.

Table des matières

| | | |
|-------------|--|----|
| I. | Introduction | 10 |
| I.1. | Cheptel bovin laitier en France | 10 |
| I.2. | Enjeux sociétaux et bien-être animal | 10 |
| I.3. | Enjeux en reproduction | 11 |
| I.4. | Objectifs de l'étude | 11 |
| II. | Matériels et méthodes (Figure 2) | 12 |
| II.1. | Description du modèle biologique | 12 |
| II.1.a. | Description de DairyHealthSim© | 12 |
| II.1.a.1. | Fonctions de production | 13 |
| II.1.a.2. | Maladies | 16 |
| II.1.a.3. | Traitements | 17 |
| II.1.a.4. | Dynamique du troupeau et sortie des vaches..... | 17 |
| II.1.b. | Stabilisation du cheptel | 18 |
| II.2. | Modélisation économique | 18 |
| II.2.a. | Simulation de la problématique d'optimisation sous contraintes de temps de travail et de longévité | 19 |
| II.2.b. | Analyse économique des résultats..... | 20 |
| II.3. | Application à la gestion de la reproduction en élevage bovin laitier | 21 |
| II.3.a. | Description des scénarios de gestion de la reproduction | 21 |
| II.3.b. | Calibration des scénarios..... | 23 |
| II.3.c. | Simulations | 24 |
| III. | Résultats | 25 |
| III.1. | Description des résultats biologiques | 25 |
| III.1.a. | Voluntary Waiting Period VWP (Période d'attente volontaire) | 25 |
| III.1.b. | Detection Rate DR (Taux de détection) | 27 |
| III.1.c. | Fake Heat FH..... | 29 |
| III.1.d. | Hygiène H | 29 |
| III.1.e. | Insemination IA..... | 30 |
| III.2. | Analyse économique | 32 |
| III.2.a. | Scénarios optimaux en fonction des contraintes | 32 |
| III.2.b. | Analyse des revenus | 34 |
| III.2.c. | Gain marginal du temps d'observation en reproduction | 35 |
| IV. | Discussion | 36 |
| IV.1. | Une modélisation innovante ; les limites de cette étude | 36 |
| IV.2. | Detection Rate (DR) ; un indicateur clé de performance | 37 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| IV.3. Points d'amélioration..... | 38 |
| V. Conclusion..... | 40 |
| VI. Bibliographie..... | 41 |
| VII. Annexes..... | 45 |

Table des illustrations

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Rendements laitiers moyens des vaches au contrôle laitier (GEB-Institut de l'Elevage et Contrôle laitier)..... | 10 |
| Figure 2 : Description de l'approche générale..... | 12 |
| Figure 3 : Présentation du modèle biologique DairyHealthSim© | 13 |
| Figure 4 : Présentation de la simulation de la reproduction | 14 |
| Figure 5 : Classification des scénarios pour l'analyse des résultats biologiques | 24 |
| Figure 6 : Taux de réussite aux IA et en première IA en fonction de VWP..... | 25 |
| Figure 7 : Nombre d'IA par conception en fonction de VWP..... | 25 |
| Figure 8 : Intervalle vêlage-vêlage en fonction de VWP..... | 26 |
| Figure 9 : Durée moyenne de lactation en fonction de VWP..... | 26 |
| Figure 10 : Taux de renouvellement et de réforme en fonction de VWP..... | 26 |
| Figure 11 : Nombre moyen d'inséminations réalisées annuellement en fonction de DR | 27 |
| Figure 12 : Taux de réussite aux IA et en première IA en fonction de DR..... | 27 |
| Figure 13 : Production laitière en fonction de DR..... | 28 |
| Figure 14 : Densité de l'atelier laitier en fonction de DR | 28 |
| Figure 15 : Durée moyenne de lactation en fonction de DR..... | 28 |
| Figure 16 : Taux de renouvellement en fonction de DR..... | 28 |
| Figure 17 : Taux de réforme en fonction de DR | 28 |
| Figure 18 : Intervalle vêlage-vêlage en fonction de DR..... | 29 |
| Figure 19 : Quantité et qualité du lait produit en fonction de l'hygiène H..... | 30 |
| Figure 20 : Prévalence des mammites en fonction de l'hygiène..... | 30 |
| Figure 21 : Intervalle vêlage-vêlage en fonction de IA | 30 |
| Figure 22 : Taux de réussite aux IA et en première IA en fonction de IA | 31 |
| Figure 23 : Intervalle vêlage-vêlage optimal en fonction du scénario optimal sous différentes contraintes de temps de travail..... | 32 |
| Figure 24 : Marge brute moyenne (en €) en fonction des scénarios DR et VWP..... | 34 |
| Figure 25 : Gain marginal de marge brute par heure de détection de l'œstrus (en €), DR25 est considéré comme référence car c'est le taux de détection sans temps d'observation dédié à la détection de l'œstrus..... | 35 |
| Figure 26 : Valeurs de rétention pour une vache hypothétiquement non gestante en lactation 2 avec au moins 1 mammite clinique dans la lactation précédente, avec des rendements laitiers permanents et temporaires moyens, avec soit pas de mammite soit avec un cas de mammite avec l'agent pathogène indiqué dans le mois suivant le vêlage : (A) Staphylococcus (DeVries, 2006) | 36 |
| Figure 27 : Effet des jours ouverts sur la variation des flux de trésorerie annuels équivalents (EAC) par vache par rapport à une base de 160 jours ouverts avec les intrants de référence, ainsi qu'avec une augmentation de 20 % (□), et une baisse de 20 % (Δ) des prix du lait et des aliments pour animaux (Meadows, 2005)..... | 37 |
| Figure 28 : Répartition de la période d'attente volontaire optimale pour la combinaison des facteurs de vache et des valeurs économiques (graphique à barres, axe gauche) et de la moyenne des pertes économiques nettes annuelles (€/vache) pour différentes périodes d'attente volontaires par rapport à une période d'attente volontaire de 6 semaines (graphique linéaire, axe droit). (Inchaisri, 2011) | 37 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----------|
| <i>Tableau 1 : Données de calibrage pour les cycles atypiques.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Tableau 2 : Description des contraintes d'optimisation pour l'acceptation de la charge de travail de l'éleveur et l'objectif de longévité des vaches</i> | <i>21</i> |
| <i>Tableau 3 : Description des scénarios de gestion.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Tableau 4 : Scénario optimal pour chaque combinaison de contraintes (temps de travail et longévité) pour les 3 modèles en fonction du scénario contextuel (hygiène)</i> | <i>33</i> |

Liste des abréviations

| |
|---|
| CR : Conception Rate |
| DIM : Day In Milk |
| DMI : Dry Matter Intake |
| DR : Detection Rate |
| FCM : Fat Corrected Milk |
| FH : Fake Heat |
| FSCR : First Service Calving Rate |
| GMQ : Gain Moyen Quotidien |
| IA : Insemination |
| IV-IA1 : Intervalle vêlage-IA1 |
| IVV : Intervalle vêlage-vêlage |
| out_Mi_250 : lait produit avec un comptage cellulaire inférieur ou égal à 250 000 cellule |
| out_Mi_300 : lait produit avec un comptage cellulaire inférieur ou égal à 300 000 cellule |
| out_Mi_400 : lait produit avec un comptage cellulaire inférieur ou égal à 400 000 cellule |
| out_Mi_s400 : lait produit avec un comptage cellulaire supérieur à 400 000 cellule |
| SCC : Somatic Cell Count |
| VWP : Voluntary Waiting Period |
| WIM : Week In Milk |

Liste des annexes

| | |
|--|-----------|
| <i>Annexe 1 : Paramètres d'entrée du modèle biologique</i> | <i>45</i> |
| <i>Annexe 2 : Paramètres de calibrage des fonctions de production</i> | <i>46</i> |
| <i>Annexe 3 : Table de calcul des besoins alimentaires en UFL, protéines brutes et fibres.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Annexe 4 : Comptage des cellules somatiques après une infection de mammite clinique par agent pathogène</i> | <i>48</i> |
| <i>Annexe 5 : Calibration des paramètres pour la simulation des maladies des veaux</i> | <i>49</i> |
| <i>Annexe 6 : Calendrier des maladies des vaches, calibrage du risque de maladies croisées et de traitement.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Annexe 7 : Caractéristiques des traitements utilisés dans DHS.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Annexe 8 : Calibration des décisions de réformes</i> | <i>52</i> |
| <i>Annexe 9 : Présentation du cheptel stabilisé.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Annexe 10 : Taux de réussite moyen aux inséminations en fonction des 540 scénarios.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Annexe 11 : Taux de réussite moyen en première insémination en fonction des 540 scénarios.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Annexe 12 : Nombre moyen d'IA réalisées par en fonction des 540 scénarios</i> | <i>53</i> |
| <i>Annexe 13 : Intervalle vêlage-vêlage moyen en fonction des 540 scénarios</i> | <i>53</i> |
| <i>Annexe 14 : Durée moyenne de lactation en fonction des 540 scénarios</i> | <i>53</i> |
| <i>Annexe 15 : Production laitière moyenne en fonction des 540 scénarios</i> | <i>53</i> |
| <i>Annexe 16 : Prévalence des mammites en fonction des 540 scénarios.....</i> | <i>53</i> |

Introduction

I.1. Cheptel bovin laitier en France

Le cheptel bovin laitier français compte aujourd'hui 3,7 millions de têtes contre 4,7 millions en 1995 (Eurostat d'après SSP (1995 et 2019) et SPIE-BDNI, traitement Institut de l'Élevage). Le cheptel bovin laitier français a ainsi subi une baisse de 21% concernant le nombre de têtes de 1995 à 2019. La production laitière est majoritairement localisée dans le grand ouest : Bretagne, Normandie, et Pays de la Loire. Ces trois régions comptent 52% des vaches laitières (SPIE-BDNI, 2019).

Le cheptel bovin laitier français a produit 23 908 millions de litres de lait en 2017, avec une évolution de + 5% par rapport à 2005. Parmi cette production, 12 961 millions de litres de lait (55 %) sont produits par le grand ouest, soit une évolution à la hausse par rapport à 2005 pour ces régions. D'autre part, les régions Nouvelle Aquitaine et Occitanie ont perdu respectivement 30% et 25% de leur production de lait livré entre 2005 et 2017 (SSP, Enquête annuelle laitière).

Le cheptel bovin laitier français a diminué mais la production laitière a augmenté, les vaches laitières ont une meilleure productivité (*Figure 1*).

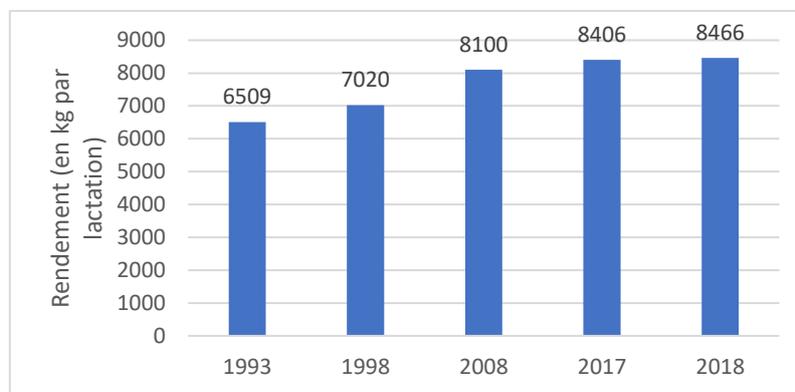


Figure 1 : Rendements laitiers moyens des vaches au contrôle laitier (GEB-Institut de l'Élevage et Contrôle laitier)

I.2. Enjeux sociétaux et bien-être animal

Aujourd'hui, la reproduction représente un enjeu pour le bien-être animal. Une relation a été mise en évidence entre le score moyen de bien-être (établi avec Welfare Quality®) des vaches laitières et l'intervalle vêlage-IA1 (VIA1). L'intervalle VIA1 est de 85,6 (+/- 2,4) jours pour les élevages avec un score de bien être inférieur ou égal à 37,4 alors qu'il est de 78,9 (+/- 1,6) jours pour les élevages avec un score de bien être supérieur à 37,4 (Grimard et al., 2016). Par ailleurs, il existe d'autres critères en lien avec le bien-être animal notamment les ressources de l'élevage ; l'alimentation, la production de lait, les traitements, et l'éleveur. Ces différents paramètres ont une forte interaction entre eux. En effet, l'alimentation permet d'avoir des vaches laitières avec une note d'état corporel optimale pour une reproduction favorable qui va conditionner la naissance d'un veau et donc la production de lait. Le bien-être animal passe aussi par l'utilisation de traitements en cas de maladies qui pourraient dégrader les performances de reproduction, mais aussi la production laitière. L'éleveur va lui aussi jouer un rôle important dans le bien-être animal car il va permettre de gérer le fonctionnement de toutes ces ressources.

I.3. Enjeux en reproduction

La reproduction est au cœur de la production laitière, en effet, celle-ci conditionne la productivité de la vache laitière, notamment par l'intervalle vêlage-vêlage (IVV) qui permet d'évaluer les performances de reproduction dans les troupeaux laitiers. Un faible IVV permet d'améliorer la production de lait et le progrès génétique du troupeau mais cela augmente les risques de maladies, réformes, et mortalité en lien avec la période stressante du péripartum. C'est pourquoi la gestion de la reproduction nécessite un compromis entre les objectifs et les risques encourus.

Entre 1993 et 2018, le rendement laitier moyen des vaches au contrôle laitier est passé de 6 509 kg/lactation à 8 466 kg/lactation (*Figure 1*). Or, il existe une forte corrélation génétique (0,63 +/- 0,05) entre l'IVV et la production laitière totale (Albarrán-Portillo et al., 2013), et plus largement entre la production laitière et les performances de reproduction, c'est pourquoi la reproduction représente un enjeu particulièrement important dans l'évolution de la production laitière. Lors de l'amélioration des rendements laitiers, il est important de ne pas trop dégrader les paramètres de reproduction et notamment l'allongement de l'IVV.

I.4. Objectifs de l'étude

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est de proposer une meilleure considération des enjeux économiques dans la gestion de la reproduction en élevage bovin laitier. L'analyse vise à déterminer des pratiques d'élevages, et plus particulièrement concernant la reproduction, associées à l'optimum économique, sous différentes typo-techniques et différents contextes. L'optimisation économique correspond au revenu corrigé, le risque, combiné à plusieurs contraintes dont le temps de travail. Le modèle d'optimisation bioéconomique sera, d'abord décrit, puis les résultats économiques seront proposés.

II. Matériels et méthodes (Figure 2)

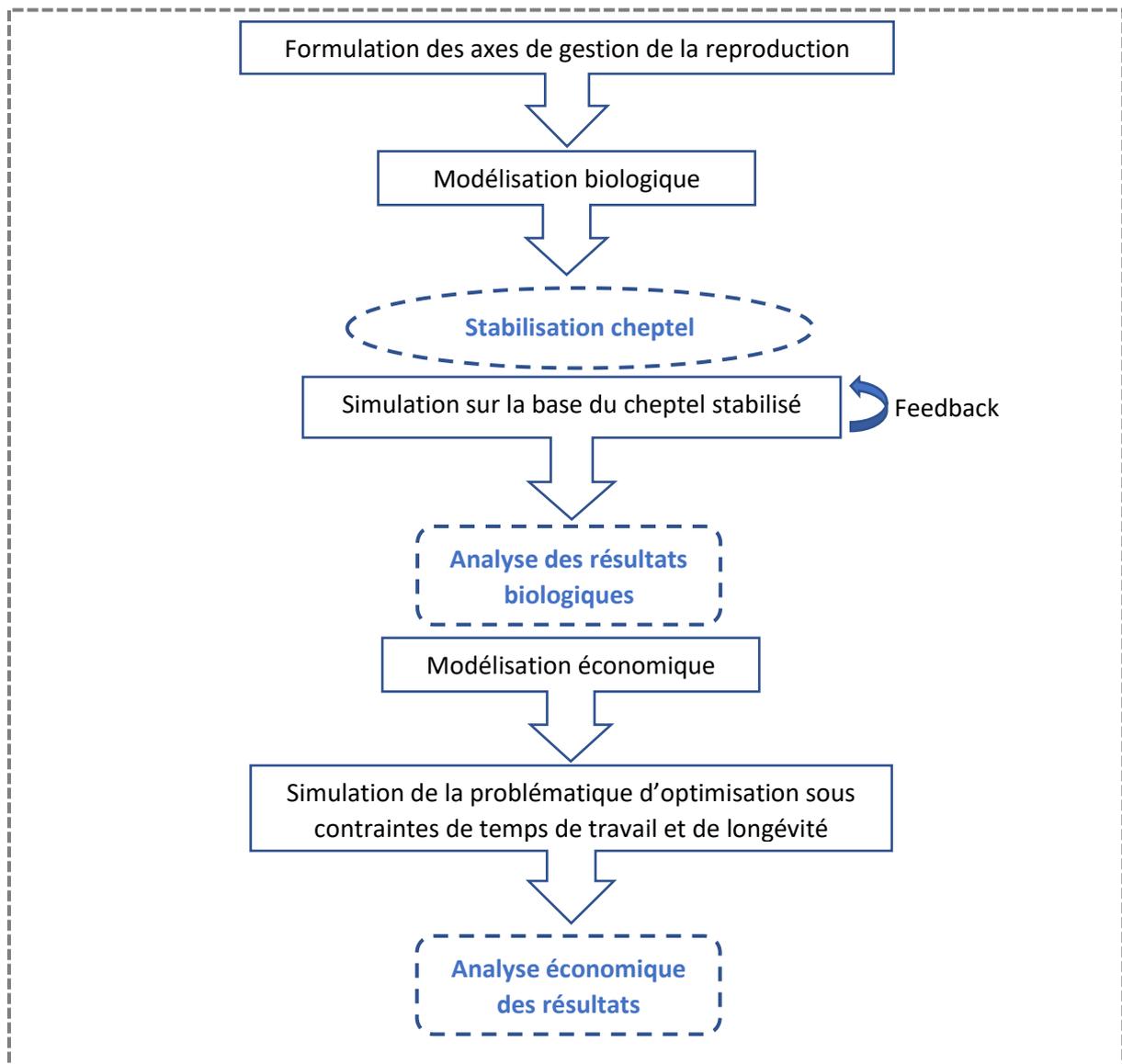


Figure 2 : Description de l'approche générale

II.1. Description du modèle biologique

II.1.a. Description de DairyHealthSim©

DairyHealthSim© est composé d'un modèle biologique (Figure 3) couplé à un modèle économique d'optimisation. Le modèle biologique est défini sur une base vache-semaine et de probabilité hebdomadaire d'évènements ; productions et maladies. Cette composante biologique vise à définir une représentation dynamique d'un troupeau laitier. Le modèle mécaniste a été construit de manière à éviter tout biais dans le modèle : en effet, chaque évènement est systématiquement défini - directement ou indirectement – pour chaque vache en suivant le modèle. Ce cadre a été appliqué aux 3 principaux types de fonctions : i) production (croissance et rendements laitiers, reproduction), ii) maladies et iii) traitements et décision prise par l'éleveur. Un aperçu des sources bibliographiques pour les risques et effets des maladies ; paramètres de lactation, croissance et besoins alimentaires, paramètres de reproduction et les paramètres de calibrage des règles de réformes sont présentés dans l'Annexe 1. Le cas échéant, d'autres références sont présentées dans chaque Annexe.

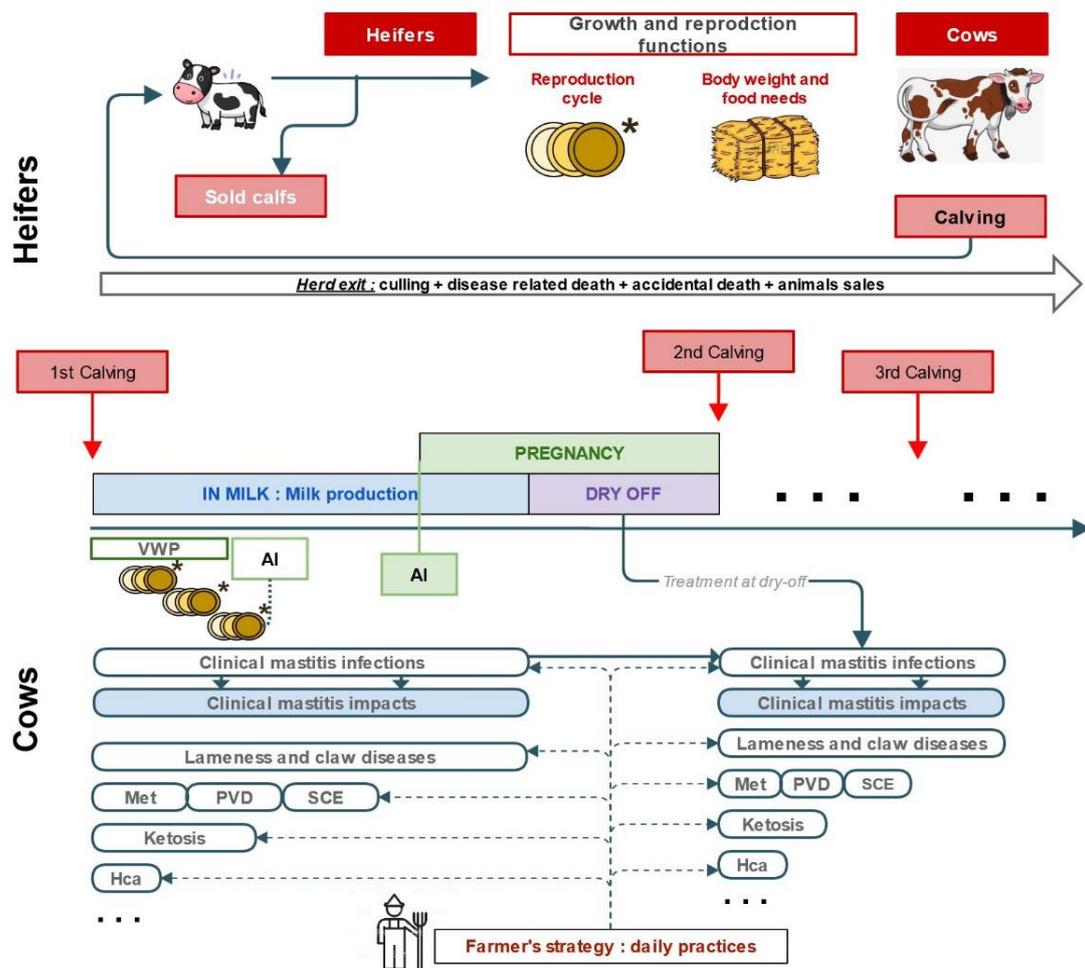


Figure 3 : Présentation du modèle biologique DairyHealthSim©

II.1.a.1. Fonctions de production

- Croissance

La croissance des animaux est simulée de façon à estimer le poids des veaux et des vaches à partir de leur entrée (à la naissance) jusqu'à leur sortie du troupeau. Un veau naît avec un poids de naissance BW_{Birth} puis il est ensuite caractérisé par son gain moyen quotidien (GMQ). Le poids vif des vaches est basé sur l'équation [1] (van Arendonk, 1985) :

$$BW_{a,wim,p,t} = BW_{Mat} [1 - \{1 - (BW_{Birth} BW_{Mat} - 1)^{\frac{1}{3}}\} \exp(-k d)]^3 + p_1 7 * wim p_2^{-1} \exp(1 - 7 wim p_2^{-1}) + p_3^3 t_{pc}^3 \quad [1]$$

Où $BW_{a,wim,p,t}$ représente le poids des vaches âgées de d jours à la semaine de lactation wim et au jour de gestation p_t . BW_{MAT} indique le poids à maturité, LW_{Birth} désigne le poids à la naissance, k désigne le taux de croissance, et p_1 , p_2 et p_3 désignent respectivement la diminution maximale de poids vif durant la lactation, le poids vif minimal durant la lactation et un paramètre de gestation (Annexe 2).

Lors des simulations, chaque animal créé se voit attribuer un BW_{MAT} au hasard et ce poids est calculé chaque semaine. Ceci permet une estimation hebdomadaire des besoins alimentaires, du statut de

reproduction des génisses et de la production de viande de réforme en appliquant un rendement carcasse $CarC_{Cull}$ (Annexe 2).

- Besoins alimentaires

Les besoins nutritionnels des vaches sont calculés dans le modèle. Ces besoins nutritionnels sont calculés de façon hebdomadaire en accord avec l'état physiologique de la vache et les événements de santé. Les besoins alimentaires sont exprimés en apport de matière sèche (DMI), en unité fourragère lait (UFL, équivalent en français à l'énergie métabolisable nette) et en protéine brute (CP). La composition du régime alimentaire est optimisée, sur une base annuelle, dans le modèle économique de décision. Le modèle estime en premier le DMI par vache chaque semaine en fonction de sa production de lait corrigée en matière grasse (FCM), du poids vif (LW) et du DIM en suivant l'équation [2] (Giordano et al., 2012):

$$DMI_{dim,FCM,BW} = (0.372 * FCM_{dim} + 0.0968 * BW^{0.75}) * \left(1 - e^{-0.192 * \left(\left(\frac{dim}{7} \right) + 3.67 \right)} \right) \quad [2]$$

Où $DMI_{dim,FCM,LW}$ représente l'ingestion de matière sèche (kg/vache/jour) pour une vache dont le poids BW à dim jours de lactation et produisant FCM kg. Au tarissement, DMI a été fixé à $DMI_{dry-off}$ (Annexe 2). A partir du calcul de DMI, les besoins en UFL et MAT sont déterminés chaque semaine en fonction du rendement laitier quotidien (DMY) par vache allant de 0,8 à 1 UFL par kg de DMI et de 0,10 à 0,17 MAT par kg de DMI comme illustré dans l'Annexe 3.

- Production laitière

Les productions de lait, de matière grasse et de protéines sont simulées sur la base de l'équation de la courbe de lactation de Wood (1967) [3] :

$$Y(wim) = 7 * a * t^b * e^{-ct} \quad [3]$$

Où $Y(wim)$ représente le rendement hebdomadaire en lait ou en matière grasse ou en matière protéique ; a, b et c représentent respectivement un facteur d'échelle associé au rendement laitier initial, à la pente inclinée jusqu'au rendement maximal, et à la pente décroissante après le rendement maximal.

- Reproduction

La simulation de la reproduction des vaches est basée sur une machine à états de transition entre les états de reproduction (Figure 4).

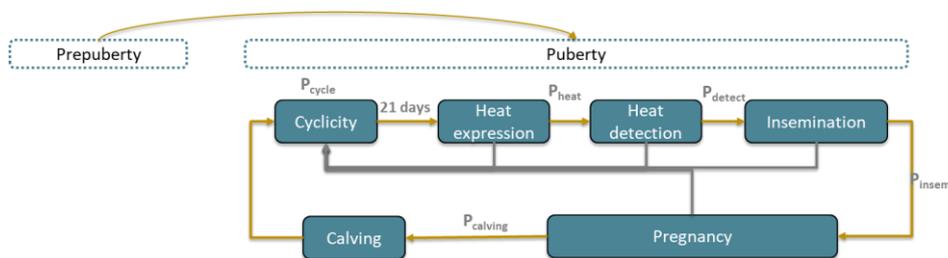


Figure 4 : Présentation de la simulation de la reproduction

La transition d'un statut à un autre (cyclicité, expression des chaleurs, détection des chaleurs, insémination, gestation et vêlage) est conditionnée par les caractéristiques de l'animal comme i) des conditions de poids et d'âge pour la puberté des génisses et d'éligibilité des génisses pour la première IA ($HeifAgePub$, $HeifWeiPub$, $HeifAgeElig$, voir Annexe 2) et ii) l'expression des chaleurs (P_{heat}), la

détection des chaleurs (P_{detect}) et probabilités d'insémination réussie (P_{insem}) pour que les vaches matures commencent une période de gestation (*Annexe 2*). Durant la période de gestation, les probabilités d'avortement sont appliquées chaque semaine (P_{abort}). Le sexe des nouveaux nés est déterminé selon le *GenderRatio*. Après le vêlage, le cycle ovarien des vaches peut recommencer après une période de 15 jours d'anœstrus et une période d'attente volontaire (VWP) de 28 jours, en fonction de la probabilité du cycle (P_{cycle}) et de l'occurrence des cycles atypiques. Trois principaux cycles atypiques sont considérés : les cycles différés, les cycles avec une phase lutéale prolongée et les cycles interrompus (*Tableau 1*). Lorsque la cyclicité de la vache ne reprend pas après la 6^{ème} semaine de lactation, l'ovulation est alors retardée et cela impacte le taux de réussite en première IA (FSCR : First Service Calving Rate). Plusieurs facteurs de risques peuvent impacter les cycles différés dans le modèle : i) les cétooses subcliniques, ii) la parité qui peut engendrer un risque d'anœstrus, et iii) les endométrites qui retardent systématiquement de 3 jours le nouveau cycle qui démarre. Le prolongement de la phase lutéale du cycle est impacté par différents facteurs de risque (les métrites, les endométrites, la reprise précoce de la cyclicité, et la parité) qui vont causer un risque de persistance du corps jaune. Dans le modèle, la persistance du corps jaune provoque l'allongement de la durée du cycle, celle-ci sera variable : 1 semaine dans 45 % des cas, 2 semaines dans 45 % des cas ou 3 semaines dans 10 % des cas et ceci aura des conséquences sur le taux de conception (CR). Les cycles interrompus sont impactés principalement par les cétooses subcliniques qui auront pour conséquence l'allongement de la phase folliculaire. Dans le modèle, chacun de ces cycles atypiques peut repasser à un cycle normal, mais il peut aussi y avoir passage d'une interruption de cycle ou d'un cycle avec prolongement de la phase lutéale à un cycle retardé.

| | Facteurs de risque | Conséquences dans le modèle |
|----------------------------------|---|---|
| Cycle différé | Cétose subclinique | Non ovulation OR = 1,5 |
| | Parité | Risque d'anœstrus |
| | Endométrite | 3 jours de retard sur le cycle démarré |
| Prolongement de la phase lutéale | Métrite OR = 3,03 | Risque de corps jaune persistant R_base = 11,9 % |
| | Endométrite OR = 4,6 | |
| | Reprise rapide de la cyclicité (avant 3 semaines de lactation) OR = 2,8 | |
| | Parité RR = 3,06 | |
| Cycle interrompu | Cétose subclinique | Prolongement de la phase folliculaire R_base = 11,7 % |

Tableau 1 : Données de calibrage pour les cycles atypiques

- Veaux

L'élevage des veaux est aussi modélisé sur une base hebdomadaire, comme pour les vaches. Les besoins alimentaires des veaux et des génisses sont aussi ajustés sur une base hebdomadaire.

II.1.a.2. Maladies

Les problèmes de santé ont été définis pour chaque vache chaque semaine mécaniquement, basé sur l'incidence de base, des facteurs de risques spécifiques aux vaches et du niveau de risque du troupeau (avec la contamination du troupeau et les pratiques de l'éleveur). Les maladies ont été mises en œuvre en suivant l'altération de 3 fonctions de production. Les simulations des maladies des vaches et leurs traitements incluent les dystocies, les hypocalcémies subcliniques, les fièvres de lait, les rétentions placentaires, les métrites puerpérales, les écoulements vaginaux purulents, les endométrites subcliniques, les déplacements de caillette à droite et à gauche, les boiteries, les cétooses subcliniques, les cétooses cliniques et les mammites.

La contamination de la mamelle saine par six agents pathogènes a été prise en compte, avec une occurrence de risque hebdomadaire (*Staphylococcus aureus*, *Streptococcus* spp., *Klebsiella* spp., *Escherichia coli*, les culture négatives et les autres). Les infections de mammites cliniques se produisent durant la lactation (un pathogène par semaine maximum) en fonction du rang de lactation, DIM, nombre de cas (premier cas, première rechute, seconde rechute ou plus), de l'historique des maladies de la vache (fièvre de lait, métrite, cétoose subclinique). Durant la lactation, la production hebdomadaire de cellules somatiques est simulée par une production de base SCC comme formulé dans les équations [4] et [5] (Østergaard et al., 2005). et une augmentation de SCC dans le cas de mammite clinique infectieuse est présentée dans l'Annexe 4 (Cha et al., 2004).

$$SCC_L1=1000 (335 \text{ EXP}(-0,55 \text{ wk}) + 65 + 1 \text{ wk}) \quad [4]$$

$$SCC_Ls1=1000 (335 \text{ EXP}(-0,55\text{wk}) + 65 + 1,5 \text{ wk}) \quad [5]$$

Les maladies des pieds et des sabots ont été simulées par une fonction « lame » qui définit de manière probabiliste les événements de boiterie hebdomadairement et calcule un score de boiterie (LS) en 5 points chaque semaine (Sprecher et al., 1997). Le score gagne un point pour chaque boiterie simulée et perd 25% au tarissement des vaches. LS définit un statut boiterie par vache et conditionne son traitement.

Les problèmes de santé des veaux pris en compte étaient la mortalité, les diarrhées néonatales, les septicémies, les omphalites et les maladies respiratoires au-delà de 6 mois d'âge. L'échec de transfert de l'immunité passive (apport de colostrum) est pris en compte dans le risque de maladies des veaux. Toute la mortalité des veaux est expliquée par ces problèmes. Les problèmes accidentels (fracture de patte...) ont été exclus. Les paramètres de risque d'incidence utilisés pour simuler les maladies des veaux sont présentées dans l'Annexe 5.

Pour chaque vache simulée, l'occurrence hebdomadaire de chaque maladie dépend d'un risque final calculé qui accumule (i) un risque d'incidence de base ajusté en fonction des caractéristiques de la vache (WIM, rang de vêlage, rendement laitier) et suivant un calendrier définissant la sensibilité des vaches aux maladies pour chaque WIM ou âge (Annexe 6), (ii) les risques de maladies croisées (comment une maladie peut-elle être influencée par une autre) (Annexe 6) appliqués comme risques relatifs sur le risque d'incidence de base, (iii) les risques de gestion (les habitudes et pratiques de l'éleveur sont pris en charge comme scénario), (iv) et le risque relatif au traitement.

II.1.a.3. Traitements

Les fonctions de contrôle des altérations à la production simulent les traitements pour les vaches malades et leurs conséquences sur l'évolution de la santé des vaches ou du troupeau traité. Les dystocies, les cétozes subcliniques et les déficiences de transfert immunitaire ont déjà été exclues puisqu'aucun traitement n'avait été fait dans chacune de ces situations (en raison du statut subclinique de ces maladies ou de la prise en charge par intervention uniquement). Les probabilités d'intervention des éleveurs et vétérinaires ont été déterminées par approche participative et par expérience d'auteurs (*Annexe 6* et *Annexe 7*). Chaque modèle de traitement est caractérisé par 3 éléments, nommés (i) la composition du traitement incluant les médicaments (c'est-à-dire antibiotiques, anti-inflammatoires...) et la nature de l'intervention (consultation, chirurgie...) (ii) l'effet espéré sur la guérison de la maladie et le risque de rechute (c'est-à-dire, une mammites clinique non traitée augmentera les effets de l'infection et le risque de rechute de 50%) et (iii) trois implications socio-économiques que sont le travail de l'éleveur pour la gestion des maladies, le coût du traitement et les coûts vétérinaires. Les informations concernant l'application des médicaments et leur composition ont été extraits de l'index officiel des médicaments vétérinaires (*Annexe 7*).

Pour les mammites, le schéma thérapeutique est déterminé en fonction de (i) la valeur de SCC de la vache lors du dernier mois (ii) le nombre de mammites infectieuses durant la lactation (première, seconde, etc) et la situation de récurrence ou de rechute (re-infection après 3 semaines), (iii) et si le traitement est administré dans les délais, retardé ou si la mammites n'est pas détectée (*Annexe 4*).

II.1.a.4. Dynamique du troupeau et sortie des vaches

Un objectif de taille de troupeau a été fixé pour les vaches en lactation tout en considérant les contraintes de bâtiment et une vraie taille de troupeau de vaches en lactation a été calculée de façon hebdomadaire incluant les nouveaux vêlages (entrée) et les morts (sortie) pour définir les vaches à réformer (si besoin). Aucun animal n'a été acheté et seulement des vaches élevées dans l'élevage sont utilisées comme vaches. L'éleveur garde uniquement les veaux femelles. Les veaux mâles sont vendus à un mois d'âge. Les génisses prêtes à vêler peuvent aussi être vendues deux semaines avant de vêler quand la capacité de l'élevage laitier est saturée. Aucune contrainte sur le bâtiment des veaux et des génisses n'a été prise.

Afin d'imiter le comportement habituel de l'éleveur pour les vaches réformées pour l'abattoir, un ensemble de règles ont été définies afin de s'assurer que les décisions de réforme dépendent de la taille du troupeau, des caractéristiques de production du troupeau et des performances de santé. Les règles de réformes ont été appliquées à toutes les vaches chaque semaine, elles sont basées sur le rendement laitier, DIM, le statut de gestation, les boiteries, et le statut de la santé de la mamelle. Ces critères représentent les principaux critères utilisés par les éleveurs lors de décisions de réformes. Les autres problèmes de santé ne sont pas pris en considération dans les réformes, mais ils ont une influence indirecte par les performances de production et de reproduction et par la santé de la mamelle et les boiteries.

Les animaux pré-réformés représentent les vaches en fonction de leurs performances de reproduction (échec d'insémination et jours ouverts) ce qui n'induit pas une sortie immédiate du troupeau, mais l'abandon des tentatives d'insémination. Les critères et les seuils utilisés pour la décision de réforme changent pour stabiliser la taille du troupeau autour de l'objectif. Les règles ont été assouplies ou renforcées lorsque la taille du troupeau varie. Trois politiques de réformes ont été mises en œuvre en fonction de la densité du troupeau. Cela commence lors de la première semaine où la densité du troupeau atteint le seuil considéré. A 80 % de la densité du troupeau ou moins, les vaches sont évaluées

pour la réforme seulement sur le rendement laitier qui précèdent le 6^{ème} mois de gestation (règle P1). Entre 95 % et 110 % de la densité du troupeau, les vaches sont évaluées durant 4 semaines avec la règle P1 puis avec la règle P2 (boiterie, santé mamelle, qualité du lait produit) durant 4 semaines si la densité ne diminue pas, etc. Si la densité est supérieure à 110 %, les règles P1 et P2 sont appliquées tout du long, et une règle supplémentaire est appliquée via un score combiné pour le SCC, boiterie et mammite clinique. Les détails sont reportés dans l'Annexe 8.

II.1.b. Stabilisation du cheptel

Le cheptel stabilisé (Annexe 9) a été choisi parmi plusieurs stabilisations d'une durée de 10 ans. Le cheptel choisi est le cheptel le plus stable possible concernant la dynamique du cheptel, les performances de reproduction et les maladies.

Le nombre d'insémination a été vérifié de façon que celles-ci soient régulières et stables tout au long des semaines. Au total, 1992 inséminations ont été réalisées durant la stabilisation avec une moyenne de 3,8 inséminations par semaine (écart-type de 2,2). Le nombre de naissance a été vérifié en regard du nombre d'inséminations réalisées ; 894 naissances sont comptabilisées sur 10 ans avec une moyenne de 1,7 naissances par semaine (écart-type de 1,4). La dynamique du cheptel a également été décisive dans le choix du cheptel stabilisé ; le nombre de génisses et de vaches se stabilise autour de 100 lors de la fin de la stabilisation. Le nombre de vaches taries est également stabilisé entre 5 et 20 vaches (avec des pics réguliers) et une moyenne de 8,3 vaches taries par semaine (écart-type de 5,2). La densité de l'atelier laitier se stabilise également autour de 1 en fin de stabilisation, ce qui montre une bonne occupation de l'atelier laitier. Les sorties de troupeau ont également été vérifiées avec des sorties régulières tout au long des semaines plus ou moins importantes selon la catégorie des animaux sortis, avec l'absence de pics importants. En ce qui concerne les maladies, la vérification a permis de voir que l'occurrence des différentes maladies était régulière au cours des semaines avec l'absence de pics importants.

II.2. Modélisation économique

Le modèle économique développé est un cadre d'optimisation de la variance moyenne réursive. Il représente de manière dynamique les décisions de l'éleveur concernant l'allocation des intrants tout en maximisant son utilité en tenant compte des contraintes.

Les processus décisionnels des éleveurs laitiers (en tenant compte de l'incertitude entrepreneuriale) ont été simulés à l'aide un cadre d'utilité espérée (Von Neumann and Morgenstern, 1947). Ceci implique que les décideurs maximisent l'utilité espérée dans le respect d'un ensemble de contraintes. Ils choisissent entre différentes possibilités risquées tout en prenant en compte leur valeur d'utilité espérée. Ici, les éleveurs sont considérés comme minimisant le risque. Ils ont la volonté de sacrifier une partie de leurs revenus pour éviter de faire face aux risques économiques pour l'élevage. Dans un élevage laitier français typique, la vente de lait représente plus de 80 % des revenus et les coûts alimentaires représentent 40 % à 60 % des coûts variables d'un élevage. Le principal risque économique pour un élevage laitier est la volatilité des prix du lait et des aliments pour les animaux (Valvekar et al., 2010). Les risques considérés dans le modèle sont i) un risque de marché concernant la volatilité du prix du lait et de l'aliment (basé sur les prix durant les 10 dernières années) et ii) un risque climatique qui peut affecter la qualité des fourrages produits sur l'élevage (ce qui conduit à acheter plus ou moins de concentrés pour compenser cette perte). Une variance moyenne de Markowitz-Freund a été utilisée pour insérer le comportement d'aversion au risque dans les prises de décisions des éleveurs (Freund, 1956; Hardaker et al., 2004; Markowitz, 1959). L'utilité espérée du décideur (F) peut être représentée tel que défini dans l'Equation [1] :

$$\max \mathbf{F} = E[Z_{k,t}] - \phi\sigma(Z_{k,t}) \quad [1]$$

Où F est la fonction objective des éleveurs, E dénote les espérances, k représente l'état de nature (défini ici comme le niveau de prix possible), $Z_{k,t}$ est la marge brute équivalente générée par état de nature k dans l'année t, ϕ est le coefficient de l'aversion au risque, et $\sigma(Z_{k,t})$ est l'écart-type du revenu. Selon Anderson et Dillon (1992), le niveau d'aversion au risque des individus peut être représenté par un coefficient relatif d'aversion au risque comme ceci : ce coefficient est inférieur ou égal à 0,5 pour une aversion au risque peu importante à importante et supérieur ou égal à 4 pour les individus ayant une aversion au risque extrêmement importante. Bien que la plupart des auteurs considèrent une valeur autour de 5 à 10 très peu probable (Kocherlakota, 1996). Le coefficient d'aversion au risque a été fixé à 1 et une analyse de sensibilité a été conduite pour les valeurs allant de 0 à 5, ceci représente les différentes attitudes des éleveurs en regard du risque.

La marge brute équivalente $Z_{k,t}$ générées par état de nature k dans l'année t est égale à la différence entre les recettes $R_{k,t}$ et les dépenses $Ex_{k,t}$ par état de nature k dans l'année t (Equation [2]) :

$$Z_{k,t} = R_{k,t} - Ex_{k,t} \quad [2]$$

Les dépenses sont la somme des dépenses de santé et vétérinaires (par exemple, les médicaments achetés incluant les antibiotiques, les consultations/interventions vétérinaires et chirurgies) ($Ex_Vet_{k,t}$), les changements dans les dépenses alimentaires dues aux changements de stratégies (par exemple l'achat de concentrés), ($Ex_Feed_{k,t}$) et les autres dépenses ($Ex_Oth_{k,t}$), incluant les suppléments de dépenses liés au bâtiment et à l'hygiène de traite, l'insémination et les autres pratiques changées (Equation [3]). Les recettes de l'atelier laitier (Equation [4]) sont la somme des recettes pour chaque produit vendu, à savoir, le lait ($R_Milk_{k,t}$), les veaux d'un mois, les génisses prêtes à vêler (R_Ani_t) et la viande de réforme (R_Cull_t) :

$$Ex_{k,t} = Ex_Vet_{k,t} + Ex_Feed_{k,t} + Ex_Oth_{k,t} \quad [3]$$

$$R_{k,t} = \sum_L R_Milk_{k,t} + \sum_A R_Ani_t + R_Cull_t \quad [4]$$

Où L dénote la qualité du lait en termes de cellules et A dénote le type d'animaux vendus (par exemple, génisses ou veaux mâles).

La quantité de lait hebdomadaire produite et vendue par l'élevage est enregistrée et la moyenne hebdomadaire des cellules et des paramètres biochimiques (matière grasse et protéique) sont pris en compte pour déterminer le prix du lait mensuel payé à l'éleveur selon les critères habituels de rémunérations. La qualité cytologique réfère au nombre de cellules somatiques du lait (SCC) qui est un indicateur de la santé de la mamelle et de l'occurrence de mammite.

II.2.a. Simulation de la problématique d'optimisation sous contraintes de temps de travail et de longévité

Lors de la simulation de la problématique d'optimisation, quatre grandes catégories de contraintes sont utilisées. Premièrement, la contrainte structurelle du bâtiment est prise en compte comme une capacité définie du bâtiment *Capacity_t* et un nombre de places occupées $X_{t,s}$ est simulé pour l'année t et pour la stratégie de gestion s. Cette contrainte est indépendante de la taille du troupeau et peut varier un peu autour de la capacité du bâtiment (voir densité du troupeau ; information 1) :

$$\sum_{t,s} X_{t,s} \leq Capacity_t \quad [5]$$

Deuxièmement, la charge de travail est considérée comme une contrainte de gestion de l'élevage laitier. Etant donné que le flux de travail est difficile à décrire, des changements dans le travail sont considérés ici s'il y a des changements dans les pratiques ou des nouveaux traitements pour une stratégie donnée. Le temps de travail supplémentaire $W_{t,s}$ effectué par l'éleveur dans l'année t pour la stratégie de gestion s est limité à un seuil $W_{Threshold}$ qui correspond au temps de travail supplémentaire que l'éleveur f est capable de supporter, comme indiqué dans l'Equation [6] :

$$\sum_{t,s} W_{t,s} * X_{t,s} \leq W_{Threshold}_f \quad [6]$$

Troisièmement, le modèle considère que les vaches laitières sont nourries à base d'ensilage de maïs produit sur la ferme et d'aliment concentré provenant de l'extérieur en supplément (par exemple, farine de blé et de soja). La composition du régime alimentaire est basée sur l'ensilage de maïs à 61 % plus ou moins 10 %. Cette dernière doit également correspondre aux besoins des vaches en énergie et en protéines brutes. Le risque appliqué concernant la quantité et la qualité de l'ensilage de maïs entraîne des changements dans la quantité des concentrés (pour compensation) qui sont des achats. Selon la façon dont les aliments sont inclus dans le modèle, $Z_{k,t}$ doit être appelé la marge brute équivalente au lieu de marge brute.

Quatrièmement, les principes d'agro-écologie et de durabilité de la production laitière sont pris en compte avec 3 principaux critères : l'utilisation des antibiotiques (AMU), la longévité des vaches laitières et le bien-être des animaux. Garantir que les conditions optimales ne sont pas obtenues avec AMU max est un point essentiel puisque le modèle peut considérer un haut niveau d'utilisation des antibiotiques pour trouver une solution optimale et cette situation ne correspond pas aux pratiques de terrain. L'Equation [7] définit la diminution en pourcentage à l'exposition aux antibiotiques (**Reduction_AM**) en comparaison à la référence (**ALEA_Threshold_{t,s}**) appliqué au niveau d'exposition des antibiotiques **ALEA_{t,s}** pour l'année t et la stratégie de gestion s :

$$\sum_{t,s} AMU_{t,s} * X_{t,s} \leq \left(1 - \frac{Reduction_{AM}}{100}\right) * \sum_{t,s} AMU_{Threshold_{t,s}} \quad [7]$$

II.2.b. Analyse économique des résultats

Le modèle d'optimisation a été exécuté séparément sur les 3 scénarios contextuels (H0, H2 et H4 – *Tableau 3*). Pour chaque niveau de contrainte, le modèle identifie le scénario optimal ainsi que les indicateurs techniques et sanitaires inhérents.

Tableau 2 : Description des contraintes d'optimisation pour l'acceptation de la charge de travail de l'éleveur et l'objectif de longévité des vaches

| Scénarios : contrainte de charge de travail | | Scénarios : contrainte de longévité | |
|---|---|-------------------------------------|--|
| Label | Description | Label | Description |
| GTIME_Free | Pas de contrainte de temps de travail | ADULTAGE_Free | Pas de contrainte de longévité |
| GTIME_40 | Charge de travail supplémentaire de moins de 40h/mois | ADULTAGE_110w | Age adulte moyen des vaches supérieur à 110 semaines |
| GTIME_35 | Charge de travail supplémentaire de moins de 35h/mois | ADULTAGE_120w | Age adulte moyen des vaches supérieur à 110 semaines |
| GTIME_30 | Charge de travail supplémentaire de moins de 30h/mois | ADULTAGE_125w | Age adulte moyen des vaches supérieur à 110 semaines |
| GTIME_25 | Charge de travail supplémentaire de moins de 25h/mois | ADULTAGE_130w | Age adulte moyen des vaches supérieur à 110 semaines |
| GTIME_20 | Charge de travail supplémentaire de moins de 20h/mois | | |
| GTIME_15 | Charge de travail supplémentaire de moins de 15h/mois | | |
| GTIME_10 | Charge de travail supplémentaire de moins de 10h/mois | | |
| GTIME_5 | Charge de travail supplémentaire de moins de 5h/mois | | |

II.3. Application à la gestion de la reproduction en élevage bovin laitier

II.3.a. Description des scénarios de gestion de la reproduction

L'application à la gestion de la reproduction en élevage bovin laitier a pour objectif de prévoir des pratiques d'élevages associées à un optimum économique sous différents problèmes techniques et différents contextes. Plusieurs axes de variation concernant la reproduction ont été formulés au départ :

- Un critère collectif : Voluntary Waiting Period (VWP) ; Période d'attente volontaire,
- Un critère individuel : Insemination (IA) ; Insémination,
- Un critère de technicité éleveur : Fake Heat (FH) ; Fausses chaleurs,
- Un critère de comportement éleveur : Detection Rate (DR) ; Taux de détection des chaleurs.

Ces différents axes sont les modalités de reproduction qui vont varier dans le modèle et permettre d'observer les paramètres qu'ils impactent en élevage bovin laitier. En fonction de la variation de ces axes, différents scénarios sont obtenus et permettent d'observer l'impact des paramètres de reproduction sur les résultats d'élevage, mais aussi sur les résultats économiques (Tableau 3).

Les scénarios de période d'attente volontaires (VWP) représentent la période d'attente entre le vêlage et le retour à l'insémination. Dans le modèle, VWP va varier respectivement de 5 semaines à 13 semaines.

Les scénarios d'insémination (IA) représentent le comportement de l'éleveur lors de l'insémination des vaches. L'éleveur aura deux choix pour une vache : soit il prend en compte la note d'état corporel (NEC) et il ne va donc pas inséminer dans les 3 semaines suivant la détection si la vache a une endométrite purulente ou il va inséminer à la 13^{ème} semaine de lactation si la vache a une cétose subclinique, soit il ne prend pas en compte la NEC pour inséminer et il va inséminer directement après la détection des chaleurs.

Les scénarios de fausse détection de chaleurs (FH) représentent le risque pour l'éleveur et par vache de fausse détection des chaleurs et va varier selon deux modalités : FH0 et FH1. Lors des scénarios FH0, le risque de fausse détection de chaleurs est moins important que lors des scénarios FH1.

Les scénarios de taux de détection (DR) représentent le taux de détection des chaleurs en lien avec le temps d'observation quotidien des vaches par l'éleveur. Dans le modèle, DR pourra varier et atteindre les valeurs de 25 %, 35 %, 45 %, 55 % et 75 %. Ces taux de détection correspondent respectivement à un temps et une fréquence d'observation quotidienne des vaches de : 0 min, une fois 15 min, une fois 30 min, une fois 45 min et deux fois 30 min.

II.3.b. Calibration des scénarios

Tableau 3 : Description des scénarios de gestion

| Comportement de l'éleveur : detection rate (DR) | |
|---|---|
| DR25 | Taux de détection éleveur = 25% ; Temps dédié à la détection des chaleurs = 0 min/jour |
| DR35 | Taux de détection éleveur = 35% ; Temps dédié à la détection des chaleurs = 15 min/jour |
| DR45 | Taux de détection éleveur = 45% ; Temps dédié à la détection des chaleurs = 30 min/jour |
| DR55 | Taux de détection éleveur = 55% ; Temps dédié à la détection des chaleurs = 40 min/jour |
| DR75 | Taux de détection éleveur = 75% ; Temps dédié à la détection des chaleurs = 2 x 30 min/jour |
| Comportement de l'éleveur : Fake heat detection (FH) | |
| FH0 | 0.4% de risque par vache par semaine d'insémination avant l'expression de chaleurs |
| FH1 | 0.8% de risque par vache par semaine d'insémination avant l'expression de chaleurs |
| Critère collectif de décision : Voluntary waiting period (VWP) | |
| VWP5 | Période d'attente volontaire = 5 semaines |
| VWP6 | Période d'attente volontaire = 6 semaines |
| VWP7 | Période d'attente volontaire = 7 semaines |
| VWP8 | Période d'attente volontaire = 8 semaines |
| VWP9 | Période d'attente volontaire = 9 semaines |
| VWP10 | Période d'attente volontaire = 10 semaines |
| VWP11 | Période d'attente volontaire = 11 semaines |
| VWP12 | Période d'attente volontaire = 12 semaines |
| VWP13 | Période d'attente volontaire = 13 semaines |
| Critère individuel de décision : Insemination (IA) | |
| IA0 | L'éleveur insémine toujours après la détection des chaleurs. |
| IA1 | L'éleveur n'insémine pas les vaches ; avant la 13 ^{ème} semaine de lactation s'il y a cétose subclinique (SCK) et/ou 3 semaines après la détection s'il y a endométrite (PVD). |
| Scénario contextuel : incidence des mammites cliniques ? | |
| H0 | 1 mammite clinique par vache par an |
| H2 | 2.5 mammites cliniques par vache par an |
| H4 | 4.5 mammites cliniques par vache par an |

II.3.c. Simulations

Plusieurs simulations tests ont été réalisées afin d'effectuer un certain nombre de corrections et de calibrages pour obtenir les simulations finales. Les hypothèses ont été validées à dire d'experts. Ces dernières ont été formulées sur le temps de travail nécessaire pour la gestion de la reproduction ; le temps d'observation des vaches pour la détection des chaleurs et le temps de travail pour la réalisation des inséminations. Le temps d'observation des vaches a été estimé et associé respectivement au taux de détection de 25 % à 75 % : 0 min/jour, 15 min/jour, 30 min/jour, 40 min/jour et deux fois 30 min/jour. Le temps de travail de l'éleveur pour la réalisation des inséminations est estimé à 10 min/insémination. Ces hypothèses ont été validées principalement sur les indicateurs de performances de reproduction, de dynamique de cheptel et de niveau de production. Au total, 540 scénarios ont été simulés sur une durée de 14 ans pour chacun d'eux et les résultats ont été analysés sur les 10 dernières années des simulations. En effet, les 4 premières années de chaque scénario ne sont pas prises en compte dans les analyses car ce sont des années de transition.

L'analyse des résultats biologiques a été réalisée par axe de gestion de la reproduction. Dans un premier temps, les données obtenues ont été réorganisées. Les simulations sont sous forme de baking ; un baking est la moyenne de 15 simulations d'une durée de 14 ans. Et chaque baking représente un scénario particulier donc 540 scénarios ont été obtenus et classés en fonction des différents axes de gestion de la reproduction. Au départ les 540 baking sont classés avec des index allant de 1 à 540 dans l'ordre dans lequel ils ont été simulés. Pour faciliter l'analyse des résultats biologiques, les différents scénarios ont été classés de manière à faciliter la lisibilité des résultats (Figure 5).

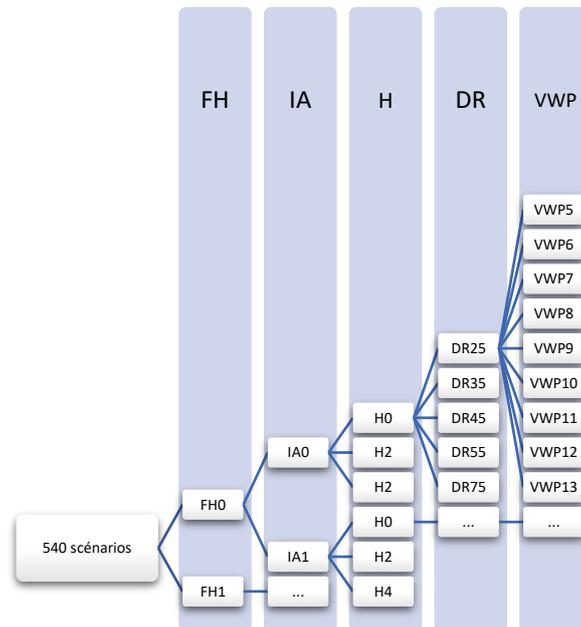


Figure 5 : Classification des scénarios pour l'analyse des résultats biologiques

Cette nouvelle classification des scénarios a permis de créer 5 feuilles d'analyse : la reproduction, la structure et la dynamique du cheptel, la production, la prévalence et la longévité. Dans chaque feuille d'analyse, les indicateurs correspondants ont été reportés et des graphes ont été réalisés par indicateur faisant apparaître les 540 scénarios. Cette première approche a permis de visualiser les premiers résultats importants en fonction des axes de gestion : FH, IA, H, DR et VWP. Cette étape a ensuite permis de faire apparaître les messages les plus importants en fonction des axes de gestion et par indicateur.

III. Résultats

III.1. Description des résultats biologiques

III.1.a. Voluntary Waiting Period VWP (Période d'attente volontaire)

Pour une VWP allongée, le taux de réussite aux IA et en première IA est amélioré. En effet, pour une insémination 5 semaines après vêlage, le taux de réussite aux IA est de 60 % alors qu'il est de 67 % pour les IA réalisées à 13 semaines post vêlage (Figure 6).

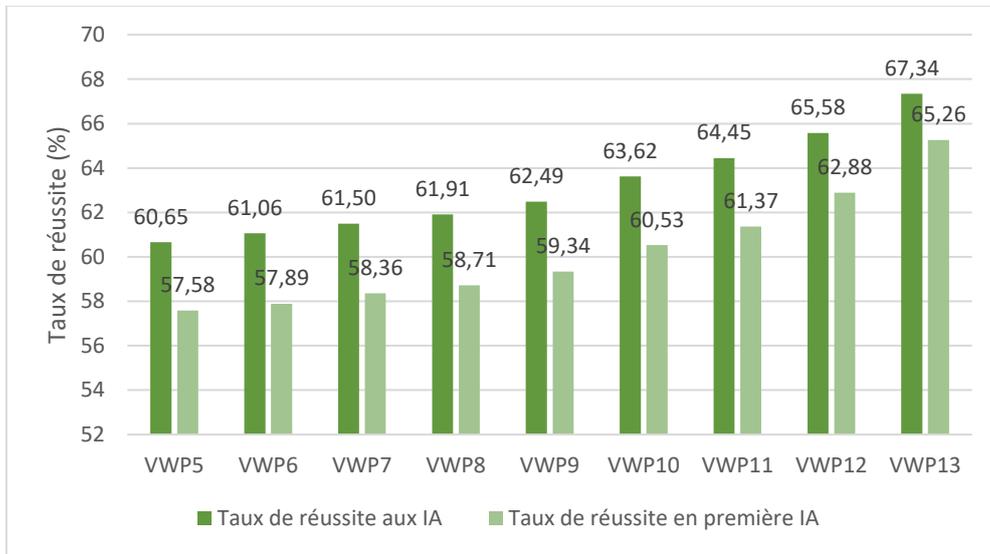


Figure 6 : Taux de réussite aux IA et en première IA en fonction de VWP

D'autre part, plus on insémine tard après le vêlage, et plus le nombre d'IA par conception est faible. En moyenne, 1,66 IA sont réalisées pour une conception à 5 semaines post-vêlage alors qu'on diminue à 1,49 IA réalisées pour une conception à 13 semaines post-vêlage (Figure 7).

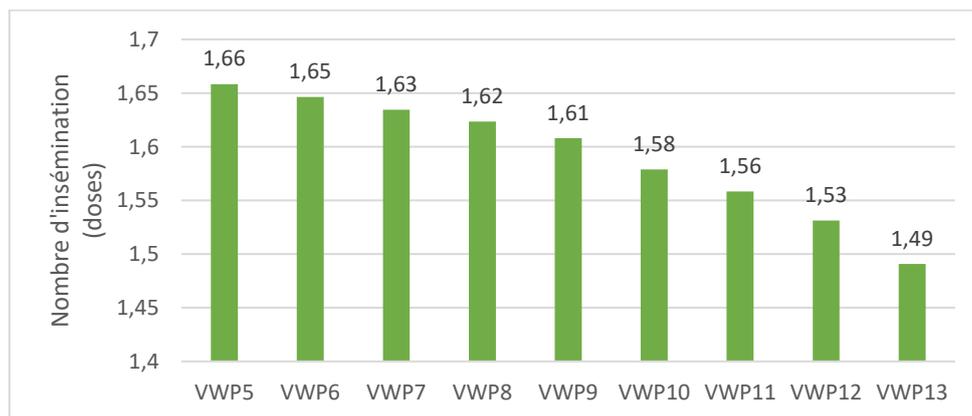


Figure 7 : Nombre d'IA par conception en fonction de VWP

L'IVV varie proportionnellement à la période d'attente volontaire (VWP). L'IVV est de 402,9 jours pour une insémination 5 semaines post-vêlage alors qu'il est de 414,6 jours (soit 12 jours de plus) pour une insémination à 13 semaines post-vêlage (Figure 8).

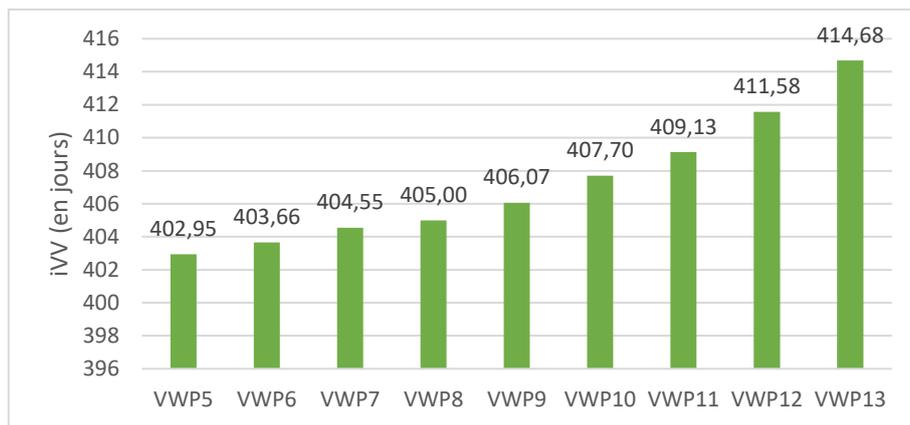


Figure 8 : Intervalle vêlage-vêlage en fonction de VWP

La durée moyenne de lactation varie très peu en fonction de la période d'attente volontaire. En effet, seulement une semaine d'écart peut être observée en fonction de VWP.

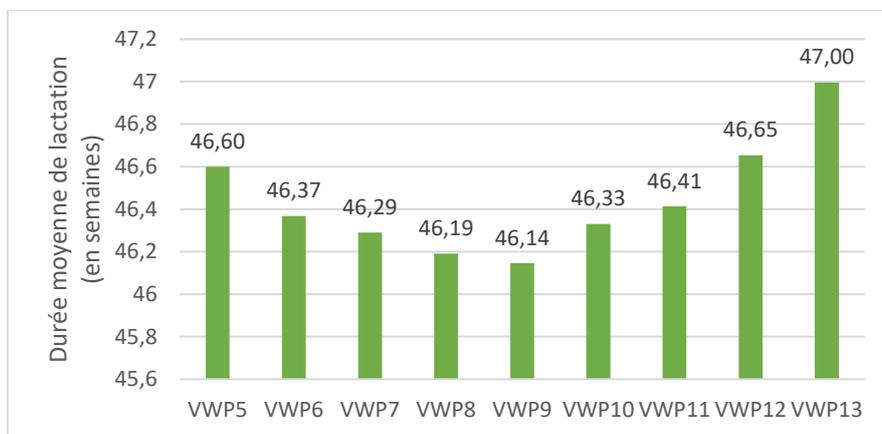


Figure 9 : Durée moyenne de lactation en fonction de VWP

Le taux de renouvellement et le taux de réforme du troupeau reste très stable en fonction de VWP.

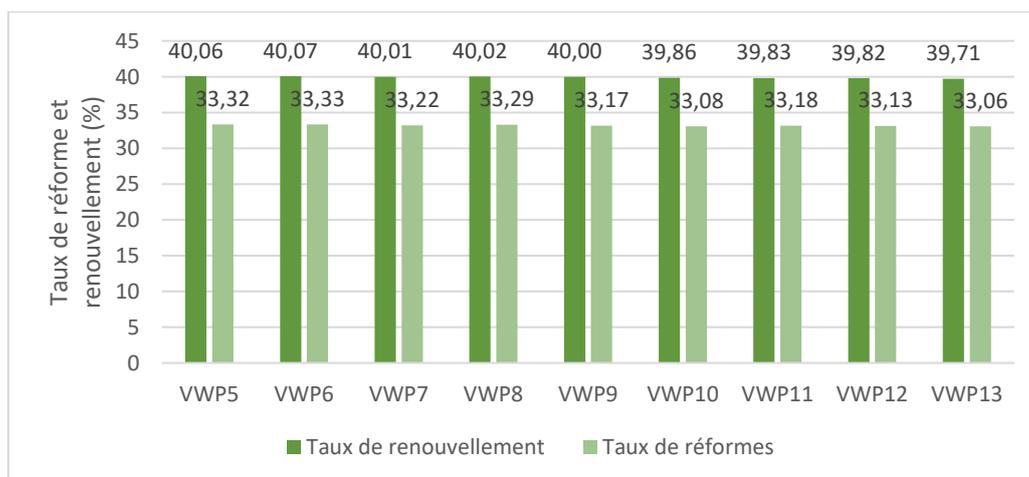


Figure 10 : Taux de renouvellement et de réforme en fonction de VWP

III.1.b. Detection Rate DR (Taux de détection)

Lorsque le taux de détection augmente, le nombre d'IA réalisées est plus important car l'éleveur insémine plus. Le nombre moyen d'IA réalisées par an passe de 166 IA pour un taux de détection de 25 % à 282 IA pour un taux de détection de 75 %, soit un écart de 116 IA (Figure 11).

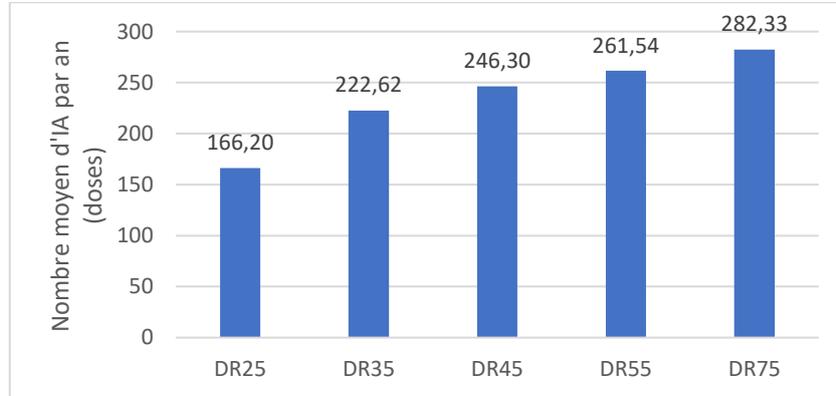


Figure 11 : Nombre moyen d'inséminations réalisées annuellement en fonction de DR

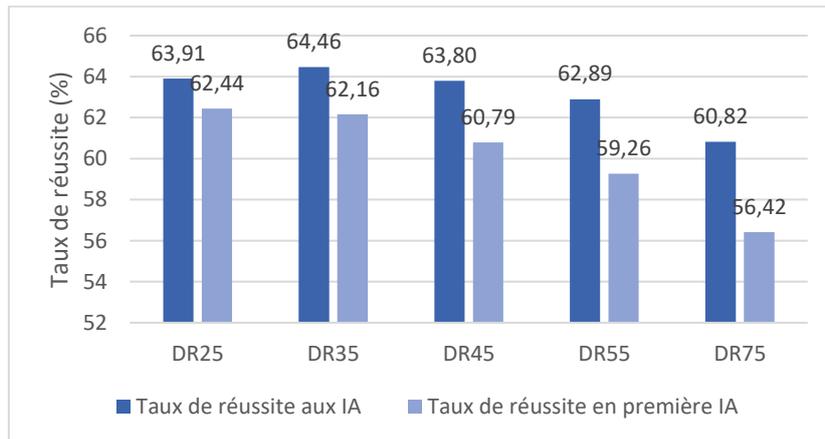


Figure 12 : Taux de réussite aux IA et en première IA en fonction de DR

Lorsque le taux de détection est amélioré, une meilleure occupation de l'atelier laitier est observée (Figure 14). Et la production laitière est également plus importante dans ce contexte. En effet, pour un taux de détection à 25 %, la production laitière est de seulement 741 368 L alors qu'elle est de 969 754 L pour un taux de détection de 75 % (Figure 13).

Lorsque le taux de détection est amélioré, le taux de réussite moyen aux IA et en première IA diminue (Figure 12). En effet, pour un taux de détection de 25 %, le taux de réussite aux IA est de 63,91 % alors qu'il est seulement de 56,42 % pour un taux de détection de 75 %.

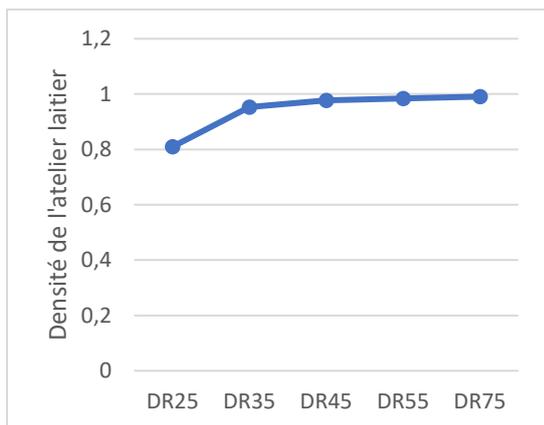


Figure 14 : Densité de l'atelier laitier en fonction de DR

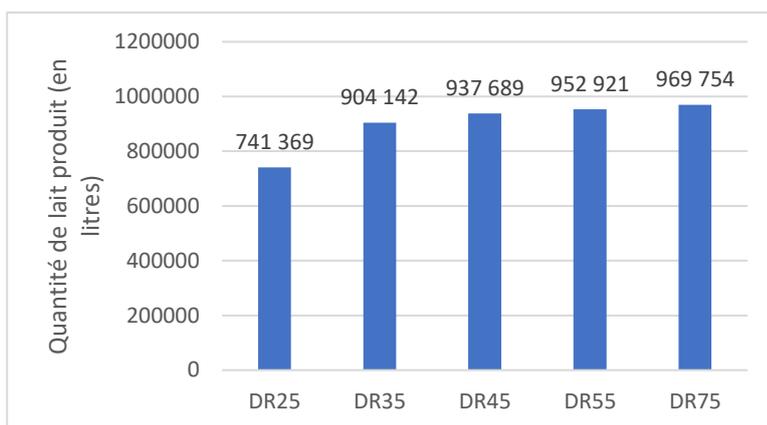


Figure 13 : Production laitière en fonction de DR

Il est également important de souligner qu'avec un meilleur taux de détection, la durée moyenne de lactation est moins longue. En effet, avec un taux de détection de 25 %, la durée de lactation moyenne est de 50 semaines alors qu'elle est seulement de 43 semaines pour un taux de détection de 75 % (Figure 15). Une mauvaise détection des chaleurs rallonge le cycle de lactation de manière non optimale car la production laitière est moins importante dans ces conditions.

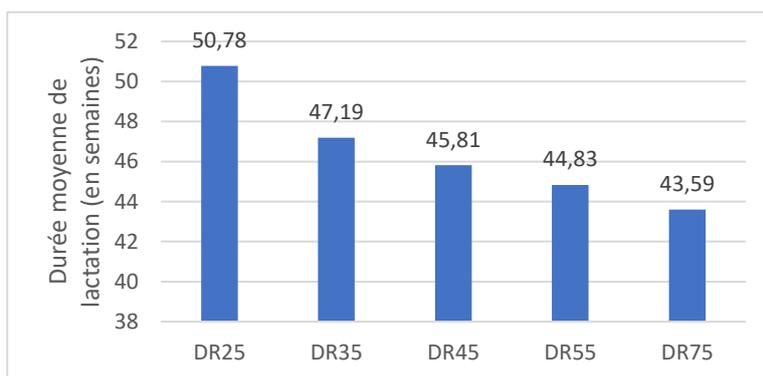


Figure 15 : Durée moyenne de lactation en fonction de DR

Dans ces conditions, un meilleur taux de détection permet également de diminuer le taux de renouvellement du troupeau. En effet, pour un taux de détection de 25 %, le taux de renouvellement est de 42,07 % alors qu'il est seulement de 37,49 % pour un taux de détection de 75 % (Figure 16). Il est donc logique qu'un meilleur taux de détection permet également un taux de réforme plus faible. En effet, pour un taux de détection de 25 %, le taux de réforme est de 37,01 % alors qu'il est de 29,91 % seulement pour un taux de détection de 75 % (Figure 17).

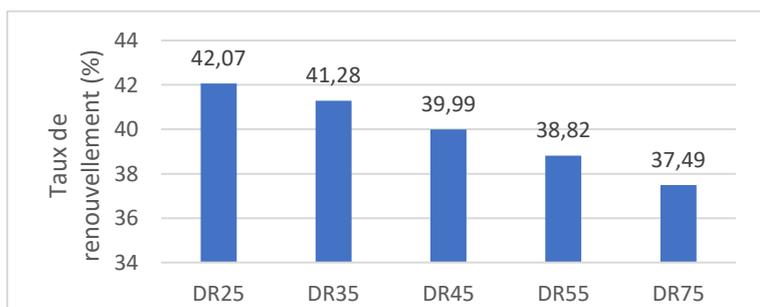


Figure 16 : Taux de renouvellement en fonction de DR

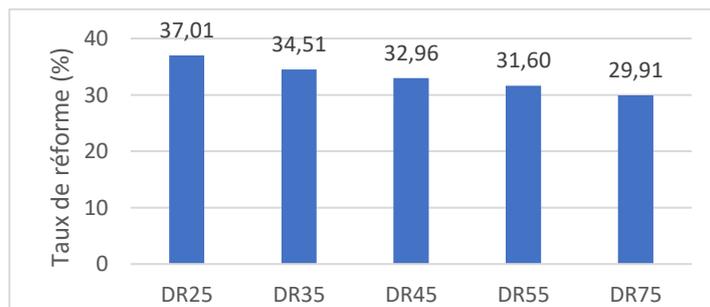


Figure 17 : Taux de réforme en fonction de DR

Etant donné que le cycle de lactation est réduit avec un meilleur taux de détection des chaleurs, l'intervalle vêlage-vêlage (IVV) est également raccourci. En effet, pour un taux de détection de 25 %, l'IVV est de 420 jours en moyenne alors qu'il est seulement de 394 jours pour un taux de détection de 75 % (Figure 18).

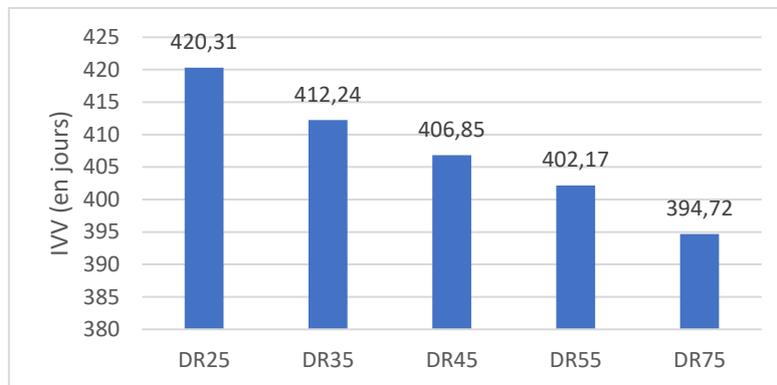


Figure 18 : Intervalle vêlage-vêlage en fonction de DR

III.1.c. Fake Heat FH

Lorsque le risque de détection de fausses chaleurs est moins important, le taux de réussite aux IA est meilleur. En effet pour les scénarios où le risque de détection de fausses chaleurs est moindre (FH0), le taux de réussite aux IA est de 64 % alors qu'il est seulement de 62 % pour les scénarios présentant un risque plus important de détection de fausses chaleurs (FH1). Ceci correspond aussi au fait que dans les scénarios FH0, le nombre de fausses chaleurs détectées est beaucoup moins important.

III.1.d. Hygiène H

Lorsque le niveau d'hygiène est meilleur, l'occupation de l'atelier laitier est meilleure, en effet la densité de l'atelier laitier est de 0,95 pour un niveau d'hygiène H0 alors qu'elle est de 0,93 pour un niveau d'hygiène H4. D'ailleurs, lorsque le niveau d'hygiène est meilleur, le taux de renouvellement est moins important. En effet, lorsque l'hygiène est bonne (H0), le taux de renouvellement est de 36,8 % alors que lorsque l'hygiène est dégradée (H4), le taux de renouvellement augmente à 41,6 %. Ceci est également en lien avec le nombre de génisses prêtes à vêler vendues ; lorsque l'hygiène est bonne (H0), le nombre de génisses prêtes à vêler vendues est de 6,8 génisses alors qu'il est seulement de 2,9 génisses lorsque l'hygiène est dégradée (H4).

D'autre part, la perte de lait est moins grande lorsque l'hygiène est meilleure :

- Moins de perte directe ; ces pertes correspondent au lait écarté du tank en raison du comptage cellulaire important, et du délai d'attente pour les traitements, mais aussi la perte de qualité du lait,
- Moins de perte indirecte ; ces pertes sont induites par les infections mammaires et les autres troubles que les mammites peuvent induire (Annexe 6, OR cross disease).

Pour un niveau d'hygiène H0, la production laitière totale est de 948 152 L alors que pour une hygiène moindre (en H4), la production laitière totale est seulement de 854 288 L. En ce qui concerne la qualité du lait, lorsque l'hygiène est moins bonne, le comptage cellulaire est relativement dégradé. En effet, lorsque l'hygiène est équivalente à H4, le lait produit est majoritairement du lait avec un comptage cellulaire de 300 000 cellule voire 400 000 cellule (Figure 19).

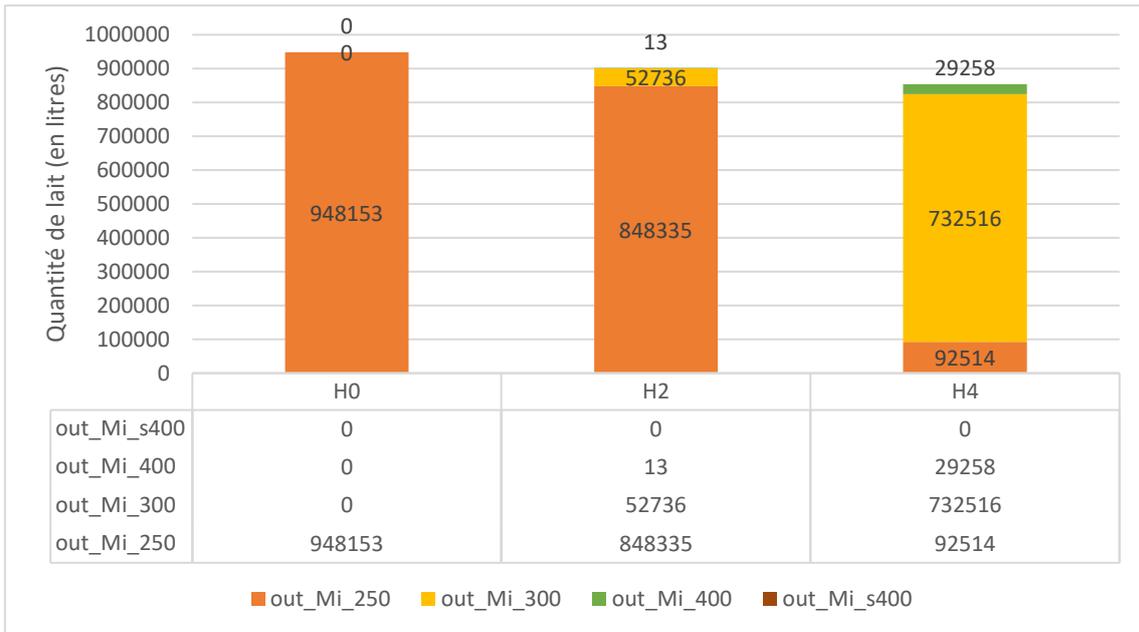


Figure 19 : Quantité et qualité du lait produit en fonction de l'hygiène H

La qualité du lait est très liée à la prévalence des mammites. Dans ce contexte, lorsque l'hygiène est dégradée (en H4), la prévalence des mammites est plus importante. Pour les vaches ayant eu au moins une mammite, le nombre total de mammites pour ces vaches est différent en fonction de l'hygiène ; en H0, le nombre total de mammites pour les vaches ayant eu au moins une mammite est de 1,3 alors qu'il est de 4,1 lorsque l'hygiène est dégradée (en H4) (Figure 20).

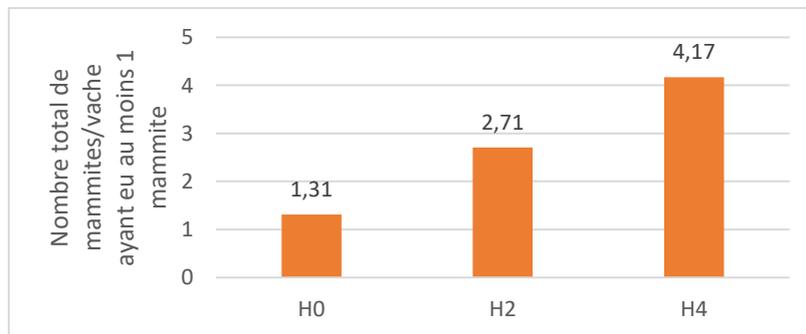


Figure 20 : Prévalence des mammites en fonction de l'hygiène

III.1.e. Insemination IA

Lorsque l'insémination est sélective (IA1), l'intervalle vêlage-vêlage est allongé d'1,11 jours seulement (Figure 21).

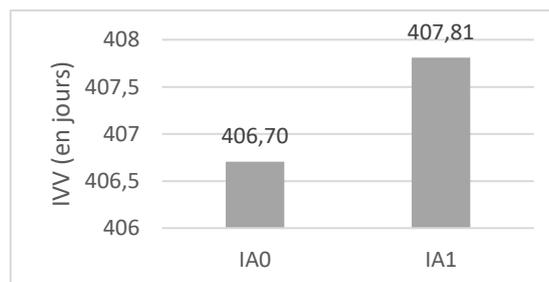


Figure 21 : Intervalle vêlage-vêlage en fonction de IA

Le taux de réussite aux IA est également meilleur dans cette situation. En effet, lors du scénario IA0, le taux de réussite aux IA est de 62,9 % alors qu'il est de 63,5 % pour les scénarios avec insémination sélective (IA1) (Figure 22).

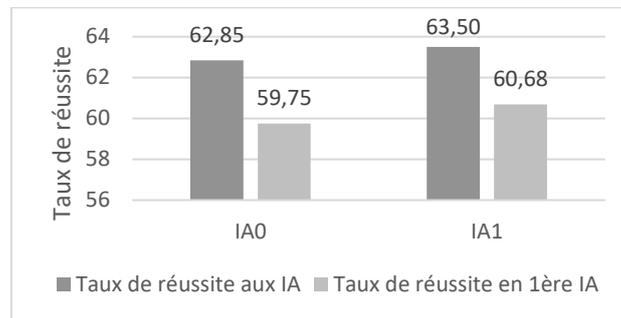


Figure 22 : Taux de réussite aux IA et en première IA en fonction de IA

III.2. Analyse économique

III.2.a. Scénarios optimaux en fonction des contraintes

Les résultats montrent que plus l'éleveur est contraint par son temps de travail pour la gestion de la reproduction, plus l'intervalle optimal entre les vêlages est long (Figure 23).

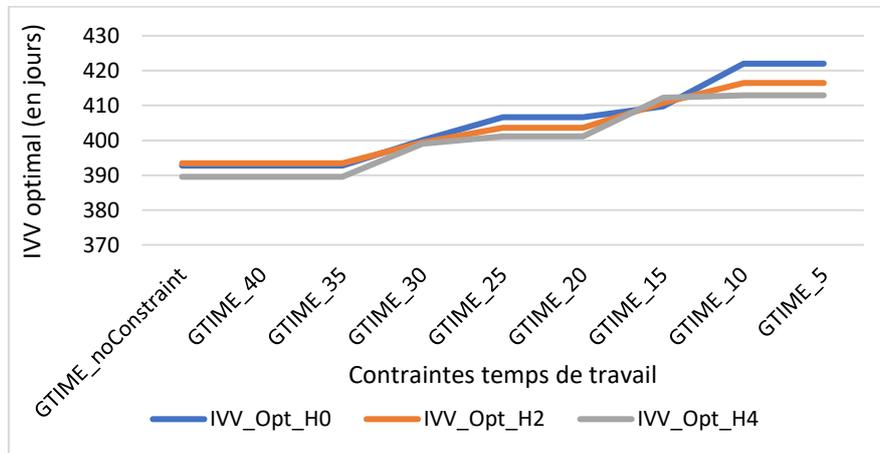


Figure 23 : Intervalle vêlage-vêlage optimal en fonction du scénario optimal sous différentes contraintes de temps de travail

Le Tableau 4 ci-dessous illustre les scénarios de gestion optimaux pour chaque combinaison de contraintes. Il apparaît que lorsque l'éleveur est progressivement contraint sur sa charge de travail liée à la reproduction, des solutions optimales suggèrent un changement de stratégie pour le taux de détection. Par exemple, pour les scénarios H0, lorsque l'éleveur n'est pas contraint sur son temps de travail, les scénarios optimaux suggèrent un taux de détection de 75 % (Tableau 4 – H0_Modèle, GTIME_Free, ADULTAGE_Free, FH0_IA0_H0_DR75_VWP7) alors que lorsque l'éleveur est fortement contraint sur son temps de travail (GTIME_5), les scénarios optimaux suggèrent un taux de détection de seulement de 25 % (Tableau 4 – H0_Modèle, GTIME_5, ADULTAGE_Free, FH1_IA0_H0_DR25_VWP8). A contrario, lorsque l'éleveur est progressivement contraint sur la longévité des vaches, des résultats optimaux suggèrent un changement de période d'attente volontaire (VWP). Par exemple, pour les scénarios H4, lorsque l'éleveur n'est pas contraint sur la longévité des vaches, les scénarios optimaux suggèrent une période d'attente volontaire de 5 semaines (Tableau 4 – H4_Modèle, GTIME_Free, ADULTAGE_Free, FH0_IA1_H4_DR75_VWP5) alors que lorsque l'éleveur est fortement contraint sur la longévité (ADULTAGE_130w), les scénarios optimaux suggèrent une période d'attente volontaire de 13 semaines (Tableau 4 – H4_Modèle, GTIME_Free, ADULTAGE_130w, FH0_IA0_H4_DR75_VWP13). Pour toutes les combinaisons de contraintes, les résultats suggèrent un VWP élevé associé à un faible DR, et inversement.

| Contrainte temps de travail | Contrainte longévité | H0_Modèle | H2_Modèle | H4_Modèle |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| GTIME_Free | ADULTAGE_Free | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA1_H4_DR75_VWP5 |
| GTIME_Free | ADULTAGE_110w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA1_H4_DR75_VWP5 |
| GTIME_Free | ADULTAGE_120w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA1_H4_DR75_VWP5 |
| GTIME_Free | ADULTAGE_125w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA0_H4_DR75_VWP6 |
| GTIME_Free | ADULTAGE_130w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FH1_IA0_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA0_H4_DR75_VWP13 |
| GTIME_40 | ADULTAGE_Free | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA1_H4_DR75_VWP5 |
| GTIME_40 | ADULTAGE_110w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA1_H4_DR75_VWP5 |
| GTIME_40 | ADULTAGE_120w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA1_H4_DR75_VWP5 |
| GTIME_40 | ADULTAGE_125w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA0_H4_DR75_VWP6 |
| GTIME_40 | ADULTAGE_130w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FH1_IA0_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA0_H4_DR75_VWP13 |
| GTIME_35 | ADULTAGE_Free | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA1_H4_DR75_VWP5 |
| GTIME_35 | ADULTAGE_110w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA1_H4_DR75_VWP5 |
| GTIME_35 | ADULTAGE_120w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA1_H4_DR75_VWP5 |
| GTIME_35 | ADULTAGE_125w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FHO_IA1_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA0_H4_DR75_VWP6 |
| GTIME_35 | ADULTAGE_130w | FHO_IA0_H0_DR75_VWP7 | FH1_IA0_H2_DR75_VWP8 | FHO_IA0_H4_DR75_VWP13 |
| GTIME_30 | ADULTAGE_Free | FHO_IA1_H0_DR55_VWP9 | FHO_IA1_H2_DR55_VWP5 | FHO_IA1_H4_DR55_VWP5 |
| GTIME_30 | ADULTAGE_110w | FHO_IA1_H0_DR55_VWP9 | FHO_IA1_H2_DR55_VWP5 | FHO_IA1_H4_DR55_VWP5 |
| GTIME_30 | ADULTAGE_120w | FHO_IA1_H0_DR55_VWP9 | FHO_IA1_H2_DR55_VWP5 | FHO_IA1_H4_DR55_VWP5 |
| GTIME_30 | ADULTAGE_125w | FHO_IA1_H0_DR55_VWP9 | FHO_IA1_H2_DR55_VWP5 | FH1_IA0_H4_DR55_VWP5 |
| GTIME_30 | ADULTAGE_130w | FHO_IA1_H0_DR55_VWP9 | FH1_IA0_H2_DR55_VWP12 | Infaisable |
| GTIME_25 | ADULTAGE_Free | FHO_IA1_H0_DR45_VWP6 | FH1_IA0_H2_DR45_VWP6 | FHO_IA0_H4_DR45_VWP8 |
| GTIME_25 | ADULTAGE_110w | FHO_IA1_H0_DR45_VWP6 | FH1_IA0_H2_DR45_VWP6 | FHO_IA0_H4_DR45_VWP8 |
| GTIME_25 | ADULTAGE_120w | FHO_IA1_H0_DR45_VWP6 | FH1_IA0_H2_DR45_VWP6 | FHO_IA0_H4_DR45_VWP8 |
| GTIME_25 | ADULTAGE_125w | FHO_IA1_H0_DR45_VWP6 | FHO_IA1_H2_DR45_VWP6 | FH1_IA0_H4_DR45_VWP8 |
| GTIME_25 | ADULTAGE_130w | FHO_IA1_H0_DR45_VWP6 | Infaisable | Infaisable |
| GTIME_20 | ADULTAGE_Free | FHO_IA1_H0_DR45_VWP6 | FH1_IA0_H2_DR45_VWP6 | FHO_IA0_H4_DR45_VWP8 |
| GTIME_20 | ADULTAGE_110w | FHO_IA1_H0_DR45_VWP6 | FH1_IA0_H2_DR45_VWP6 | FHO_IA0_H4_DR45_VWP8 |
| GTIME_20 | ADULTAGE_120w | FHO_IA1_H0_DR45_VWP6 | FH1_IA0_H2_DR45_VWP6 | FHO_IA0_H4_DR45_VWP8 |
| GTIME_20 | ADULTAGE_125w | FHO_IA1_H0_DR45_VWP6 | FHO_IA1_H2_DR45_VWP6 | FH1_IA0_H4_DR45_VWP8 |
| GTIME_20 | ADULTAGE_130w | FHO_IA1_H0_DR45_VWP6 | Infaisable | Infaisable |
| GTIME_15 | ADULTAGE_Free | FHO_IA1_H0_DR35_VWP11 | FH1_IA0_H2_DR35_VWP9 | FH1_IA0_H4_DR35_VWP8 |
| GTIME_15 | ADULTAGE_110w | FHO_IA1_H0_DR35_VWP11 | FH1_IA0_H2_DR35_VWP9 | FH1_IA0_H4_DR35_VWP8 |
| GTIME_15 | ADULTAGE_120w | FHO_IA1_H0_DR35_VWP11 | FH1_IA0_H2_DR35_VWP9 | FH1_IA0_H4_DR35_VWP8 |
| GTIME_15 | ADULTAGE_125w | FHO_IA1_H0_DR35_VWP11 | FHO_IA1_H2_DR35_VWP9 | FHO_IA0_H4_DR35_VWP11 |
| GTIME_15 | ADULTAGE_130w | FHO_IA1_H0_DR35_VWP11 | Infaisable | Infaisable |
| GTIME_10 | ADULTAGE_Free | FH1_IA0_H0_DR25_VWP8 | FHO_IA0_H2_DR25_VWP9 | FHO_IA0_H4_DR25_VWP10 |
| GTIME_10 | ADULTAGE_110w | FHO_IA1_H0_DR25_VWP11 | FH1_IA0_H2_DR25_VWP11 | FHO_IA0_H4_DR25_VWP10 |
| GTIME_10 | ADULTAGE_120w | FHO_IA1_H0_DR25_VWP11 | FH1_IA0_H2_DR25_VWP11 | FHO_IA0_H4_DR25_VWP10 |
| GTIME_10 | ADULTAGE_125w | FH1_IA1_H0_DR25_VWP12 | FHO_IA0_H2_DR25_VWP8 | FHO_IA0_H4_DR25_VWP7 |
| GTIME_10 | ADULTAGE_130w | Infaisable | Infaisable | Infaisable |
| GTIME_5 | ADULTAGE_Free | FH1_IA0_H0_DR25_VWP8 | FHO_IA0_H2_DR25_VWP9 | FHO_IA0_H4_DR25_VWP10 |
| GTIME_5 | ADULTAGE_110w | FHO_IA1_H0_DR25_VWP11 | FH1_IA0_H2_DR25_VWP11 | FHO_IA0_H4_DR25_VWP10 |
| GTIME_5 | ADULTAGE_120w | FHO_IA1_H0_DR25_VWP11 | FH1_IA0_H2_DR25_VWP11 | FHO_IA0_H4_DR25_VWP10 |
| GTIME_5 | ADULTAGE_125w | FH1_IA1_H0_DR25_VWP12 | FHO_IA0_H2_DR25_VWP8 | FHO_IA0_H4_DR25_VWP7 |
| GTIME_5 | ADULTAGE_130w | Infaisable | Infaisable | Infaisable |

Tableau 4 : Scénario optimal pour chaque combinaison de contraintes (temps de travail et longévité) pour les 3 modèles en fonction du scénario contextuel (hygiène)

III.2.b. Analyse des revenus

L'analyse de la marge brute annuelle moyenne de l'éleveur selon les différents scénarios montre une forte sensibilité au scénario DR. En effet, quel que soit le scénario VWP, une meilleure détection implique une meilleure marge pour l'éleveur (*Figure 24*).

Pour les faibles niveaux de DR, la marge brute de l'agriculteur est plus sensible à son choix VWP alors qu'elle est plus stable (par VWP) lorsque l'éleveur détecte mieux (DR25 vs DR75). En effet, la différence entre la marge minimum et maximum (8 757 €) pour les scénarios DR25 est bien supérieure à la différence entre la marge minimum et le maximum (3 130 €) pour les scénarios DR75 (*Figure 24*). Lorsque DR est élevé, l'éleveur prend peu de risque lors de ces décisions pour la stratégie VWP. Ceci indique que le coût d'opportunité d'un choix sous-optimal de la stratégie VWP est plus élevé avec un faible niveau de détection. De plus, lorsque le taux de détection (DR) est faible, les marges maximales sont atteintes pour les longues périodes d'attente volontaires (VWP), puis le pic se déplace vers les VWP plus courts lorsque l'éleveur détecte mieux (VWP11 pour DR25 ; VWP6 pour DR45) (*Figure 24*). Les marges en fonction de VWP présentent peu de variation, l'effet du scénario d'insémination sélective (IA) n'est perceptible que dans les situations de faible détection et l'effet du scénario FH n'apparaît pas dans les calculs de marge brute.

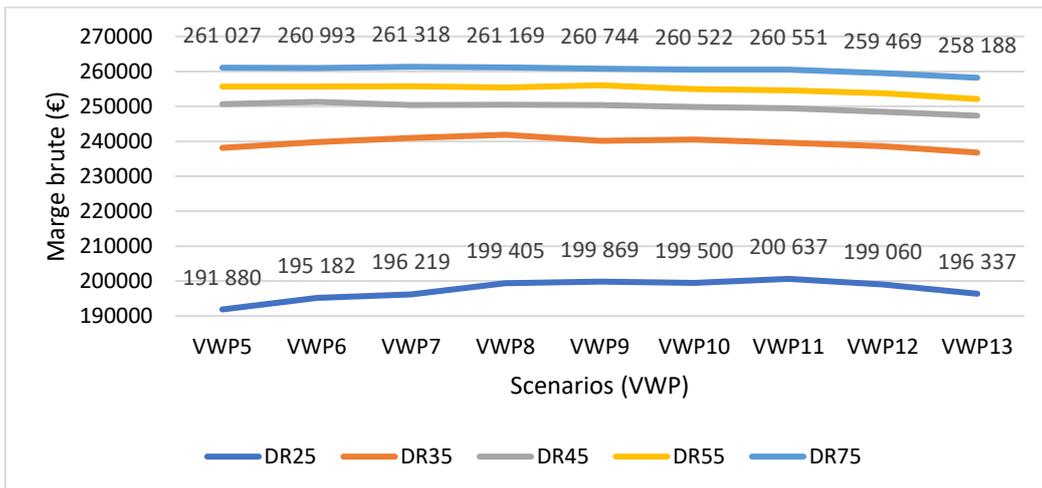


Figure 24 : Marge brute moyenne (en €) en fonction des scénarios DR et VWP

III.2.c. Gain marginal du temps d'observation en reproduction

Le taux de détection représente un critère déterminant pour le revenu de l'éleveur laitier, cet axe de gestion de la reproduction nécessite un investissement important en temps de travail pour l'éleveur pour l'observation des chaleurs. A partir des différences de charges de travail entre chaque scénario de détection (*Tableau 3*) et le scénario de référence DR25 (niveau de détection sans temps de détection œstrus dédié), nous avons calculé le gain marginal moyen par heure supplémentaire consacrée à la détection de l'œstrus. A partir d'une situation DR25, les premiers efforts sont les plus rentables avec un gain marginal moyen de 452 €/heure d'observation (DR35) (*Figure 25*). Pour un éleveur qui passe d'une situation DR35 à DR45, le gain marginal est de 174 € alors que d'une situation DR45 à DR55, le gain marginal n'est plus que de 76 €. Ce gain marginal est seulement de 36 € pour le passage d'une situation DR55 à DR75.

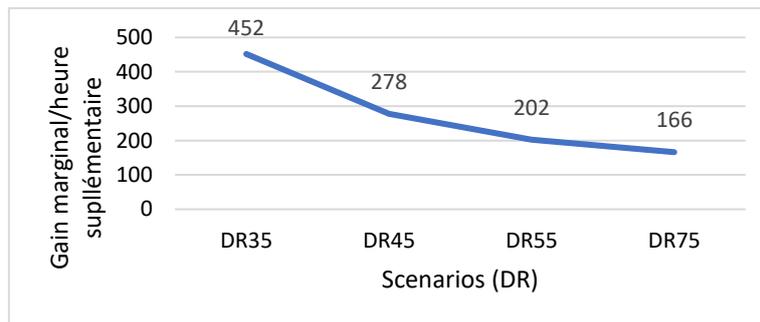


Figure 25 : Gain marginal de marge brute par heure de détection de l'œstrus (en €), DR25 est considéré comme référence car c'est le taux de détection sans temps d'observation dédié à la détection de l'œstrus

IV. Discussion

IV.1. Une modélisation innovante ; les limites de cette étude

La présente étude combine une modélisation innovante de simulation biologique et une optimisation économique multicritère, comme le fournit l'outil DHS[©]. Cette combinaison originale permet d'améliorer les standards méthodologiques en économie appliquée à la santé animale, à deux niveaux (Ferchiou et al., 2021). Tout d'abord, la partie biologique a été développée de manière à limiter les biais dus à une partie expliquée du modèle (boîte noire), comme on le voit souvent dans la modélisation dynamique des troupeaux laitiers (Bruijn et al., 2010 ; Gussmann et al., 2018). Dans notre modèle, seule la mortalité accidentelle est restée inexpliquée, tous les autres événements étant expliqués même s'ils sortent du cadre de l'analyse. Par exemple, la taille du troupeau peut changer en fonction des règles de réformes qui varient en fonction du taux d'occupation du bâtiment d'élevage. Cela place la gestion stratégique des exploitations agricoles au cœur du modèle. Cette approche systémique et holistique des troupeaux laitiers permet une meilleure prise en compte des interactions pathologiques et limite les a priori pouvant conduire à une estimation biaisée de la production. Le modèle d'optimisation économique couplé à la partie biologique est nouveau. À l'exception de quelques études récentes (Inchaisri et al., 2011 ; Ma et al., 2020), l'économie appliquée à la gestion de la santé des élevages laitiers se limite à l'estimation monétaire de l'impact épidémiologique, loin du fonctionnement réaliste d'un élevage et du comportement de l'éleveur. Dans une précédente étude, les résultats sont alors présentés de manière différente, en présentant la valeur de rétention d'une vache après vêlage avec le moment économiquement optimal pour inséminer et remplacer cette vache (*Figure 26*) (DeVries, 2006). Cette aperçu des résultats est différents du présent travail où les résultats reprennent le fonctionnement global de l'élevage et pas seulement l'animal.

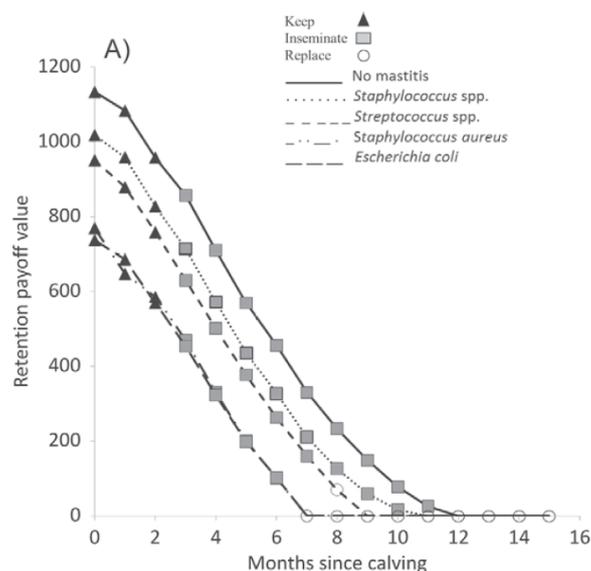


Figure 26 : Valeurs de rétention pour une vache hypothétiquement non gestante en lactation 2 avec au moins 1 mammite clinique dans la lactation précédente, avec des rendements laitiers permanents et temporaires moyens, avec soit pas de mammite soit avec un cas de mammite avec l'agent pathogène indiqué dans le mois suivant le vêlage : (A) Staphylococcus (DeVries, 2006)

L'approche actuelle est une représentation plus réaliste de l'élevage avec une approche holistique qui limite les a priori, bien que des améliorations soient encore nécessaires. Les décisions basées sur plusieurs critères et la considération du travail sont à coup sûr les deux éléments clés qui permettent d'améliorer le modèle par rapport à la littérature actuelle et précédente. La contrainte de main-

d'œuvre quotidienne des éleveurs ne peut pas être limitée au prix du marché de la main-d'œuvre dans la plupart des exploitations agricoles de l'UE, en raison de leur taille et de leurs caractéristiques. Enfin, la présente étude ne juxtapose pas seulement la partie biologique et économique mais elle propose une intégration étroite. En effet, la scénarisation implique à la fois des parties et des contraintes combinant des critères à la fois techniques et comportementaux.

IV.2. Detection Rate (DR) ; un indicateur clé de performance

Dans le présent travail, les résultats montrent que l'IVV optimal est allongé lorsque l'éleveur est progressivement contraint sur son temps de travail. Dans d'autres études, il est montré que l'allongement de la période ouverte de la vache a un coût croissant, notamment à partir de 160 jours ouverts (*Figure 27*) (Meadows, 2005).

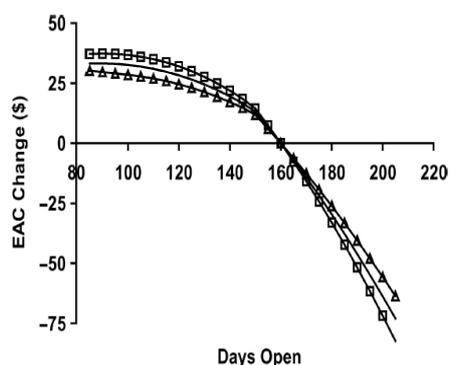


Figure 27 : Effet des jours ouverts sur la variation des flux de trésorerie annuels équivalents (EAC) par vache par rapport à une base de 160 jours ouverts avec les intrants de référence, ainsi qu'avec une augmentation de 20 % (□), et une baisse de 20 % (Δ) des prix du lait et des aliments pour animaux (Meadows, 2005)

Dans une autre étude, il est montré que le coût de l'allongement de l'IVV est différent selon le rang de lactation et le niveau de production. En effet, il est montré que l'allongement de l'IVV a un coût plus important pour les vaches de faible niveau de production mais également pour les vaches avec un rang de lactation élevé (Groenendaal, 2004).

Les résultats actuels sont en accord avec l'étude précédente montrant un coût marginal croissant de VWP avec la VWP (Inchaisri, 2011). En effet, une étude montre que la perte économique moyenne nette annuelle (en €/vache) augmente avec VWP (*Figure 28*) (Inchaisri, 2011).

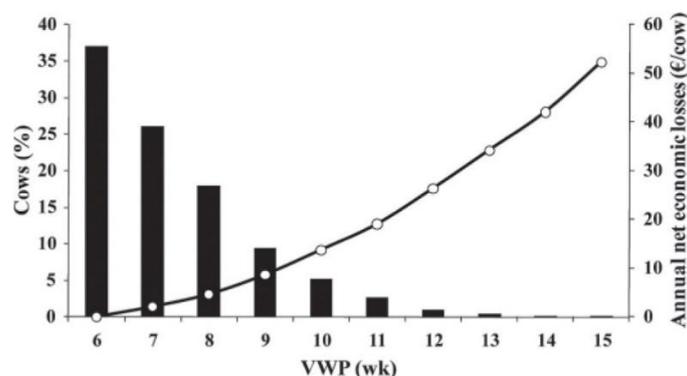


Figure 28 : Répartition de la période d'attente volontaire optimale pour la combinaison des facteurs de vache et des valeurs économiques (graphique à barres, axe gauche) et de la moyenne des pertes économiques nettes annuelles (€/vache) pour différentes périodes d'attente volontaires par rapport à une période d'attente volontaire de 6 semaines (graphique linéaire, axe droit). (Inchaisri, 2011)

Nous montrons ici que le coût marginal de la période d'attente volontaire (VWP) interagit avec le taux de détection (DR) et n'augmente pas toujours avec la VWP. Plus important encore, les résultats actuels montrent clairement que la VWP n'est pas un indicateur clé de performance pour la gestion des troupeaux laitiers, puisque le coût marginal du VWP est faible, quel que soit le DR et tous les autres paramètres techniques associés à cette approche stratégique de la gestion de la reproduction. A l'opposé, les résultats actuels montrent également que la marge brute est fortement dépendante de DR qui doit être considéré comme un indicateur de performance clé. En effet, dans une autre étude, les résultats montrent également une grande sensibilité de la marge brute annuelle en fonction du taux de détection de l'œstrus ; plus le taux de détection est élevé et plus la marge brute annuelle est importante (Bekara and Bareille, 2019). Le scénario DR considéré ici montre que DR est associé au plus grand changement de main-d'œuvre observé, que ce soit dans des situations de bonnes ou de moyennes pratiques d'hygiène (H0 à H4). L'optimisation multicritère, incluant la main-d'œuvre, est nécessaire pour essayer de représenter le comportement des éleveurs. Premièrement, les résultats montrent que DR pourrait entraîner de nombreuses heures de travail supplémentaires pour l'éleveur, sur la base d'un travail supplémentaire mensuel. Deuxièmement, l'inclusion des coûts des employés embauchés est peu pertinente puisqu'une seule heure supplémentaire par jour est requise. L'utilisation du gain marginal par heure permet de résoudre ce problème, et d'exprimer le coût d'opportunité du travail qui permet d'aider l'agriculteur pour l'allocation des ressources.

IV.3. Points d'amélioration

Dans la présente étude, la longévité des vaches laitières ne change pas beaucoup (entre 114 et 170 semaines soit une différence de 56 semaines) en raison d'une prévalence modérée de maladies. Conformément à cela, l'optimisation de la longévité dépend principalement du VWP. La longévité est reconnue comme un problème clé pour l'industrie laitière et la réduction de la longévité remet en question la durabilité du secteur du point de vue économique, sociétal et du bien-être. Inclure la longévité comme paramètre à améliorer dans l'optimisation économique semble approprié. En effet, d'autres situations sanitaires doivent être représentées pour mieux optimiser sur la longévité, il faudrait notamment une représentation moins simplifiée des boiteries car cela provoque des pertes économiques importantes et des interactions avec la reproduction et d'autres maladies.

Par ailleurs, la longévité dans le modèle est gérée essentiellement par la réforme ; en effet, lorsque l'hygiène est dégradée, les réformes sont plus importantes alors que les mortalités ne sont pas plus nombreuses.

- Simuler différentes stratégies de la réforme (les règles)

Le modèle montre que les résultats appliqués liés à DR25 sont en quelque sorte divergents par rapport aux autres DR. Cela est dû à la taille réduite du troupeau en lien avec les règles de réforme appliquées. Il est possible que les règles de réforme des éleveurs changent dans une telle situation, ou l'éleveur pourrait acheter des génisses supplémentaires. Étant donné que l'achat d'animaux peut induire un risque supplémentaire d'introduction de maladies, une telle possibilité n'était pas autorisée dans le travail présenté. En effet, il n'était pas possible d'ajuster cela dans le modèle, d'autant plus que ces pratiques sont peu employées dans de nombreuses exploitations actuellement.

Lorsque le taux de détection (DR) augmente, le taux de réussite moyen aux IA devrait augmenter alors qu'il diminue dans les simulations. En effet, le taux de réussite diminue lorsque l'éleveur détecte plus, et surtout pour les VWP faibles. Lorsque la détection est meilleure, les inséminations sont plus nombreuses (surtout lors de VWP courts) et donc l'insémination a le plus souvent lieu pendant la période à risque avec un risque d'échec plus important aux IA.

Les situations optimales mises en évidence dans la présente étude étaient associées à un intervalle vèlage-vèlage (IVV) d'environ 400 jours avec un taux de remplacement de 35%. Ceci peut être vu comme une situation technique associée à des performances économiques dans des exploitations dont la situation se rapproche des simulations actuelles. Cependant, pour les taux de réussite aux IA, les simulations devraient être affinées pour que cela soit plus réaliste.

V. Conclusion

Actuellement, la reproduction représente un enjeu économique important en élevage bovin laitier. En effet, la reproduction est directement en lien avec la production de lait, la longévité des vaches mais aussi la gestion sanitaire du troupeau. Il existe une forte interaction entre ces différents paramètres qui sont parfois antagonistes. Bien souvent, l'amélioration de la production laitière est accompagnée d'une détérioration des performances de reproduction et inversement. C'est pourquoi, la gestion de la reproduction nécessite un compromis entre plusieurs paramètres et contextes. La présente étude mobilise l'outil de travail DairyHealthSim[®] qui est un outil d'analyse bioéconomique. Pour résumer, DHS[®] a permis de mettre en avant les stratégies optimales de gestion de la reproduction selon les différents contextes. Les résultats montrent que la période d'attente volontaire (VWP) n'est pas un indicateur clé de performance car son coût marginal est faible. Par ailleurs, le taux de détection (DR) est un indicateur clé de performance dans la gestion du troupeau laitier car la marge brute est fortement dépendante de DR. En effet, améliorer son taux de détection à partir d'une situation DR25 permet un gain marginal moyen de 452 €/heure d'observation (DR35). Il est important de noter que les premiers efforts sur le temps d'observation des chaleurs sont les plus rentables. En effet, par la suite, le gain marginal moyen est plus faible. D'autre part, DR25 (situation où il n'y a pas de temps dédié à l'observation des chaleurs) est beaucoup plus sensible aux variations des axes de gestion de reproduction par rapport aux autres situations (DR35 à DR75). Pour finir, les modèles d'aide à la décision pour la stratégie de gestion de la reproduction devraient être basés sur un raisonnement non linéaire et proposer des réponses complexes et contextualisés.

VI. Bibliographie

FranceAgriMer, 2020. Données lait de vache : enquête mensuelle laitière. Marchés, études et prospective service analyse économique des filières OFPM unité élevage [en ligne]. 2020. Disponible à l'adresse : <https://visionet.franceagrimer.fr/Pages/Statistiques.aspx?menuurl=Statistiques/productions%20animales/lait%20et%20produits%20laitiers/enqu%C3%AAt%20mensuelle%20laiti%C3%A8re/lait%20de%20vache>

IDELE et CNE, 2019. Les chiffres clés du GEB bovin 2019 : Productions lait et viande. GEB – Institut de l'élevage [en ligne]. 2019. Disponible à l'adresse : <http://idele.fr/filieres/bovin-viande/publication/idelesolr/recommends/chiffres-cles-bovins-2019.html>

Albarrán-Portillo, B., Pollott†, G.E., 2013. The relationship between fertility and lactation characteristics in Holstein cows on United Kingdom commercial dairy farms. *Journal of Dairy Science* 96, 635-646. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5632>

Bekara, M.E.A., Bareille, N., 2019. Quantification by simulation of the effect of herd management practices and cow fertility on the reproductive and economic performance of Holstein dairy herds. *Journal of Dairy Science* 102, 9435–9457. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15484>

Bruijnis, M.R.N., Hogeveen, H., Stassen, E.N., 2010. Assessing economic consequences of foot disorders in dairy cattle using a dynamic stochastic simulation model. *Journal of Dairy Science* 93, 2419–2432. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2721>

Cabrera, V.E. « A large Markovian linear program to optimize replacement policies and dairy herd net income for diets and nitrogen excretion ». *Journal of Dairy Science* 93, n° 1 (2010): 394-406. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2352>.

Cha, E., A.R. Kristensen, J.A. Hertl, Y.H. Schukken, L.W. Tauer, F.L. Welcome, et Y.T. Gröhn. « Optimal insemination and replacement decisions to minimize the cost of pathogen-specific clinical mastitis in dairy cows ». *Journal of Dairy Science* 97, n° 4 (1 avril 2014): 2101-17. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7067>.

De Haas, Y., Barkema, H.W., Veerkamp, R.F., 2002. The Effect of Pathogen-Specific Clinical Mastitis on the Lactation Curve for Somatic Cell Count. *Journal of Dairy Science* 85, 1314–1323. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74196-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74196-9)

De Vries, Albert. « Improved accuracy of a model to optimize breeding and replacement decisions for dairy cattle ». In *Computers in Agriculture and Natural Resources, 23-25 July 2006, Orlando Florida*, 624. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006.

De Vries, A., 2006. Economic Value of Pregnancy in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science* 89, 3876–3885. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72430-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72430-4)

De Vries, A., 2004. Economics of Delayed Replacement When Cow Performance is Seasonal. *Journal of Dairy Science* 87, 2947–2958. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73426-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73426-8)

Dechow, C.D., et R.C. Goodling. « Mortality, Culling by Sixty Days in Milk, and Production Profiles in High- and Low-Survival Pennsylvania Herds ». *Journal of Dairy Science* 91, n° 12 (1 décembre 2008): 4630-39. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1337>.

Enting, H., D. Kooij, A. A. Dijkhuizen, R. B.M. Huirne, et E. N. Noordhuizen-Stassen. « Economic losses due to clinical lameness in dairy cattle ». *Livestock Production Science* 49, n° 3 (1997): 259-67. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(97\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(97)00051-1).

Ettema, Jehan Frans, et Søren Østergaard. « Economic decision making on prevention and control of clinical lameness in Danish dairy herds ». *Livestock Science* 102, n° 1-2 (2006): 92-106. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2005.11.021>.

Ettema, Jehan, Søren Østergaard, et Anders Ringgaard Kristensen. « Modelling the economic impact of three lameness causing diseases using herd and cow level evidence ». *Preventive Veterinary Medicine* 95, n° 1-2 (2010): 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2010.03.001>.

Ferchiou, Ahmed, Guillaume Lhermie, et Didier Raboisson. « New standards in bio-economic modelling applied to animal health: health management optimization for rational decision-making using the example of dairy production ». *Agricultural Systems* n/a, n° n/a (31 mars 2021).

Friggens, N.C., K.L. Ingvarstsen, et G.C. Emmans. « Prediction of Body Lipid Change in Pregnancy and Lactation ». *Journal of Dairy Science* 87, n° 4 (2004): 988-1000. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73244-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73244-0).

Giordano, J.O., A.S. Kalantari, P.M. Fricke, M.C. Wiltbank, et V.E. Cabrera. « A daily herd Markov-chain model to study the reproductive and economic impact of reproductive programs combining timed artificial insemination and estrus detection ». *Journal of Dairy Science* 95, n° 9 (2012): 5442-60. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4972>.

Groenendaal, H., D.T. Galligan, et H.A. Mulder. « An Economic Spreadsheet Model to Determine Optimal Breeding and Replacement Decisions for Dairy Cattle ». *Journal of Dairy Science* 87, n° 7 (2004): 2146-57. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)70034-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)70034-X).

Gröhn, Y. T., P. J. Rajala-Schultz, H. G. Allore, M. A. DeLorenzo, J. A. Hertl, et D. T. Galligan. « Optimizing replacement of dairy cows: Modeling the effects of diseases ». *Preventive Veterinary Medicine* 61, n° 1 (2003): 27-43. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(03\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(03)00158-2).

Gussmann, M., Kirkeby, C., Græsbøll, K., Farre, M., Halasa, T., 2018. A strain-, cow-, and herd-specific bio-economic simulation model of intramammary infections in dairy cattle herds. *Journal of Theoretical Biology* 449, 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.04.022>

Haas, Y. de, H.W. Barkema, et R.F. Veerkamp. « The Effect of Pathogen-Specific Clinical Mastitis on the Lactation Curve for Somatic Cell Count ». *Journal of Dairy Science* 85, n° 5 (2002): 1314-23. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74196-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74196-9).

Inchaisri, C., R. Jorritsma, P. L.A.M. Vos, G. C. van der Weijden, et H. Hogeveen. « Economic consequences of reproductive performance in dairy cattle ». *Theriogenology* 74, n° 5 (2010): 835-46. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2010.04.008>.

Inchaisri, C., R. Jorritsma, P.L.A.M. Vos, G.C. van der Weijden, et H. Hogeveen. « Analysis of the economically optimal voluntary waiting period for first insemination ». *Journal of Dairy Science* 94, n° 8 (2011): 3811-23. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3790>.

Kalantari, A.S., et V.E. Cabrera. « The effect of reproductive performance on the dairy cattle herd value assessed by integrating a daily dynamic programming model with a daily Markov chain model ». *Journal of Dairy Science* 95, n° 10 (2012): 6160-70. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5587>.

Korver, S. « Efficiency of Breeds for Milk and Beef Production », 1984. <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/78402>.

Kristensen, E., S. Østergaard, M.A. Krogh, et C. Enevoldsen. « Technical Indicators of Financial Performance in the Dairy Herd ». *Journal of Dairy Science* 91, n° 2 (2008): 620-31. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0201>.

Ma, J., Burgers, E.E.A., Lam, T., Kemp, B., van Knegsel, A.T.M., 2020. Consequences of extending the voluntary waiting period for insemination on ovarian cyclicity and reproductive performance in dairy cows, in: *Wias Annual Conference 2020*. pp. 69–69.

Mahnani, A., A. Sadeghi-Sefidmazgi, et V.E. Cabrera. « Consequences and economics of metritis in Iranian Holstein dairy farms ». *Journal of Dairy Science* 98, n° 9 (1 septembre 2015): 6048-57. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8862>.

Margerison, J., et N. Downey. « Guidelines for optimal dairy heifer rearing and herd performance ». *Calf and Heifer Rearing: Principles of Rearing the Modern Dairy Heifer from Calf to Calving*, Nottingham University Press, Nottingham, 2005, 307-38.

Meadows, C., P.J. Rajala-Schultz, et G.S. Frazer. « A Spreadsheet-Based Model Demonstrating the Nonuniform Economic Effects of Varying Reproductive Performance in Ohio Dairy Herds ». *Journal of Dairy Science* 88, n° 3 (2005): 1244-54. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72791-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72791-0).

Mohd Nor, N., W. Steeneveld, M.C.M. Mourits, et H. Hogeveen. « The optimal number of heifer calves to be reared as dairy replacements ». *Journal of Dairy Science* 98, n° 2 (2015): 861-71. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8329>.

Opsomer, G, M Coryn, et A de Kruif. « Measurement of Ovarian Cyclicity in the Post Partum Dairy Cow by Progesterone Analysis ». *Reproduction in Domestic Animals* 34, n° 3-4 (1 août 1999): 297-300. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.1999.tb01255.x>.

Østergaard, S., M.G.G. Chagunda, N.C. Friggens, T.W. Bennesgaard, et I.C. Klaas. « A Stochastic Model Simulating Pathogen-Specific Mastitis Control in a Dairy Herd ». *Journal of Dairy Science* 88, n° 12 (2005): 4243-57. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73111-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73111-8).

Ostergaard, S, et Y T Gröhn. « Effects of diseases on test day milk yield and body weight of dairy cows from Danish research herds. » *Journal of dairy science* 82, n° 6 (1999): 1188-1201. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75342-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75342-7).

Østergaard, S., J. T. Sørensen, et H. Houe. « A stochastic model simulating milk fever in a dairy herd ». *Preventive Veterinary Medicine* 58, n° 3-4 (2003): 125-43. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(03\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(03)00049-7).

Raboisson, D., M. Mounié, E. Khenifar, et E. Maigné. « The economic impact of subclinical ketosis at the farm level: Tackling the challenge of over-estimation due to multiple interactions ». *Preventive Veterinary Medicine* 122, n° 4 (2015): 417-25. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2015.07.010>.

Raboisson, D., M. Mounié, et E. Maigné. « Diseases, reproductive performance, and changes in milk production associated with subclinical ketosis in dairy cows: A meta-analysis and review ». *Journal of Dairy Science* 97, n° 12 (2014): 7547-63. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8237>.

Raboisson, Didier, et Maxime Barbier. « Economic Synergy between Dry Cow Diet Improvement and Monensin Bolus Use to Prevent Subclinical Ketosis: An Experimental Demonstration Based on Available Literature ». *Frontiers in Veterinary Science* 4, n° March (2017): 1-10. <https://doi.org/10.3389/fvets.2017.00035>.

Raboisson, Didier, Pauline Trillat, et Clélia Cahuzac. « Failure of Passive Immune Transfer in Calves: A Meta-Analysis on the Consequences and Assessment of the Economic Impact ». *PloS One* 11, n° 3 (17 mars 2016): e0150452-e0150452. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150452>.

Rio, O. *Fréquences et risques de mortalité et troubles de santé des veaux en élevage laitier*. Thèse Méd. Vét. (École nationale vétérinaire de Nantes: Nantes, 1999).

Rutten, C.J., W. Steeneveld, C. Inchaisri, et H. Hogeveen. « An ex ante analysis on the use of activity meters for automated estrus detection: To invest or not to invest? » *Journal of Dairy Science* 97, n° 11 (2014): 6869-87. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-7948>.

Rutten, C.J., W. Steeneveld, J.C.M. Vernooij, K. Huijps, M. Nielen, et H. Hogeveen. « A prognostic model to predict the success of artificial insemination in dairy cows based on readily available data ». *Journal of Dairy Science* 99, n° 8 (2016): 6764-79. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10935>.

Santos, J.E.P., S.O. Juchem, R.L.A. Cerri, K.N. Galvão, R.C. Chebel, W.W. Thatcher, C.S. Dei, et C.R. Bilby. « Effect of bST and Reproductive Management on Reproductive Performance of Holstein Dairy Cows ». *Journal of Dairy Science* 87, n° 4 (2004): 868-81. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73231-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73231-2).

Shahinfar, Saleh, Jerry N. Guenther, C. David Page, Afshin S. Kalantari, Victor E. Cabrera, Paul M. Fricke, et Kent A. Weigel. « Optimization of reproductive management programs using lift chart analysis and cost-sensitive evaluation of classification errors ». *Journal of Dairy Science* 98, n° 6 (1 juin 2015): 3717-28. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8255>.

Sørensen, Jan Tind, Erik Steen Kristensen, et Iver Thysen. « A stochastic model simulating the dairy herd on a PC ». *Agricultural Systems* 39, n° 2 (1 janvier 1992): 177-200. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(92\)90107-Y](https://doi.org/10.1016/0308-521X(92)90107-Y).

Sprecher, D.J., D.E. Hostetler, et J.B. Kaneene. « A lameness scoring system that uses posture and gait to predict dairy cattle reproductive performance ». *Theriogenology* 47, n° 6 (15 avril 1997): 1179-87. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(97\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(97)00098-8).

Van Arendonk, J. A. M. « A model to estimate the performance, revenues and costs of dairy cows under different production and price situations ». *Agricultural systems* 16, n° 3 (1985): 157-89.

Vries, A. De. « Economic Value of Pregnancy in Dairy Cattle ». *Journal of Dairy Science* 89, n° 10 (2006): 3876-85. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72430-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72430-4).

Vries, A. de. « Economics of Delayed Replacement When Cow Performance is Seasonal ». *Journal of Dairy Science* 87, n° 9 (2004): 2947-58. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73426-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73426-8).

Wathes, D. C., G. E. Pollott, K. F. Johnson, H. Richardson, et J. S. Cooke. « Heifer fertility and carry over consequences for life time production in dairy and beef cattle ». *Animal* 8, n° SUPPL. 1 (2014): 91-104. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000755>.

Wood, P. D. P. « Algebraic model of the lactation curve in cattle ». *Nature* 216, n° 5111 (1967): 164-65.

VII. Annexes

Annexe 1 : Paramètres d'entrée du modèle biologique

| Paramètres | Sources |
|---|---|
| Risques et effets des maladies | Enting et al., 1997 ; Østergaard et Gröhn, 1999 ; Gröhn et al., 2003 ; Østergaard, Sørensen, et Houe, 2003 ; Ettema et Østergaard, 2006 ; Raboisson, Mounié, et Maigné, 2014 ; Raboisson et al., 2015 ; Mahnani, Sadeghi-Sefidmazgi, et Cabrera, 2015 ; Raboisson et Barbier, 2017. |
| Risques et effets des mammites (Clinique et subclinique) | De Haas, Barkema, et Veerkamp, 2002 ; Gröhn et al., 2003 ; Østergaard, Sørensen, et Houe, 2005 ; Østergaard et al., 2005 ; Cha et al., 2014 ; Raboisson, Mounié, et Maigné, 2014. |
| Lactation | Wood, 1967 ; Meadows, Rajala-Schultz, et Frazer, 2005 ; Rutten et al., 2016. |
| Poids et besoin alimentaire | Van Arendonk, 1985 ; Friggens, Ingvarstsen, et Emmans, 2004 ; Giordano et al., 2012. |
| Reproduction et croissance des génisses | Gröhn et al., 2003 ; Groenendaal, Galligan, et Mulder, 2004 ; De Vries, 2006 ; Inchaisri et al., 2010 ; Wathes et al., 2014 ; Mahnani, Sadeghi-Sefidmazgi, et Cabrera, 2015 ; Mohd Nor et al., 2015. |
| Paramètres de reproduction | Opsomer, Coryn, et de Kruif, 1999 ; Østergaard, Sørensen, et Houe, 2003 ; Østergaard et al., 2005 ; De Vries, 2004 ; Groenendaal, Galligan, et Mulder, 2004 ; Santos et al., 2004 ; Meadows, Rajala-Schultz, et Frazer, 2005 ; De Vries, 2006 ; Kristensen et al., 2008 ; Cabrera, 2010 ; Ettema, Østergaard, et Kristensen, 2010 ; Inchaisri et al., 2010 ; Inchaisri et al., 2011 ; Giordano et al., 2012 ; Kalantari et Cabrera, 2012 ; Raboisson, Mounié, et Maigné, 2014 ; Rutten et al., 2014 ; Rutten et al., 2016 ; Wathes et al., 2014 ; Mahnani, Sadeghi-Sefidmazgi, et Cabrera, 2015 ; Mohd Nor et al., 2015 ; Shahinfar et al., 2015. |
| Règles de réforme | Sørensen, Kristensen, et Thysen, 1992 ; Østergaard et al., 2005 ; Dechow et Goodling, 2008 ; Kristensen et al., 2008 ; Cha et al., 2014 ; Rutten et al., 2014 ; Mahnani, Sadeghi-Sefidmazgi, et Cabrera, 2015 ; Mohd Nor et al., 2015. |

Annexe 2 : Paramètres de calibrage des fonctions de production

| Label | Unité | Valeur | Reference |
|-------------------|----------|--|---|
| BW_{Birth} | kg | 44 | Authors |
| ADG | kg | < 6 mois d'âge : 0.65 Jusqu'au premier vêlage : 0.75 | Authors |
| t_{pc} | - | $P_t - 50 > 0 : P_t - 50$ $P_t - 50 \geq 0 : 0$ | Van Arendonk, 1985. |
| k | - | 0.0028 | Korver, 1984. |
| p_1 | kg | 50 | Van Arendonk, 1985. |
| p_2 | jours | 75 | Van Arendonk, 1985. |
| p_2 | - | 0.0187 | Van Arendonk, 1985. |
| BW_{MAT} | kg | U(650, 725) | Authors |
| $Carc_{Cull}$ | % | 55 | Authors |
| $DMI_{dry-off}$ | kg | 13 ± 0.33 | Authors |
| $a (L1, L2, L3+)$ | | 7.418 ; 11.274 ; 10.478 | Meadows, Rajala-Schultz, et Frazer, 2005. |
| $b (L1, L2, L3+)$ | | 0.429 ; 0.411 ; 0.447 | Meadows, Rajala-Schultz, et Frazer, 2005. |
| $c (L1, L2, L3+)$ | | 0.00525 ; 0.00666 ; 0.00725 | Meadows, Rajala-Schultz, et Frazer, 2005. |
| DRY_{Length} | | 7 | Authors |
| $PREG_{Length}$ | | 40 ± 0.86 | De Vries, 2006. |
| P_{heat} | % | 1 ^{ère} ovulation: 10 2 ^{nde} ovulation: 50 > 3 ^{ème} ovulation : 70 | Inchaisri et al., 2011. |
| P_{detect} | % | 63 | Wathes et al., 2014. |
| P_{insem} | % | 65 | Wathes et al, 2014. |
| P_{abort}^{**} | % | 3.5; 2.5; 1.5; 0.5; 0.25; 0.1; 0.1 | Santos et al., 2004. |
| P_{cycle}^{***} | % | PP ^a : 0; 10; 10; 10; 50; 50; 50; 100 MP ^a : 0; 10; 50; 50; 50; 100; 100; 100 | Authors |
| Stillbirth | % | 5 | Authors |
| $HeifAgePub$ | semaines | U(32, 58) | Wathes et al., 2014. |

| | | | |
|--------------------|--------------------|-----------|-----------------------------|
| <i>HeifWeiPub</i> | kg | 274 | Wathes et al, 2014. |
| <i>HeifAgeElig</i> | semaines | 59 | Wathes et al, 2014. |
| <i>HeifWeiElig</i> | %BW _{MAT} | U(55, 65) | Margerison et Downey, 2005. |
| <i>GenderRatio</i> | % | 50% | Authors |

^a : PM : primipares ; MP : multipares

Annexe 3 : Table de calcul des besoins alimentaires en UFL, protéines brutes et fibres

| Prod. laitière quotidienne (kg/day) | Besoins alimentaires | | |
|-------------------------------------|----------------------|--|-------------------------------------|
| | UFL (/kg DMI) | Protéines Brutes (% DMI ^a) | Fibres Brutes (% DMI ^a) |
| 0 (dry-off) | 0,8-0,85 | 10 to 12 | 22-24 |
| <20 | 0,85-0,90 | 13-14 | 20-22 |
| 20-25 | 0,90-0,93 | 14-15 | 19-21 |
| 25-30 | 0,93-0,97 | 15-16 | 18-20 |
| 30-35 | 0,95-1 | 16-16,5 | 17-19 |
| >35 | 0,98-1 | 16,5-17 | 16-18 |

^a : DMI : apport en matière sèche

References : <https://www.quae.com/produit/1523/9782759228683/alimentation-des-ruminants>

Annexe 4 : Comptage des cellules somatiques après une infection de mammite clinique par agent pathogène

| | Impact on SCC x 10 ³ | | | | Daily slope after |
|------------------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|-------------------|
| | WkOcc1 | WkOcc2 | WkOcc3 | WkOcc4 | |
| <i>Staphylococcus aureus</i> | 1644 | 344 | 231 | 118 | -559 |
| <i>Streptococcus spp.</i> | 1774 | 374 | 264 | 154 | -1100 |
| <i>Escherichia coli</i> | 1666 | 416 | 287 | 158 | -559 |
| <i>Klebsiella spp.</i> | 1666 | 416 | 287 | 158 | -559 |
| Negative cultures | 1440 | 493 | 363 | 233 | -1317 |
| Other cultures | 1660 | 474 | 370 | 266 | -999 |

Source: Østergaard et al., 2005 ; Cha et al., 2014.

| | Traitement dans les temps | | | Traitement retardé | | | Pas de traitement | | |
|------------------------------|---------------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|
| | 1 st Inf. | Recid. | Relap. | 1 st Inf. | Recid. | Relap. | 1 st Inf. | Recid. | Relap. |
| <i>Staphylococcus aureus</i> | 50% | 50% | 100% | 20% | 20% | 0%* | 30% | 30% | 0%* |
| <i>Streptococcus spp.</i> | 50% | 50% | 100% | 20% | 20% | 0%* | 30% | 30% | 0%* |
| <i>Klebsiella spp.</i> | 90% | 90% | 0% | 0% | 0% | 90% | 10% | 10% | 10% |
| <i>Escherichia coli</i> | 90% | 90% | 0% | 0% | 0% | 90% | 10% | 10% | 10% |
| Cultures Négatives | 50% | 50% | 100% | 20% | 20% | 0%* | 30% | 30% | 0%* |
| Autres cultures | 50% | 50% | 100% | 20% | 20% | 0%* | 30% | 30% | 0%* |

1st Inf : première infection de mammite clinique durant la lactation; Recid. : Récidive, nouvelle infection 21 jours avant la première infection; Relap. : rechute, nouvelle infection 21 jours après la première infection

(*) Toutes les vaches sont traitées dans les temps si elles ne sont pas réformées.

Annexe 5 : Calibration des paramètres pour la simulation des maladies des veaux

| | Incidence | | | Intervention | |
|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------|---------|
| | Semaine d'âge d'application | Risque d'incidence pour la période | Reference | Vet. | Eleveur |
| Echec de transfert d'immunité | 0 (naissance) | N(0.1, 0.005) | Raboisson, Trillat, et Cahuzac, 2016. | 0% | 0% |
| Diarrhée | 1 à 4 | N(0.227, 0.127) | Raboisson, Trillat, et Cahuzac 2016. | 10% | 90% |
| Maladies respiratoires | 1 à 26 | N(0.114, 0.015) | Rio, 1999. | 10% | 90% |
| Omphalite | 1 à 3 | N(0.05, 0) | Raboisson, Trillat, et Cahuzac, 2016. | 0% | 100% |
| Septicémie | 1 à 4 | N(0.03, 0) | Raboisson, Trillat, et Cahuzac, 2016. | 75% | 25% |

Annexe 6 : Calendrier des maladies des vaches, calibrage du risque de maladies croisées et de traitement

| | | Dystocie | Fièvre de lait | Rétention placentaire | Métrite puerpérale | Endométrite purulente | Endométrite subclinique | Déplacement de caillette | Cétose clinique et subclinique | Boiterie | Mammite |
|---|----|----------|----------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------|---------|
| Semaine d'application | | | | | | | | | | | |
| Semaine de lactation | 0 | | | | | | | | | | |
| | 1 | | | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | | | |
| | 4 | | | | | | | | | | |
| | 5 | | | | | | | | | | |
| | 6 | | | | | | | | | | |
| | 7 | | | | | | | | | | |
| | 8 | | | | | | | | | | |
| | >8 | | | | | | | | | | |
| Calibrage du risque de maladies croisées (colonne et ligne) | | | | | | | | | | | |
| Dystocie | | | | | | | | | | | |
| Hypocalcémie | | | | | | | | | | | |
| Rétention placentaire | | | | | | | | | | | |
| Métrite | | | | | | | | | | | |
| Endométrite purulente | | | | | | | | | | | |
| Endométrite subclinique | | | | | | | | | | | |
| Déplacement de caillette | | | | | | | | | | | |
| Cétose clinique et subclinique | | | | | | | | | | | |
| Boiterie | | | | | | | | | | | |
| Mammite | | | | | | | | | | | |
| Traitement | | | | | | | | | | | |
| Intervention du vétérinaire | | 0% | 50% | 25% | 85% | 25% | 0% | 85% | 50% | 0% | 0% |
| Intervention de l'éleveur | | 0% | 50% | 75% | 15% | 75% | 100% | 15% | 50% | 100% | 100% |

Annexe 7 : Caractéristiques des traitements utilisés dans DHS

| Nom commercial | Molécule | Nature | Voie | NA | Durée (jour) | Temps d'attente lait (jour) | Temps d'attente viande (jour) |
|------------------|--|--------|------|----|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Duphamox_LA | Amoxicilline | AM | SC | 1 | 3 | 2.5 | 21 |
| Dexadreson | Dexamethasone | AIS | IM | 1 | 1 | 3 | 8 |
| Nuflor | Florfenicol | AM | SC | 1 | 1 | 0 | 37 |
| Draxxin100 | Tulathromycin | AM | SC | 1 | 1 | 0 | 22 |
| Tolfine | Tolfenamic acid | AINS | IM | 1 | 2 | 0 | 12 |
| Shotapen | Benzylpenicillin | AM | IM | 2 | 4 | 5 | 64 |
| Potencil | Amoxicilline | AM | IM | 2 | 3 | 0 | 10 |
| Amphoprim | Sulfadimidine, trimethoprim | AM | IM | 2 | 3 | 2 | 5 |
| StopM | Penethamate | AM | IM | 1 | 3 | 4 | 14 |
| Colibolus | Colistine | AM | OR | 1 | 3 | 0 | 5 |
| Estrumate | Cloprostenol | H | IM | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Bioveine_GMC | Acetylmethionine, choline, Glucose | ME | IV | 2 | 1 | 0 | 0 |
| Bioveine_Calcium | Calcium, Magnesium | ME | IV | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Speciale2411 | Sodium bicarbonate, Glucose, Saccharose | ME | IV | 3 | 1 | 0 | 0 |
| Rehydion | Sodium, Potassium, Glucose | REH | OR | 3 | 2 | 0 | 0 |
| Metricure | Cefapirin | AM | IVG | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Lincocine | Lincomycin | AM | IMA | 1 | 1.5 | 3.5 | 3 |
| Mastijet | Neomycin | AM | IMA | 3 | 2 | 4 | 30 |
| Ubrolexin | Cefalexin | AM | IMA | 2 | 2 | 5 | 10 |
| Mastipeni | Benzylpenicillin | AM | IMA | 2 | 2 | 6.5 | 7 |
| Masticoli | Cloxacillin | AM | IMA | 2 | 2 | 4 | 0 |
| Synulox | Amoxicillin | AM | IMA | 2 | 1.5 | 4 | 7 |
| ClamoxyI_Oblets | Amoxicillin | AM | IU | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Calform_Bolus | Magnesium | ME | OR | 0 | 1 | | |
| Cepravin | Cefalonium | AM | IMA | 1 | 1 | 6 | 21 |
| Orbeseal | Teat sealant | | IMA | 0 | 1 | 0 | 0 |

Les médicaments sont supposés utilisés à dose normal. NA : nombre d'applications par animal, MiWT temps d'attente lait et MeWT : temps d'attente viande. Abréviations des voies d'administration des traitements, IM : intramusculaire, IMA : intramammaire, OR : oral, IU : intrautérine, IVG : intravaginal, IV : intraveineux, SC : sous-cutanée. Abréviations pour la nature des traitements, AM : Antibiotiques, AIS : Anti-inflammatoire stéroïdien, AINS : Anti-inflammatoire non stéroïdien, H : Hormones, ME : Perfusion pour troubles métaboliques, REH: Réhydratant.

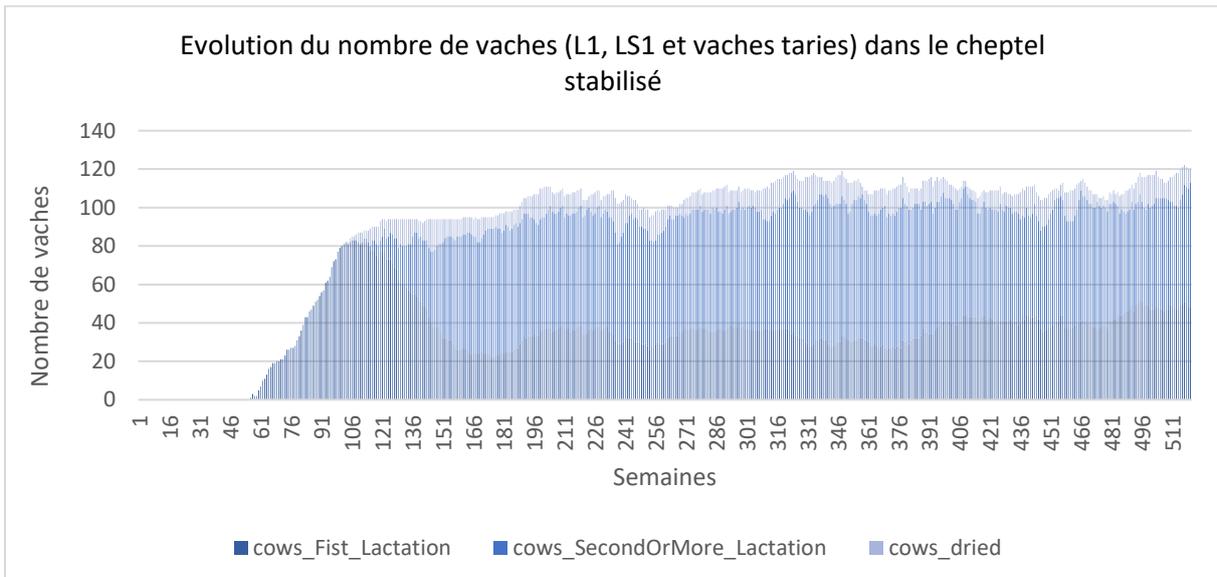
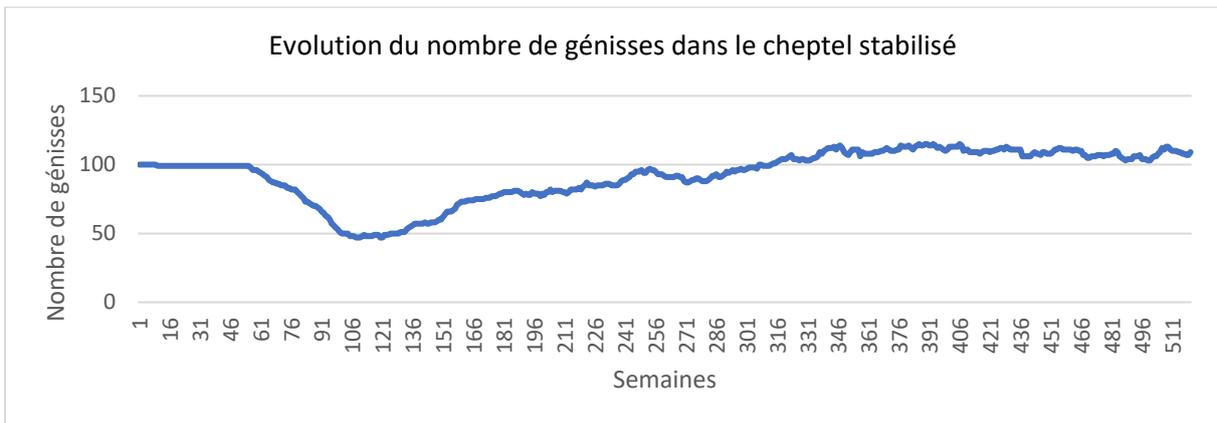
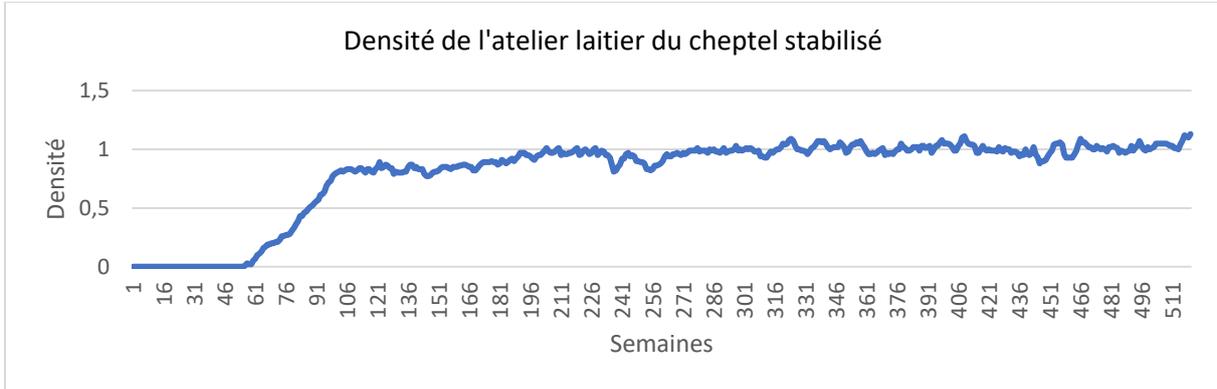
Annexe 8 : Calibration des décisions de réformes

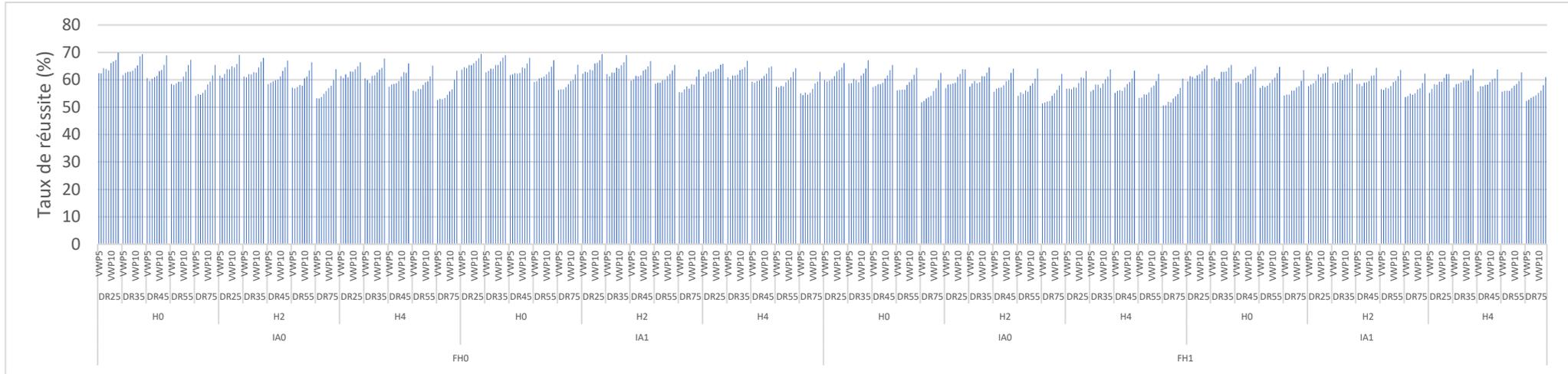
| | Définition | Unité | Valeur |
|---|---|-----------------------------------|--------|
| Calibration des règles de pré-réformes | | | |
| DOCullL1 | Days open to apply pre-culling option for first lactation cows | jours | 180 |
| DOCullLs1 | Days open to apply pre-culling option for second or more lactation cows | jours | 160 |
| Numlact_precull | Cow parity threshold to be preculled (out of any other criteria) | - | 6 |
| NbAI_precull_Simp | Number of failed AI to be eligible for preculling | - | 5 |
| NbAI_precull_Comp | Number of AI to be eligible for preculling if milk production accounted for (DMYPrecull) | - | 4 |
| DMY_Precull | Daily milk yield threshold for preculling (when considered) | kg | 25 |
| Calibration des règles de réformes | | | |
| DMY_Cull | threshold may also be 3 or 5 % less producing cows the given week | kg | 15 |
| PregDur_Cull | Pregnancy duration threshold for culling | semaines | 26 |
| LameCow_Cull_Comp | Locomotion score to be eligible for culling if lame prevalence accounted for (LameHerd_Cull) | score | [3–4[|
| LameCow_Cull_Simp | Locomotion score to be eligible for culling | score | 4 |
| LameHerd_Cull | Percentage of cows with locomotion score > 3 | % | 15% |
| CMCow_Cull_Simp | Number of clinical mastitis during the current lactation to be eligible for culling | - | 4 |
| CMCow_Cull_Comp | Number of clinical mastitis during the current lactation to be eligible for culling if herd CM prevalence accounted for (CMHerdCull) | - | [2–4[|
| CMHerd_Cull | Percentage of cows with at least one CM last year | % | 25 |
| SCCCow_Cull_Simp | Average monthly SCC for the current lactation | | 900 |
| SCCCowCull_Comp1 | Last month average SCC for the current lactation if tank SCC accounted for (SCCBulkCullH) - High | 10 ³ cellule /ml | 250 |
| SCCCowCull_Comp2 | Last month average SCC for the current lactation if tank SCC accounted for (SCCBulkCullL) -Low | | 350 |
| SCCBulk_CullH | Bulk milk SCC of the week | 10 ³ cellule /ml | 300 |
| SCCBulk_CullL | Bulk milk SCC of the week | | 350 |

Annexe 9 : Présentation du cheptel stabilisé

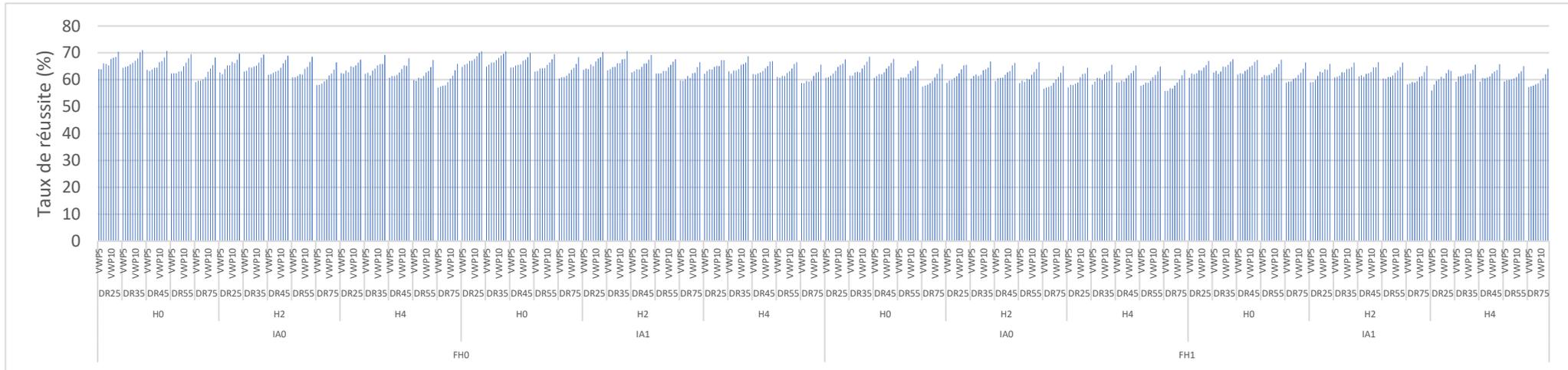
Sorties de troupeaux pour le cheptel stabilisé

| | Vaches réformées | Génisses réformées | Mortalité vaches | Mortalité génisses | Vente génisses gestantes |
|-------------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Nombre total sur 10 ans | 183 | 1 | 64 | 31 | 24 |
| Moyenne annuelle | 18,3 | 0,1 | 6,4 | 3,1 | 2,4 |
| Ecart-type | 15,69 | 0,32 | 3,98 | 2,08 | 3,72 |

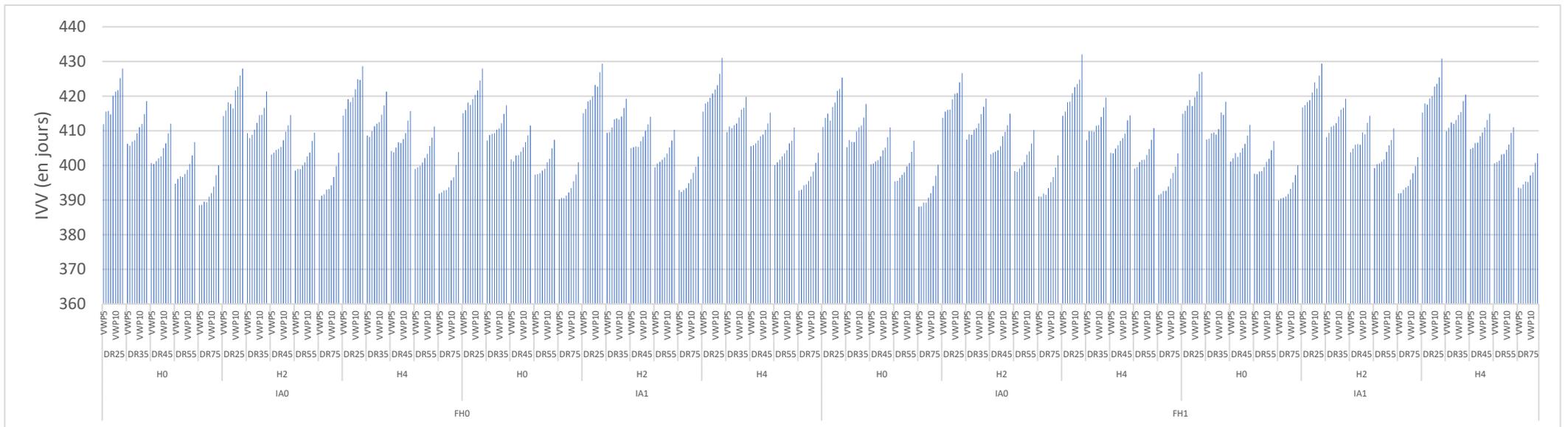




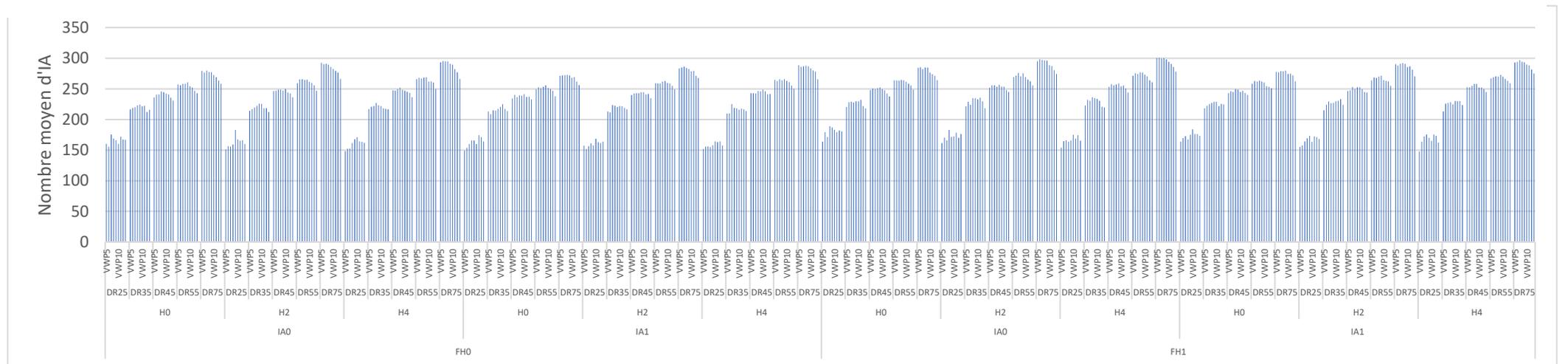
Annexe 11 : Taux de réussite moyen en première insémination en fonction des 540 scénarios



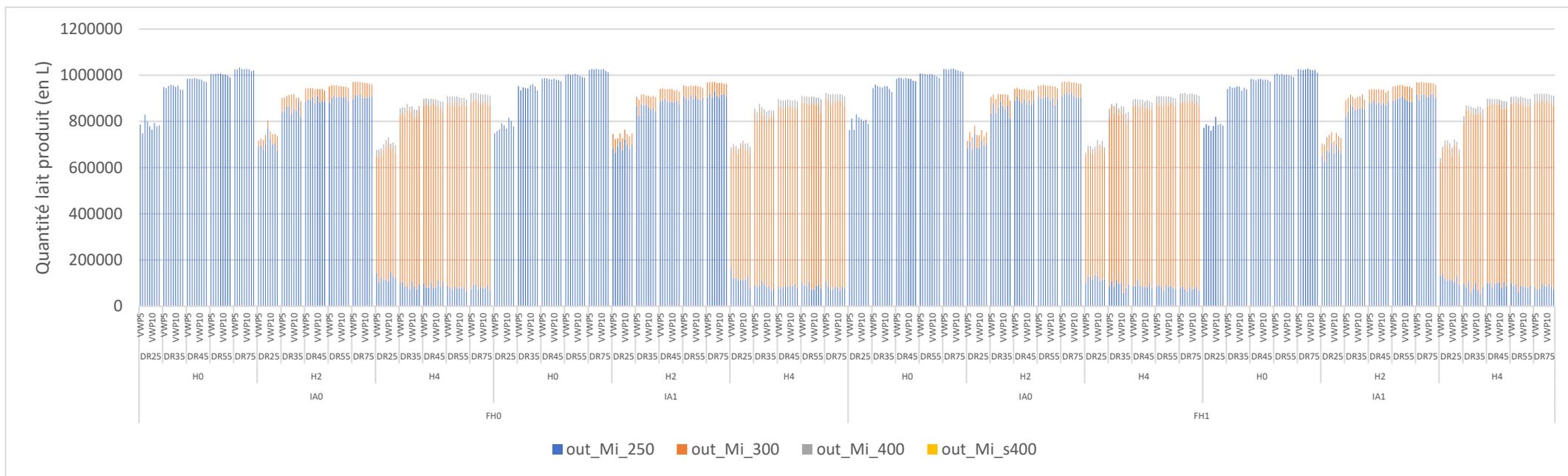
Annexe 10 : Taux de réussite moyen aux inséminations en fonction des 540 scénarios



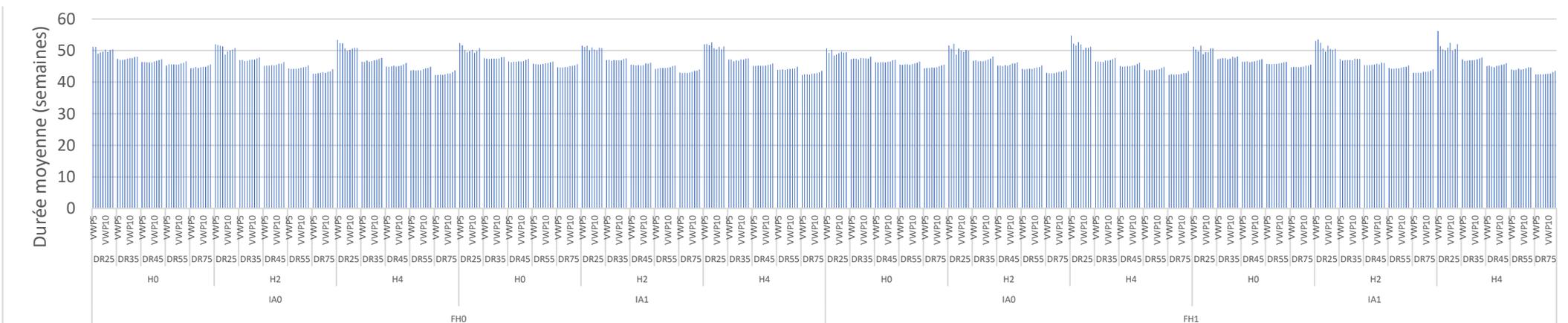
Annexe 13 : Intervalle vêlage-vêlage moyen en fonction des 540 scénarios



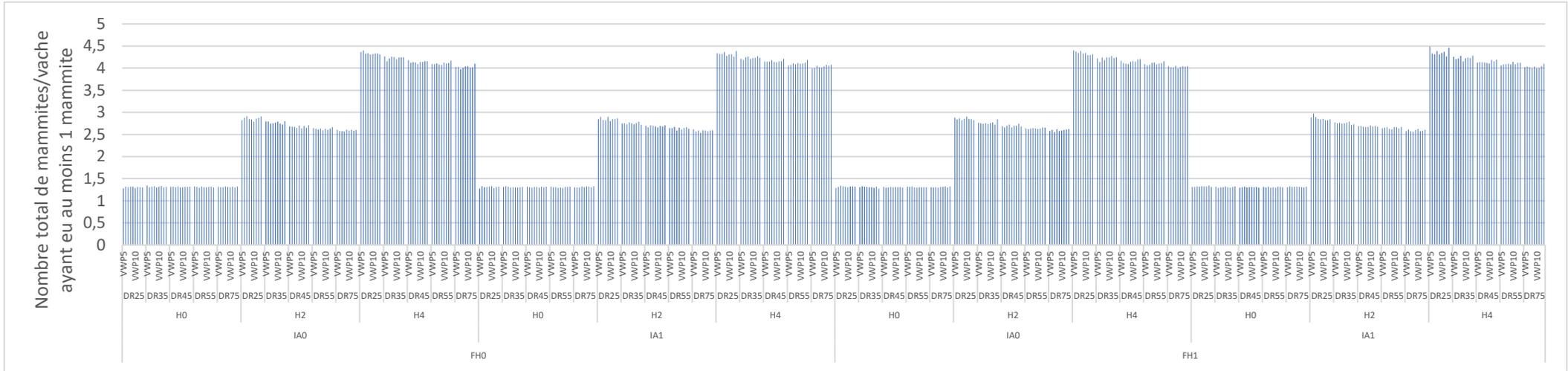
Annexe 12 : Nombre moyen d'IA réalisées par en fonction des 540 scénarios



Annexe 15 : Production laitière moyenne en fonction des 540 scénarios



Annexe 14 : Durée moyenne de lactation en fonction des 540 scénarios



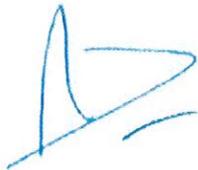
Annexe 16 : Prévalence des mammites en fonction des 540 scénarios

AGREMENT SCIENTIFIQUE

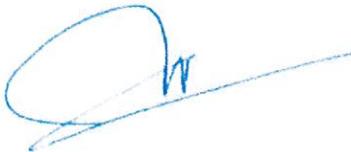
En vue de l'obtention du permis d'imprimer de la thèse de doctorat vétérinaire

Je soussigné, Didier RABOISSON, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de TASSAIN Manon intitulée « Approche bioéconomique d'optimisation de la gestion de la reproduction dans les populations de bovins laitiers » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.

Fait à Toulouse, le 07/12/2020
Enseignant-chercheur de l'Ecole Nationale
Vétérinaire de Toulouse
Professeur Didier RABOISSON



Vu :
Le Président du jury
Professeur Laurent MOLINIER



Vu :
Le Directeur de l'Ecole Nationale
Vétérinaire de Toulouse
M. Pierre SANS




Vu et autorisation de l'impression :
Le Président de l'Université Paul Sabatier
M. Jean-Marc BROTO



Le Président de l'Université Paul Sabatier,
par délégation,
La Vice-Présidente de la CFVU

Fabienne ALARY

Mme TASSAIN Manon
a été admis(e) sur concours en : 2015
a obtenu son diplôme d'études fondamentales vétérinaires le: 09/07/2019
a validé son année d'approfondissement le: 24/09/2020
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.



NOM : TASSAIN **PRENOM :** MANON

TITRE : APPROCHE BIOECONOMIQUE D'OPTIMISATION DE LA GESTION DE LA REPRODUCTION DANS LES POPULATIONS DE BOVINS LAITIERS

RÉSUMÉ : Les décisions de gestion de la reproduction sont complexes et centrales dans les systèmes de production laitière. Évaluer les décisions optimales est difficile en raison des multiples critères à prendre en compte. En effet, la reproduction est directement liée à la prévalence des maladies, à la production laitière et à la longévité des vaches. C'est pourquoi un compromis entre les objectifs et la considération multicritère est proposé. Pour déterminer les coûts et avantages marginaux des stratégies de gestion de la reproduction et de la stratégie optimale maximisant les revenus des agriculteurs sous contrainte de main-d'œuvre, un modèle d'optimisation bioéconomique innovant (DairyHealthSim®) est utilisé. Le modèle de simulation de la partie biologique est basé sur la chaîne Markof sur une durée de 10 ans sur une base vache-semaine qui prend en compte toutes les maladies et les résultats de la production et leurs interactions. L'évaluation économique d'optimisation est basée sur le coût d'opportunité d'une gestion non optimale et le coût marginal de la charge de travail supplémentaire des agriculteurs grâce à une représentation holistique de la dynamique du troupeau et une représentation ouverte des producteurs de la chaîne de valeur.

Les résultats montrent que lorsque l'éleveur est progressivement contraint sur sa charge de travail liée à la reproduction, des solutions optimales suggèrent un changement de stratégie pour le taux de détection. Lorsqu'une contrainte plus élevée sur la longévité est appliquée, les résultats optimaux suggèrent un changement dans la stratégie de période d'attente volontaire uniquement pour un niveau élevé de contraintes sur la main-d'œuvre. La marge brute annuelle moyenne de l'agriculteur est très sensible à DR et peu à VWP. Le gain marginal moyen par heure supplémentaire consacrée à la détection des chaleurs varie de 166 € à 450 €.

MOTS CLEFS : BOVIN LAIT, MODELE BIOECONOMIQUE, REPRODUCTION, PRODUCTION LAITIÈRE

TITLE : OPTIMIZING REPRODUCTION MANAGEMENT STRATEGY IN DAIRY PRODUCTION : INSIGHTS FROM BIOECONOMIC MODELING

SUMMARY : Reproduction management decisions are complex and central in milk production systems. Assessing the optimal decisions is difficult due to multiple criteria to be accounted for. Reproduction is an example of complex entity for decision making since it is linked to diseases prevalence, milk production and cows' longevity. This call for trade-off between objectives and multicriteria consideration. To determine the marginal costs and benefits of reproduction management strategies and optimal strategy maximizing farmer's revenue under labour constraint, an innovative bioeconomic optimisation model (DairyHealthSim™) is used. The biologic part is based on a 10 year cow-week based Markof-chain based simulation model that consider all diseases and production outcomes and their interactions. The optimisation economic evaluation is based on the opportunity cost of a non-optimal management and the marginal cost of additional farmer's workload thanks to a holistic representation of a herd's dynamics and an open representation of value chain's producers.

Results show that when the breeder is gradually constrained on his reproduction related workload, optimal solutions suggest a change in strategy for the detection rate. When higher constrained on longevity is applied, optimum results suggest a change in the voluntary waiting period strategy only for high level of constraints on labour. Farmer's medium annual gross margin is highly sensitive to DR and not to VWP. The average marginal gain per additional hour devoted to oestrus detection range from €166 to €450.

KEYWORDS: DAIRY COW, BIOECONOMIC MODELING, REPRODUCTION, MILK PRODUCTION