

OPTIMISATION BIOECONOMIQUE DE LA GESTION DE LA REPRODUCTION ET DES BOITERIES EN ELEVAGES 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

BENOIST Adrien
Né 09/07/1994 à NEVERS (58)

Directeur de thèse : M. Didier RABOISSON

JURY

PRESIDENT

M. Laurent MOLINIER

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSEESSEURES :

M. Didier RABOISSON

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Mme Sylvie CHASTANT-MAILLARD

Professeure à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

MEMBRES INVITES :

M. Ahmed FERCHIOU

Chargé d'enseignement contractuel à l'Ecole vétérinaire de TOULOUSE

M. Nicolas HERMAN

Vétérinaire praticien à Riom-Es-Montagne

**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*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des aliments d'Origine animale*
- 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*
- Mme **HAGEN-PICARD, Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **PETIT Claude**, (Emérite) - *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **SCHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie Médicale Animale et Comparée*

PROFESSEURS 1° CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des aliments*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie Vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootéchnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*

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 **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 CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

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

MAITRES DE CONFERENCES 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 **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
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*
M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire – Maladies animales réglementées*
Mme **WASET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

CHARGES D'ENSEIGNEMENT CONTRACTUELS

M. **FERCHIOU Ahmed**, *Economie, production animale*,
M. **LEYNAUD Vincent**, *Médecine interne*
Mme **ROBIN Marie-Claire**, *Ophthalmologie*
Mme **SOUVESTRE Marie**, *Production et pathologie aviaire*
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 Sylvie CHASTANT-MAILLARD

Professeur à l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse

Pathologie de la reproduction

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 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.

A Monsieur le Docteur Nicolas HERMAN

Praticien à Riom-Es-Montagne

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

Sincères remerciements.

Table des matières

I. Introduction	15
I.1. Relation boiteries et performances de reproduction et de production	15
I.2. Situation contextualisée et stratégies des pratiques d'élevage.....	16
I.3. Objectifs de l'étude	16
II. Matériels et méthodes.....	18
II.1. Description du modèle biologique	18
II.1.a. Description de DairyHealthSim©	18
II.1.a.1. Fonctions de production	19
II.1.a.2. Maladies	22
II.1.a.3. Traitements	23
II.1.a.4. Dynamique du troupeau et sortie des vaches.....	24
II.1.b. Stabilisation du cheptel	24
II.2. Modélisation économique	25
II.2.a. Simulation de la problématique d'optimisation sous contraintes	26
II.2.b. Analyse économique des résultats.....	28
II.3. Application à la gestion de la reproduction en élevage bovin laitier	30
II.3.a. Description des scénarios de gestion de la reproduction	30
II.3.b. Calibration du modèle	31
II.3.b.1. Elaboration de DHS.....	31
II.3.b.2. Calibration des scénarios.....	31
II.3.c. Simulations	32
III. Résultats.....	34
III.1. Description des résultats biologiques	34
III.1.a. Taux de détection des chaleurs (DR).....	34
III.1.b. Score de boiterie (LS).....	39
III.1.c. Hygiène (H)	44
III.1.d. Période d'attente volontaire (VWP).....	48
III.1.e. Stratégies de réforme (PC)	49
III.1.f. Production laitière et vente de génisses	54
III.2. Analyse économique	56
III.2.a. Scénarios optimaux en fonction des contraintes	56
III.2.b. Analyse des revenus	57
III.2.b.1. Sur les 1 440 scénarios simulés	57
III.2.b.2. Sur les 24 scénarios optimaux déterminés.....	64

III.2.c. Gain différentiel du temps d'observation en reproduction en fonction des scénarios de boiteries	65
IV. Discussion.....	67
IV.1. Une modélisation innovante : intérêts limites de cet outil de simulation utilisé	67
IV.2. Taux de détection des chaleurs (DR) : un indicateur clé de performance de reproduction .	68
IV.3. Quelle gestion de la réforme en élevage ?.....	68
IV.3.a. Seuil de production laitière minimale lors de réforme	68
IV.3.b. Stratégies de gestion de l'élevage : taille du troupeau, bien-être animal et performance économique.....	69
V. Conclusion	70
VI. Bibliographie	71
VII. Annexes.....	75

Table des figures

<i>Figure 1 : Description de l'approche générale</i>	18
<i>Figure 2 : Présentation du modèle biologique DairyHealthSim©</i>	19
<i>Figure 3 : Présentation de la simulation de la reproduction</i>	21
<i>Figure 4 : Classification des scénarios pour l'analyse des résultats biologiques</i>	33
<i>Figure 5 : Nombre moyen d'inséminations réalisées annuellement en fonction du taux de détection</i> 34	
<i>Figure 6 : Occupation de l'atelier laitier en fonction du taux de détection</i>	34
<i>Figure 7 : Nombre de vaches réformées et sa répartition en fonction des critères de choix de réformes en fonction du taux de détection</i>	35
<i>Figure 8 : Nombre de génisses vendues par an en fonction du taux de détection</i>	35
<i>Figure 9 : Taux de renouvellement en fonction du taux de détection</i>	36
<i>Figure 10 : Production laitière moyenne annuelle classée en fonction des comptages cellulaires somatiques (CCS) et en fonction du taux de détection</i>	36
<i>Figure 11 : Intervalle vêlage-vêlage moyen en fonction du taux de détection</i>	37
<i>Figure 12 : Durée moyenne de lactation en fonction du taux de détection</i>	37
<i>Figure 13 : Longévité moyenne dans l'élevage en fonction du taux de détection</i>	38
<i>Figure 14 : Age moyen au premier vêlage en fonction du taux de détection</i>	38
<i>Figure 15 : Prévalence moyenne des boiteries en fonction des scénarios de boiteries</i>	39
<i>Figure 16 : Production laitière moyenne annuelle en fonction des CCS et en fonction des scénarios de boiteries</i>	39
<i>Figure 17 : Nombre de vaches réformées et sa répartition en fonction du critère de réforme et en fonction des scénarios de boiteries</i>	40
<i>Figure 18 : Nombre moyen de génisses vendues annuellement en fonction des scénarios de boiteries</i>	40
<i>Figure 19 : Prévalences moyennes des paramètres de reproduction liés à la cyclicité ovarienne en fonction des scénarios de boiteries</i>	41
<i>Figure 20 : Intervalle vêlage-vêlage moyen en fonction des scénarios de boiteries</i>	41
<i>Figure 21 : Intervalle vêlage-vêlage en fonction de la prévalence des boiteries</i>	42
<i>Figure 22 : Occupation de l'atelier laitier par des vaches en lactation en fonction des scénarios de boiteries</i>	42
<i>Figure 23 : Prévalence des boiteries en fonction de l'occupation de l'atelier laitier par des vaches en lactation</i>	43
<i>Figure 24 : Taux de renouvellement moyen en fonction des scénarios de boiteries</i>	43
<i>Figure 25 : Prévalence des boiteries en fonction du taux de renouvellement</i>	44
<i>Figure 26 : Taux de renouvellement moyen en fonction des scénarios d'hygiène</i>	44
<i>Figure 27 : Production laitière moyenne annuelle en fonction des CCS et des scénarios d'hygiène</i> ...	45
<i>Figure 28 : Prévalence moyenne des mammites cliniques en fonction des scénarios d'hygiène</i>	45
<i>Figure 29 : Incidence des mammites cliniques en fonction des scénarios d'hygiène</i>	46
<i>Figure 30 : Nombre moyen de mammites cliniques par vache en lactation et par lactation en fonction des scénarios d'hygiène</i>	46
<i>Figure 31 : Nombre moyen de génisses vendues par an en fonction des scénarios d'hygiène</i>	47
<i>Figure 32 : Nombre moyen annuel de vaches réformées et sa répartition en fonction du critère de réforme et des scénarios d'hygiène</i>	47
<i>Figure 33 : Taux de réussite des inséminations en fonction de la période d'attente volontaire</i>	48
<i>Figure 34 : Intervalle vêlage-vêlage moyen en fonction de la période d'attente volontaire</i>	48
<i>Figure 35 : Intervalle vêlage-vêlage moyen en fonction des stratégies de réforme</i>	49
<i>Figure 36 : Durée moyenne de lactation en fonction des stratégies de réforme</i>	49

Figure 37 : Nombre de vaches réformées Boiteries en fonction du nombre total de vaches réformées	50
Figure 38 : Nombre de vaches réformées Cellules et Mammites en fonction du nombre total de vaches réformées	50
Figure 39 : Nombre de vaches réformées Boiteries en fonction du nombre de vaches réformées Cellules et Mammites	51
Figure 40 : Occupation de l'atelier laitier en fonction du taux de réforme	51
Figure 41 : Production laitière annuelle en fonction du taux de réforme	52
Figure 42 : Nombre de génisses vendues par an en fonction du taux de réforme	52
Figure 43 : Semaines de vie productive en fonction du taux de réforme	53
Figure 44 : Intervalle vêlage-vêlage en fonction de la production laitière annuelle	54
Figure 45 : Longévité en fonction de la production laitière annuelle	54
Figure 46 : Occupation de l'atelier laitier par des vaches en lactation en fonction de la production laitière annuelle.....	55
Figure 47 : Taux de renouvellement en fonction de la vente de génisses	55
Figure 48 : Marge brute annuelle en fonction du temps passé à gérer l'hygiène	58
Figure 49 : Marge brute annuelle en fonction du temps de travail pour gérer la reproduction suivant les différents taux de détection des chaleurs (DR)	59
Figure 50 : Marge brute annuelle en fonction du temps de travail consacré exclusivement aux inséminations	59
Figure 51 : Marge brute annuelle en fonction de la durée moyenne de lactation	60
Figure 52 : Marge brute annuelle en fonction de la longévité moyenne des vaches	60
Figure 53 : Marge brute moyenne annuelle en fonction des scénarios DR et VWP	61
Figure 54 : Marge brute moyenne annuelle en fonction du taux de détection et des scénarios de boiteries.....	61
Figure 55 : Marge brute moyenne annuel en fonction du taux de détection et des scénarios d'hygiène	62
Figure 56 : Marge brute moyenne annuelle en fonction des scénarios de boiteries et d'hygiène	62
Figure 57 : Marge brute moyenne annuelle en fonction des scénarios de boiteries et de réforme	63
Figure 58 : Marge brute annuelle en fonction de la production laitière annuelle.....	63
Figure 59 : Marge brute annuelle en fonction de l'occupation de l'atelier laitier	64
Figure 60 : Marge brute moyenne annuelle en fonction du temps total de travail	64
Figure 61 : Marge brute moyenne à l'heure travaillée en fonction de la charge de travail consacré à l'année.....	65
Figure 62 : Gain différentiel de marge brute par heure de détection de l'œstrus et en fonction des scénarios de boiteries	66

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Données de calibrage pour les cycles atypiques.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 2 : Description des contraintes d'optimisation pour l'acceptation de la charge de travail de l'éleveur, l'objectif de longévité des vaches, d'observation pour la reproduction et d'ALEA.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 3 : Description et calibration des scénarios de gestion</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 4 : Scénarios optimaux (n=673) et contraintes respectives d'optimisation.....</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 5 : Gain différentiel par heure travaillée des 10 scénarios les plus rentables</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 6 : Gain différentiel par heure travaillée des 10 scénarios les moins rentables</i>	<i>57</i>

Liste des annexes

<i>Annexe 1 : Paramètres d'entrée du modèle biologique</i>	<i>75</i>
<i>Annexe 2 : Paramètres de calibrage des fonctions de production</i>	<i>76</i>
<i>Annexe 3 : Table de calcul des besoins alimentaires en UFL, protéines brutes et fibres.....</i>	<i>77</i>
<i>Annexe 4 : Comptage des cellules somatiques (CCS) après une infection de mammite clinique par agent pathogène</i>	<i>78</i>
<i>Annexe 5 : Calibration des paramètres pour la simulation des maladies des veaux</i>	<i>79</i>
<i>Annexe 6 : Calendrier des maladies des vaches, calibrage du risque de maladies croisées et de traitement</i>	<i>80</i>
<i>Annexe 7 : Caractéristiques des traitements utilisés dans DHS®</i>	<i>81</i>
<i>Annexe 8 : Calibration des décisions de réformes</i>	<i>82</i>
<i>Annexe 9 : Présentation du cheptel stabilisé.....</i>	<i>83</i>

Liste des abréviations

AI [Artificial Insemination] : insémination artificielle (IA)
ALEA [Animal Level of Exposure to Antimicrobials] : exposition des animaux aux antibiotiques
AMU [AntiMicrobials Usage] : utilisation des antibiotiques
CP [Crude Protein] : protéines brutes ou matières azotées totales (MAT)
CR [Conception Rate] : taux de conception ou taux de réussite à l'insémination
DIM [Day In Milk] : jours en lait
DMI [Dry Matter Intake] : matière sèche ingérée (MSI)
DMY [Day Milk Yield] : rendement journalier en lait
DR [Detection Rate] : taux de détection
FCM [Fat Corrected Milk] : rendement en lait corrigé avec le taux de matières grasses
FH [Fake Heat] : fausses chaleurs
FSCR [First Service Conception Rate] : taux de réussite à la première insémination
GMQ : Gain Moyen Quotidien (*Average Daily Gain – ADG*)
H [Hygiene] : hygiène
Hca [Hypocalcaemia] : hypocalcémie et fièvre de lait
IC : intervalle de confiance
LS [Lame Score] : score de locomotion ou score de boiterie
NEC : Note d'Etat Corporel
Met [Metritis] : métrite
OR [Odds Ratio] : rapport des cotes ou risque relatif rapproché
PC [Precull and Cull] : pré-réforme et réforme
PVD [Purulent Vaginal Discharge] : écoulement vaginal suppuré
SCC [Somatic Cells Count] : comptage en cellules somatiques du lait (CCS)
SCE [SubClinical Endometritis] : endométrite subclinique
UFL : Unité Fourragère Lait
VWP [Voluntary Wait Period] : période d'attente volontaire
WIM [Week In Milk] : semaines en lait

I. Introduction

L'élevage laitier vise à produire du lait comme production primaire et de la viande comme production jointe. Des maladies telles que les mammites, les boiteries et les troubles de la reproduction, ou une mauvaise gestion de l'alimentation et de la santé, diminuent la quantité et la qualité des produits (Barbano, Lynch 2006 ; Bar et al. 2007 ; Cha et al. 2013 ; Hertl et al. 2010 ; 2011 ; Schukken et al. 2009). Ces maladies renvoient aussi à des enjeux sociétaux (bien-être animal) et plus généralement de durabilité de l'élevage bovin laitier.

I.1. Relation boiteries et performances de reproduction et de production

Les boiteries sont une cause importante de réduction du bien-être animal et, avec les mammites et l'infertilité, constituent une contrainte importante pour la production laitière (KOSSAIBATI, ESSLEMONT 1997 ; Bruijnis, H. Hogeveen, et al. 2013). D'une part, la vache boiteuse n'exprimera pas ou peu ses chaleurs, diminuant ainsi sa détection. Les performances de reproduction sont donc diminuées. Les pertes sont principalement dues à des intervalles entre vêlage prolongés, aux coûts liés à la réforme prématurée (Beaudeau et al. 1995 ; Machado et al. 2010), à une baisse de la production de lait et une modification de la qualité du lait, et à d'autres coûts et traitements vétérinaires (Sogstad et al. 2006 ; Enting et al. 1997). L'intervalle entre le vêlage et l'insémination fécondante est augmenté chez les vaches avec boiterie (Hernandez et al. 2001) et la fertilité est dégradée (Sogstad et al. 2006). D'autre part, une vache avec une boiterie a un temps de couchage plus élevé, lié à une douleur plus importante. Le prolongement de ce temps de couchage diminue l'ingestion de matière sèche par la vache, entraînant une baisse de la production laitière nette, de sa persistance et de sa qualité (Sogstad et al. 2006). Ce temps de couchage supplémentaire peut aussi représenter un facteur de risque supplémentaire de dégradation de la qualité du lait. Ainsi, il apparaît clairement que les maladies de la vache laitière sont fortement liées entre elles et cette interdépendance interpelle sur l'évaluation économique de ces maladies et les modalités de correction des biais liés à l'interdépendance des maladies lors de l'évaluation économique.

Les boiteries entraînent des pertes économiques conséquentes (entre 18\$ et 95\$ en moyenne par boiterie) et impactent le bien-être animal des vaches laitières (Somers et al. 2003 ; Bruijnis et al. 2010 ; Bruijnis, H. Hogeveen, et al. 2013). Même si la prévalence des boiteries n'est à ce jour pas très bien renseignée, il apparaît de manière consensuelle qu'elle a fortement augmentée au cours des dernières années et que les boiteries représentent aujourd'hui une entité pathologique majeure de l'élevage bovin laitier. La prévalence combinée des boiteries chez les bovins laitiers britanniques était estimée à 29,5% (IC à 95% [26,7-32,4%]) tandis que le taux d'incidence des boiteries toutes causes indiquait 30,9 cas de boiteries pour 100 vaches-années (IC à 95% [24,5-37,9]). Le taux d'incidence combiné des boiteries spécifique à la cause pour 100 vaches-années était de 66,1 (IC à 95% [24,1-128,8]) pour la maladie de la ligne blanche, 53,2 (IC à 95% [20,5-101,2]) pour l'ulcère de la sole, 53,6 (IC à 95% [19,2-105,34]) pour la dermatite digitale, avec 51,9 (IC à 95% [9,3-129,2]) attribuables à d'autres lésions liées à la boiterie (Afonso et al. 2020).

Une meilleure gestion des problèmes locomoteurs en élevage bovin laitier pourrait réduire les conséquences économiques et améliorer simultanément le bien-être animal (Bruijnis et al. 2010 ; Bruijnis, H. Hogeveen, et al. 2013 ; Sadiq et al. 2019). Cela nécessite une meilleure connaissance et une meilleure sensibilisation des éleveurs vis-à-vis de ce trouble de santé (Leach et al. 2010), une meilleure compréhension de la rentabilité et des avantages des mesures d'intervention (performances bio-

économiques) (Machado et al. 2010). Ces étapes devraient à terme permettre une aide à la décision lors du choix des stratégies à adopter (Bruijnis, H. Hogeveen, et al. 2013).

I.2. Situation contextualisée et stratégies des pratiques d'élevage

L'étude des interactions biologiques des maladies, des performances de reproduction et de production peut reposer sur une modélisation dynamique des troupeaux laitiers (Bruijnis et al. 2010 ; Gussmann et al. 2018). L'approche économique s'effectue très souvent avec un focus sur un trouble permettant d'estimer les coûts de la maladie (Ettema, Østergaard 2006 ; Bruijnis et al. 2010 ; Liang et al. 2017 ; Dolecheck et al. 2019). Dans la littérature, peu d'études ont recours à une modélisation systémique et holistique d'optimisation bio-économique de l'élevage bovin laitier (Ferchiou, 2021). A l'exception de quelques études (Inchaisri et al. 2010 ; Ma, Burgers 2020), l'économie appliquée à la gestion de la santé des élevages laitiers se limite à une simple traduction financière de l'impact épidémiologique, loin du fonctionnement réaliste d'un élevage et du comportement de l'éleveur (Ferchiou et al. 2021). De plus, l'intérêt porté aux éléments financiers ne permet pas de focaliser suffisamment sur les pratiques à favoriser dans une approche durable.

Il apparaît par conséquent pertinent non plus seulement de focaliser sur les éléments financiers de l'impact économique mais plus largement de s'interpréter à la décision et à l'optimisation en matière de comportement et d'intervention des acteurs (les éleveurs). Cette approche revient à définir des stratégies de pratiques d'élevage et de gestions préventive et curative des événements sanitaires en élevage (Bruijnis, Henk Hogeveen, et al. 2013 ; Sadiq et al. 2019 ; Ferchiou et al. 2021). Par exemple, pour les boiteries, l'amélioration de la surface de couchage, la réduction de la densité et réaliser 3 parages par an ont été identifiés comme des mesures clés et économiquement justifiées (Bruijnis, H. Hogeveen, et al. 2013). Cependant, les coûts de main d'œuvre jouent un rôle important dans la performance économique des stratégies adoptées.

Dans ce contexte, la modélisation bioéconomique s'avère un outil de choix. Cette approche permet d'une part d'inclure les interactions entre les différentes composantes zootechniques et sanitaires, dans une logique de représentation de la dynamique systémique de l'élevage, et d'autre part de combiner les paramètres biologiques avec les critères/indicateurs zootechniques décidés par les éleveurs, dans une logique de représentation intégrée de la décision de l'éleveur et de son comportement. Les intentions de ces simulations sont d'appréhender les coûts totaux pour identifier les coûts marginaux, de s'appuyer sur des pratiques d'élevages génériques validées et considérées comme usuelles permettant ainsi d'inclure un raisonnement économique et zootechnique, enfin, d'évaluer plus spécifiquement une situation donnée.

I.3. Objectifs de l'étude

Cette étude vise à définir les stratégies de gestion des boiteries à adopter au sein de différents contextes d'élevage. En déterminant les coûts et gains marginaux associés à un ensemble de stratégies de gestion de la reproduction et des boiteries dans des élevages de la production laitière en France, des stratégies optimales maximisant les revenus des éleveurs sous la contrainte de charge de travail sont proposées.

Pour cela, l'outil DairyHealthSimulator® est utilisé. Il permet non seulement le couplage des modèles biologiques et des modèles d'optimisation économique comme base d'évaluation de scénarios

réalistes, tenant réellement compte des contraintes auxquelles sont confrontés les éleveurs en routine. Cela permet de mieux prendre en compte les comportements des éleveurs et la complexité préalablement mentionnée.

II. Matériels et méthodes

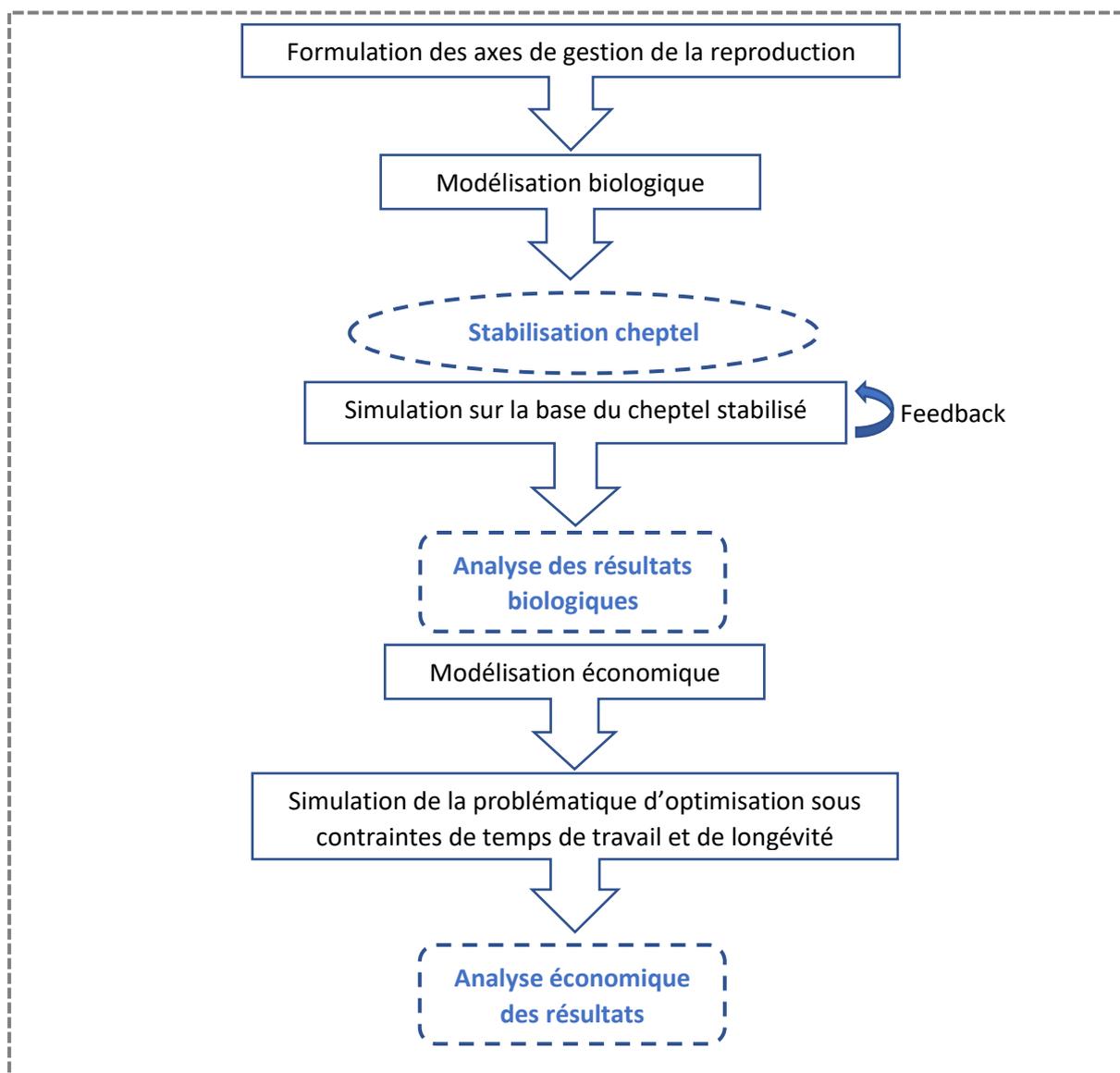


Figure 1 : Description de l'approche générale

II.1. Description du modèle biologique

II.1.a. Description de DairyHealthSim©

Une approche de modélisation bio-économique intégrée est utilisée ; ce modèle consiste en un modèle de simulation biologique couplé à un modèle d'optimisation économique (DairyHealthSim©). Le modèle biologique est défini sur une base vache-semaine et de probabilités hebdomadaires d'évènements sur l'ensemble des vaches, incluant la production laitière, la reproduction et les maladies (Figure 2). Il se destine en une représentation dynamique du troupeau laitier. Brièvement, de la naissance à la mort, chaque animal est caractérisé hebdomadairement par son statut physiologique et de production (e.g., veau mâle, veau femelle, femelle gravide, vache en lait, et vache tarie). Ce cadre est appliqué dans trois principales sortes de fonctions interconnectées, à savoir, la

production (e.g., croissance, production laitière et reproduction), les maladies (qui affectent la production) et le traitement (comme un contrôle des affections).

Un aperçu des sources bibliographiques pour les risques et effets des maladies, les 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.

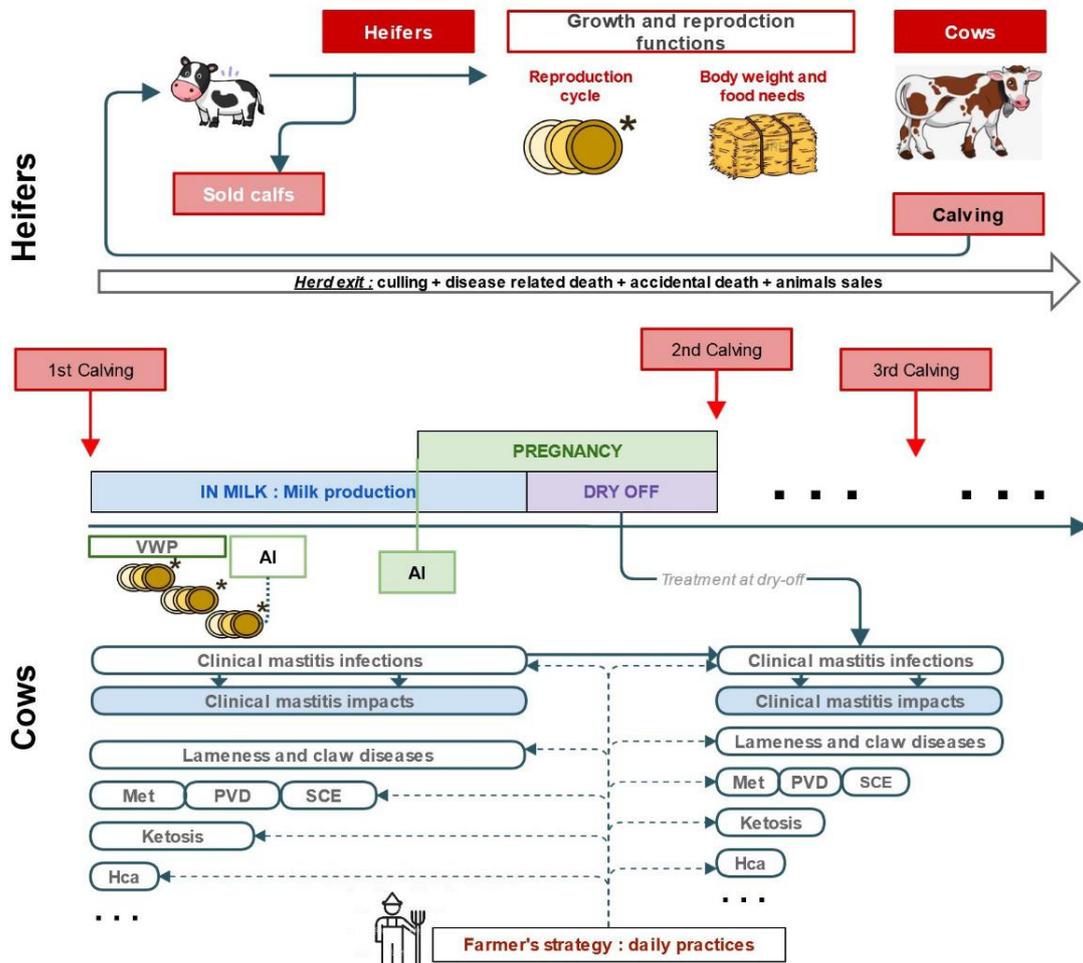


Figure 2 : Présentation du modèle biologique DairyHealthSim©

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 LW_{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) :

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

Où BW_{d,wim,t_p} représente le poids des vaches âgées de d jours à la semaine de lactation wim et à un stade de gestation t_p jours. BW_{Mat} indique le poids à maturité, LW_{Birth} désigne le poids à la naissance, k désigne le taux de croissance, t_{pc} le stade de gestation en jours (avec $t_{pc} = t_p - 50$ si $t_p - 50 > 0$ sinon $t_{pc} = 0$) et p_1 , p_2 et p_3 désignent respectivement la diminution maximale de poids vif durant la lactation, le temps (jours) durant la lactation avec le poids vif minimal 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 protéines brutes (CP ou MAT). 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) :

$$DMI_{dim,FCM,LW} = (0,372 * FCM_{dim} + 0,0968 * LW^{0,75}) * \left(1 - e^{-0,192 * \left(\frac{dim}{7} + 3,67 \right)} \right) \quad [2]$$

Où $DMI_{dim,FCM,LW}$ représente l'ingestion de matière sèche (kg/vache/jour) pour une vache dont le poids LW 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 matières grasses 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 à la semaine t de lactation ; 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 reproduction de la vache était basée sur un système à états de transition entre les états de reproduction (Figure 3).

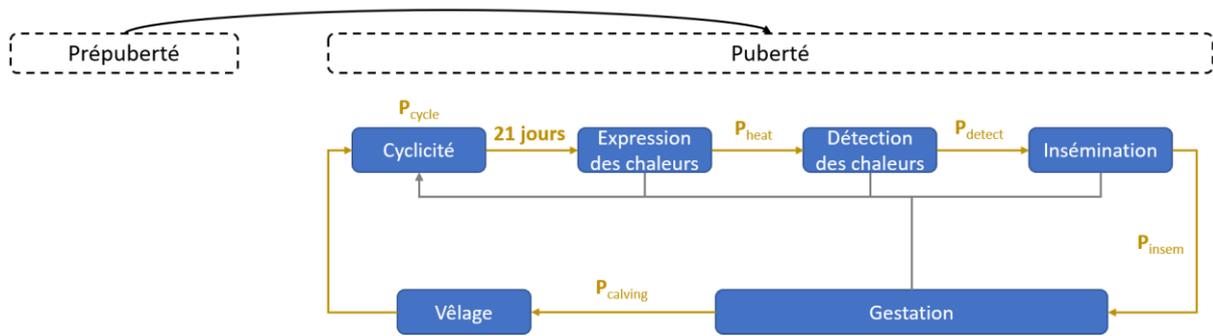


Figure 3 : Présentation de la simulation de la reproduction

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 telles que i) les conditions d'âge et de poids pour la puberté des génisses et l'éligibilité des génisses à la première IA (HeifAgePub, HeifWeiPub, HeifAgeElig, HeifWeiElig, voir Annexe 2) et ii) l'expression des chaleur (P_{heat}), la détection des chaleurs (P_{detect}), et les probabilités de réussite l'insémination (P_{insem}) pour les vaches matures pour débuter une 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 commencer après une période de 15 jours d'anœstrus et une période d'attente volontaire (VWP) de 28 jours, en fonction de la probabilité de réalisation du cycle (P_{cycle}) et de l'occurrence des cycles atypiques. 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).

Trois principaux cycles atypiques sont considérés : les cycles différés, les cycles avec une phase lutéale prolongée et les cycles interrompus (Tableau 1). Les occurrences des cétozes cliniques et subcliniques sont des facteurs de risques pour les retards de cycle, et les endométrites retardent systématiquement le début d'un nouveau cycle de 3 jours. Les métrites, les endométrites, la reprise précoce de la cyclicité, la parité sont considérés comme être des facteurs de risques de persistance de corps jaune et en outre de prolongement de la phase lutéale. Dans le modèle, la persistance du corps jaune allonge la durée du cycle de 1 semaine dans 45 % des cas, de 2 semaines dans 45 % des cas et de 3 semaines dans 10% des cas et ceci aura des conséquences sur le taux de conception (CR). La cétose subclinique est un facteur de risque pour des cycles interrompus par allongement de la phase folliculaire. Dans le modèle, la survenue de plusieurs cycles atypiques est possible pour un animal ouvert et chacun des cycles atypiques peut revenir à un cycle normal. Toutefois, le passage d'une interruption ou d'un prolongement de la phase lutéale d'un cycle à un cycle différé est possible.

- 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.

Tableau 1 : Données de calibrage pour les cycles atypiques

	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 %

II.1.a.2. Maladies

Les problèmes de santé ont été définis pour chaque vache chaque semaine de manière mécanistique, basé sur l'incidence de base, des facteurs de risque 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 la 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 (contaminations – >2 espèces bactériennes sur la culture – et organismes non signifiants) 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, cétose subclinique). Durant la lactation, la production hebdomadaire de cellules somatiques est simulée par une production de base SCC comme formulée 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. 2014).

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

[4]

Les maladies des pieds ont été simulées par une fonction « lame » qui définit de manière probabiliste les évènements 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 membre...) 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 prises 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 défauts 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 mammite 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...) et la situation de récurrence ou de rechute (ré-infection après 3 semaines), et iii) si le traitement est administré dans les délais, retardé ou si la mammite 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 génisses puis 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 stade de gestation, les boiteries, et le statut de la santé de la mamelle. Ces indications 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 précède 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 mammites cliniques. 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'inséminations 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 naissances 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 tarées 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 pic important. 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 pic important.

II.2. Modélisation économique

Le modèle économique développé est un cadre d'optimisation de la variance moyenne récursive. 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 d'un cadre d'utilité espérée (VON NEUMANN, 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. L'incertitude des prix du lait et des aliments pour animaux est la principale source de risque pour les élevages laitiers (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 fonction objective de variance moyenne de Markowitz-Freund a été utilisée pour insérer le comportement d'aversion au risque dans la prise de décision des éleveurs (Freund 1956 ; MARKOWITZ 1959 ; HARDAKER 2004). L'utilité espérée du décideur (\mathbf{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 \mathbf{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 ci-après : 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. Toutefois, la plupart des auteurs considèrent qu'une valeur supérieure à 5 est 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, ces valeurs représentent les différentes attitudes des éleveurs en regard du risque.

La marge brute équivalente $Z_{k,t}$ générée 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 (*e.g.*, génisses ou veaux mâles).

La quantité de lait hebdomadaire produite et vendue par l'élevage est enregistrée et la moyenne hebdomadaire des cellules et de la qualité des matières utiles (matières 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 mammites.

II.2.a. Simulation de la problématique d'optimisation sous contraintes

Deux types de contraintes sont considérées dans le modèle économique. Tout d'abord, les contraintes de production tel que la contrainte de structure de l'élevage (Equation 5) et les contraintes techniques de rationnement. Ensuite, les contraintes d'optimisation multicritères qui sont liées au temps de travail de l'éleveur (Equation 6.1), au temps d'observation en reproduction (Equation 6.2), à la longévité des vaches (Equation 7), et à la réduction d'utilisation des antibiotiques (Equation 8).

Lors de la simulation de la problématique d'optimisation, plusieurs 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 :

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

Deuxièmement, 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 (*e.g.*, farine de blé et tourteau de soja). La composition de la ration est basée sur l'ensilage de maïs à 61 % \pm 10 % des besoins en matière sèche, sur le foin pour 10% des besoins en matière sèche et sur les concentrés de farine de blé et tourteau de soja à 29%. La composition alimentaire doit 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 considérés comme 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.

Troisièmement, la charge de travail est considérée comme une forte contrainte de gestion de l'élevage laitier (Tableau 3). Etant donné que le flux de travail dans l'élevage est difficile à décrire, des changements dans la charge de travail des éleveurs sont considérés ici s'il y a des changements dans les pratiques ou des nouveaux traitements pour une stratégie donnée.

Cette contrainte de consentement à travailler est déclinée d'une part pour la surcharge de travail pour la gestion de l'hygiène des bâtiment d'élevage. 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 mensuel que l'éleveur f est capable de supporter, comme indiqué dans l'Equation [6.1] :

$$\sum_{t,s} W_{t,s} * X_{t,s} \leq W_Threshold_f \quad [6.1]$$

Neuf niveaux de contraintes de surcharge de travail des éleveurs pour la gestion de l'hygiène ont été pris en compte, allant d'une situation sans contrainte « GTIME_Free » à une situation plus restrictive où pas plus de 5 heures par mois de charge de travail supplémentaire sont acceptées « GTIME_5 » (Tableau 2).

D'autre part, la contrainte est déclinée pour la surcharge de travail pour l'observation des chaleurs des vaches laitières. Le temps d'observation supplémentaire $ObsW_{t,s}$ effectué par l'éleveur dans l'année t pour la stratégie de gestion s est limité à un seuil $ObsW_Threshold$ qui correspond au temps de travail supplémentaire journalier que l'éleveur f est capable de supporter :

$$\sum_{t,s} W_{t,s} * X_{t,s} \leq ObsW_Threshold_f \quad [6.2]$$

Quatre niveaux de contraintes de surcharge de travail des éleveurs pour la gestion de l'hygiène ont été pris en compte, allant d'une situation sans contrainte « OBSTIME_Free » à une situation plus restrictive où l'éleveur ne consent pas à consacrer du temps à l'observation de l'expression des chaleurs « GTIME_5 » (Tableau 2).

Quatrièmement, la durabilité de la production laitière est représentée par le critère de longévité de la vache laitière (Tableau 2). Garantir que les conditions optimales ne soient pas obtenues par une détérioration du bien-être des animaux est un point clé. La longévité de la vache ; représentée par le critère d'Age Adulte Moyen $AAM_{t,s}$ à l'année t et pour la stratégie de gestion s ; est limitée au seuil $AAM_Threshold$ qui correspond au seuil le moins acceptable par l'éleveur est indiqué dans l'Equation [7] :

$$\sum_{t,s} AAM_{t,s} * X_{t,s} \leq AAM_Threshold \quad [7]$$

Huit niveaux de contraintes acceptées de longévité moyenne pour les vaches sont considérés, allant d'une situation sans contrainte « ADULTAGE_Free » à une situation plus restrictive où l'âge moyen des vaches adultes doit être supérieur à 170 semaines est accepté (Tableau 2).

Aujourd'hui, 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 (Tableau 2) 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 [8] définit la diminution en pourcentage à l'exposition aux antibiotiques (**Reduction_AM**) en comparaison à la référence LS1_A2_H2_VWP08_DR55_PC0 (**ALEA_Threshold_{t,s}**) appliqué au niveau d'exposition des antibiotiques **ALEA_{t,s}** pour l'année t et la stratégie de gestion s :

$$\sum_{t,s} AMU_{t,s} * X_{t,s} \leq \left(1 - \frac{Reduction_{AM}}{100}\right) * \sum_{t,s} AMU_{Threshold_{t,s}} \quad [8]$$

Quatre niveaux de contrainte de réduction de l'exposition des vaches aux antibiotiques ont été considérées (Tableau 2), allant d'une situation sans contrainte (ALEA_NoRED) à une situation plus restrictive ou le scénario de gestion doit permettre une réduction d'au moins 30% par rapport à la référence.

La résolution du modèle a été menée en deux étapes. D'une part, la résolution de tous les scénarios de gestion pour identifier la quantité de concentrés à acheter sur le marché dans le but de couvrir les besoins alimentaires du troupeau dans un contexte de volatilité des prix du marché. Cette démarche a permis de calculer la marge brute de l'éleveur pour toutes les stratégies de gestion de la reproduction. Puis, le choix du scénario de gestion de la reproduction qui maximise l'utilité de l'éleveur selon les contraintes de charge du travail et d'observation, de longévité et de réduction de l'utilisation des antibiotiques. Pour chaque niveau de contrainte, le modèle identifie le scénario optimal ainsi que les indicateurs techniques et de santé inhérents.

Le taux de détection représente un critère déterminant pour le revenu de l'éleveur laitier, cet axe de gestion de la reproduction demande un investissement important dans le temps de travail pour l'éleveur pour l'observation des chaleurs. A partir des différences de charges de travail entre chaque scénario de détection et la référence DR25 (niveau de détection sans temps de détection de l'œstrus dédié), nous avons calculé le gain marginal moyen par heure supplémentaire consacrée à la détection de l'œstrus.

II.2.b. Analyse économique des résultats

Le modèle d'optimisation a été exécuté séparément sur les 2 scénarios contextuels subdivisés (Boiterie et réforme–Tableau 3 ci-après). 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, l'objectif de longévité des vaches, d'observation pour la reproduction et d'ALEA.

Contrainte de charge de travail		Contrainte de longévité		Contrainte d'observation		Contrainte d'ALEA	
Label	Description	Label	Description	Label	Description	Label	Description
GTIME_Free	Pas de contrainte de temps de travail	ADULTAGE_Free	Pas de contrainte de longévité	OBSTIME_Free	Sans contrainte de temps d'observation supplémentaire	ALEA_NoRED	Pas de réduction d'exposition aux antibiotiques
GTIME_40	Charge de travail supplémentaire de moins de 40h/mois	ADULTAGE_110w	Age adulte moyen des vaches supérieur à 110 semaines	OBSTIME_20	Temps d'observation supplémentaire de 20 minutes par jour	ALEA_RED10	Exposition aux antibiotiques réduite de 10 %
GTIME_35	Charge de travail supplémentaire de moins de 35h/mois	ADULTAGE_120w	Age adulte moyen des vaches supérieur à 120 semaines	OBSTIME_10	Temps d'observation supplémentaire de 10 minutes par jour	ALEA_RED20	Exposition aux antibiotiques réduite de 20 %
GTIME_30	Charge de travail supplémentaire de moins de 30h/mois	ADULTAGE_130w	Age adulte moyen des vaches supérieur à 130 semaines	OBSTIME_0	Pas de temps d'observation supplémentaire	ALEA_RED30	Exposition aux antibiotiques réduite de 30 %
GTIME_25	Charge de travail supplémentaire de moins de 25h/mois	ADULTAGE_140w	Age adulte moyen des vaches supérieur à 140 semaines				
GTIME_20	Charge de travail supplémentaire de moins de 20h/mois	ADULTAGE_150w	Age adulte moyen des vaches supérieur à 150 semaines				
GTIME_15	Charge de travail supplémentaire de moins de 15h/mois	ADULTAGE_160w	Age adulte moyen des vaches supérieur à 160 semaines				
GTIME_10	Charge de travail supplémentaire de moins de 10h/mois	ADULTAGE_170w	Age adulte moyen des vaches supérieur à 170 semaines				
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 comportement de l'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 zootechniques 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 inséminer une vache : soit il ne prend pas en compte la note d'état corporel (NEC) et il insémine toujours après la détection des chaleurs ; soit il prend en compte la NEC et il n'insémine pas les vaches avant la 13^{ème} semaine de lactation s'il y a cétose subclinique et/ou il attend 3 semaines après la détection s'il y a une endométrite purulente. Suivant ses choix, l'éleveur utilise ou non un test de cétose subclinique avec plus ou moins une bonne spécificité et sensibilité.

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 (Tableau 3).

Les scénarios d'hygiène renseignent sur la propreté du bâtiment et la qualité de l'hygiène lors de la traite et représentent ainsi le risque de mammite clinique.

Les scénarios de pré-réforme et de réforme (PC) sont basés sur des critères techniques de gestion de la reproduction (jours ouvert, nombre d'inséminations, stade de gestation), de production de lait et d'occupation de l'atelier lait.

Les scénarios de boiteries informent du niveau de prévalence des troubles du pieds dans l'élevage.

Les scénarios d'alimentation renseignent la charge de travail liée à cette tâche et la prévalence des cétooses subcliniques.

Pour des raisons de compréhension et d'optimisation informatique, les scénarios d'hygiène, d'alimentation et d'insémination ont été fixé à un niveau moyen.

II.3.b. Calibration du modèle

II.3.b.1. Elaboration de DHS

Lors de la création du modèle, de nombreuses vérifications et tests ont été réalisés afin de s'assurer de la vraisemblance et de la robustesse du modèle. La calibration adéquate de DHS est en effet un gage de la pertinence et de l'excellence des résultats. Pour cela, des pré-étapes de validation du modèle ont été réalisées, à travers, par exemple, l'application des règles d'apparition des boiteries (et *in fine*, l'incidence observée en sortie de modèle), le respect des temps d'attente pour la collecte du lait ou encore de la production laitière. Au final, ces étapes de validation ont permis d'obtenir un logiciel avec des résultats exacts et reproductibles, tout en proposant des indicateurs de sortie, en adéquation avec leur utilisation en élevage.

II.3.b.2. Calibration des scénarios

Tableau 3 : Description et calibration 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
Critère collectif de décision : Voluntary Wait Period (VWP)	
VWP6	Période d'attente volontaire = 6 semaines
VWP8	Période d'attente volontaire = 8 semaines
VWP10	Période d'attente volontaire = 10 semaines
VWP12	Période d'attente volontaire = 12 semaines
Critère individuel de décision : Insémination (IA)	
IA2	L'éleveur prend en compte la NEC, il n'insémine pas les vaches avant la 13 ^{ème} semaine de lactation s'il y a cétose subclinique et/ou il attend 3 semaines après la détection s'il y a une endométrite purulente (PVD). Le test de cétose subclinique à une sensibilité (Se=95%) et une spécificité (Sp=95%) bonnes.
Scénario contextuel : Hygiène (H)	
H0	L'hygiène du bâtiment et lors de la traite est correcte. L'incidence de mammite clinique est de 1 par vache par an.
H2	L'hygiène du bâtiment et lors de la traite est dégradée. L'incidence de mammite clinique est de 2,5 par vache par an.
H4	L'hygiène du bâtiment et lors de la traite est médiocre. L'incidence de mammite clinique est de 4,5 par vache par an.

Scénario contextuel : Alimentation (A)	
A1	15% des vaches ont un facteur de risque de cétose subclinique de 4,5 ; gain de temps de travail = 0 min
A2	50% des vaches ont un facteur de risque de cétose subclinique de 4,5 ; gain de temps de travail = 30 min par jour par rapport à A1
Scénario contextuel : Boiterie (Lame - LS)	
LS0	Prévalence faible ; risque de base appliqué en fonction du numéro et du stade de lactation défini à la semaine
LS1	Prévalence moyenne ; risque de base appliqué en fonction du numéro et du stade de lactation défini à la semaine
LS2	Prévalence élevée ; risque de base appliqué en fonction du numéro et du stade de lactation défini à la semaine
Scénario contextuel : Réforme (Precull & Cull - PC)	
PC0	Seuil de jours ouverts pour pré-réforme = 180 pour L1 (première lactation) et 160 pour L>1 (seconde et plus lactation) Seuil IA non fécondante = 5 IA pour L1 et 4 pour L>1 Seuil production laitière pour pré-réforme = 25 L/j Seuil production laitière pour réforme = 15 L/j Nombre maximal de réformes par semaine = 5
PC1	Seuil de jours ouverts pour pré-réforme = 240 pour L1 et 220 pour L>1 Seuil IA non fécondante = 5 IA pour L1 et 4 pour L>1 Seuil production laitière pour pré-réforme = 20 L/j Seuil production laitière pour réforme = 10 L/j Nombre maximal de réformes par semaine = 2
PC2	Seuil de jours ouverts pour pré-réforme = 180 pour L1 et 160 pour L>1 Seuil IA non fécondante = 6 IA pour L1 et 5 pour L>1 Seuil production laitière pour pré-réforme = 20 L/j Seuil production laitière pour réforme = 10 L/j Nombre maximal de réformes par semaine = 2
PC3	Seuil de jours ouverts pour pré-réforme = 240 pour L1 et 220 pour L>1 Seuil IA non fécondante = 6 IA pour L1 et 5 pour L>1 Seuil production laitière pour pré-réforme = 20 L/j Seuil production laitière pour réforme = 10 L/j Nombre maximal de réformes par semaine = 2

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, 1 440 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, par niveau de prévalence des boiteries et de gestion des réformes. Les données ainsi obtenues ont été réorganisées. Les simulations s'effectuent sous forme de baking. Un baking est la moyenne de 50 simulations d'une durée de 14 ans. Et chaque baking représente un scénario particulier donc 480 scénarios ont été obtenus et classés en fonction des différents axes de gestion de la reproduction, par niveau de prévalence des boiteries et de gestion de réforme. Au départ les 1 440 baking sont classés avec des index allant de 1 à 1 440 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 4).

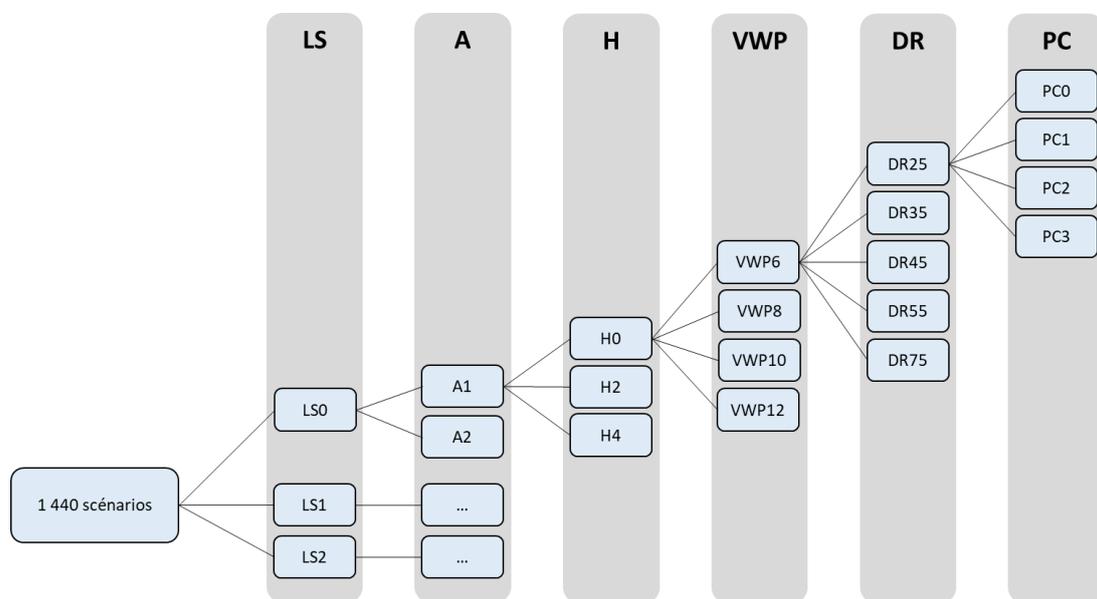


Figure 4 : Classification des scénarios pour l'analyse des résultats biologiques

Cette première approche a permis de visualiser les premiers résultats importants en fonction des axes de gestion : LS, A, H, VWP, DR et PC. 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. Taux de détection des chaleurs (DR)

Lorsque le taux de détection augmente, le nombre d'IA réalisées est, comme attendu, plus important. Le nombre moyen d'inséminations effectuées par an passe de 196,5 IA pour un taux de détection de 25 % à 302,5 IA pour un taux de détection de 75 % soit un écart de 106 IA (Figure 5).

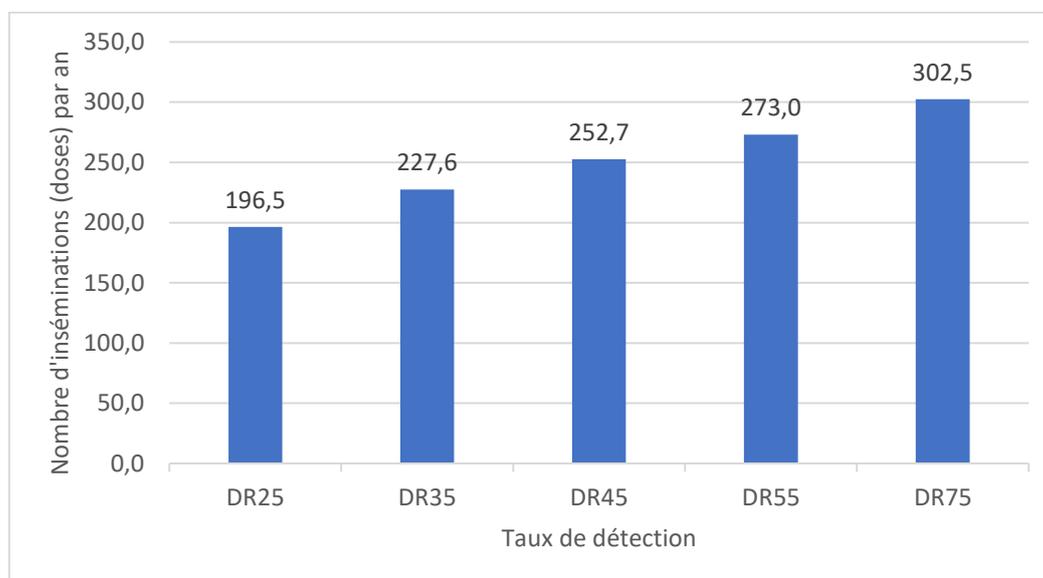


Figure 5 : Nombre moyen d'inséminations réalisées annuellement en fonction du taux de détection

L'occupation de l'atelier laitier donc le remplissage du bâtiment des vaches laitières en lactation est optimisé (99,2 vaches laitières en moyenne) lorsque DR=75 % (Figure 6). On note toutefois que le modèle n'arrive pas à conserver la taille du troupeau lorsque les performances de reproduction sont dégradées (en particulier DR=25%). Ceci est en accord avec l'absence d'achats tels que défini dans le modèle. Un décrochage apparaît entre DR=35% et DR=25%. Ce décrochage s'observe sur la majorité des paramètres présentés par la suite.

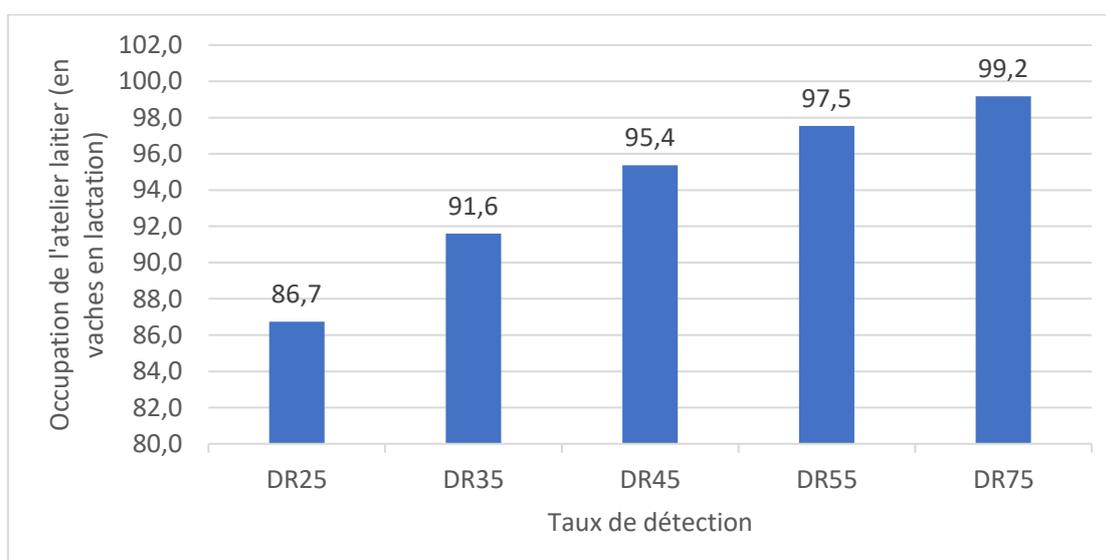


Figure 6 : Occupation de l'atelier laitier en fonction du taux de détection

Plus le taux de détection augmente, plus la part des réformes basées sur les critères de boiteries, cellules et mammites est importante représentant pour DR75 plus de 38 % (Figure 7).

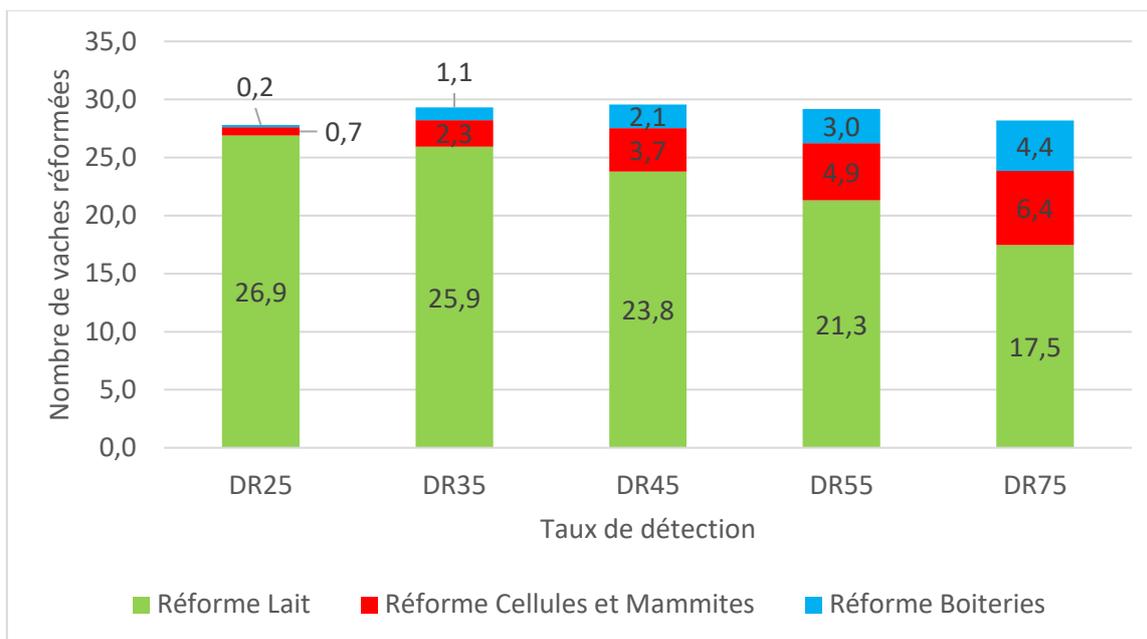


Figure 7 : Nombre de vaches réformées et sa répartition en fonction des critères de choix de réformes en fonction du taux de détection

La vente de génisses prêtes à vêler est d'autant plus importante quand le taux de détection augmente. En effet un écart de 7,8 génisses par an est constaté entre les taux de détection de 25 % et de 75 % (Figure 8).

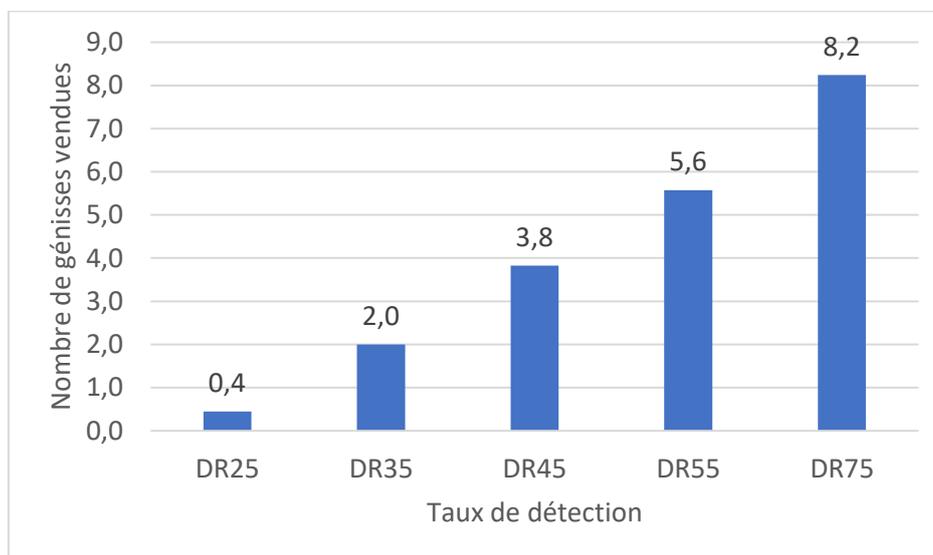


Figure 8 : Nombre de génisses vendues par an en fonction du taux de détection

Le taux de renouvellement tend à diminuer en fonction du taux de détection et peut baisser de 2,3 % entre DR25 et DR75. Cette baisse reste toutefois légère (Figure 9).

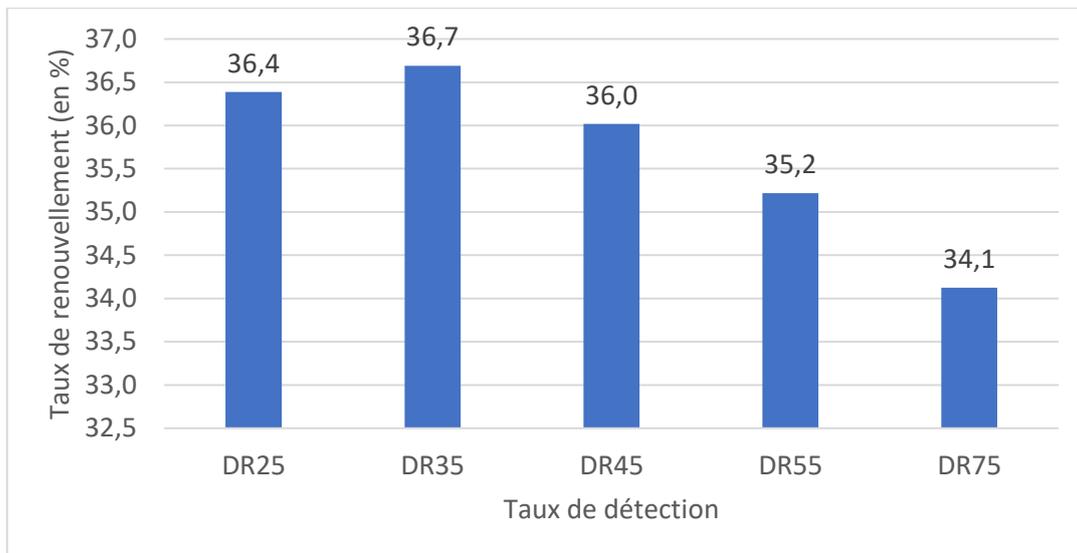


Figure 9 : Taux de renouvellement en fonction du taux de détection

Lorsque le taux de détection augmente, la quantité de lait produit annuellement est plus conséquente avec un écart entre les taux de détection 25 % et 75 % de 179 252 L (Figure 10).

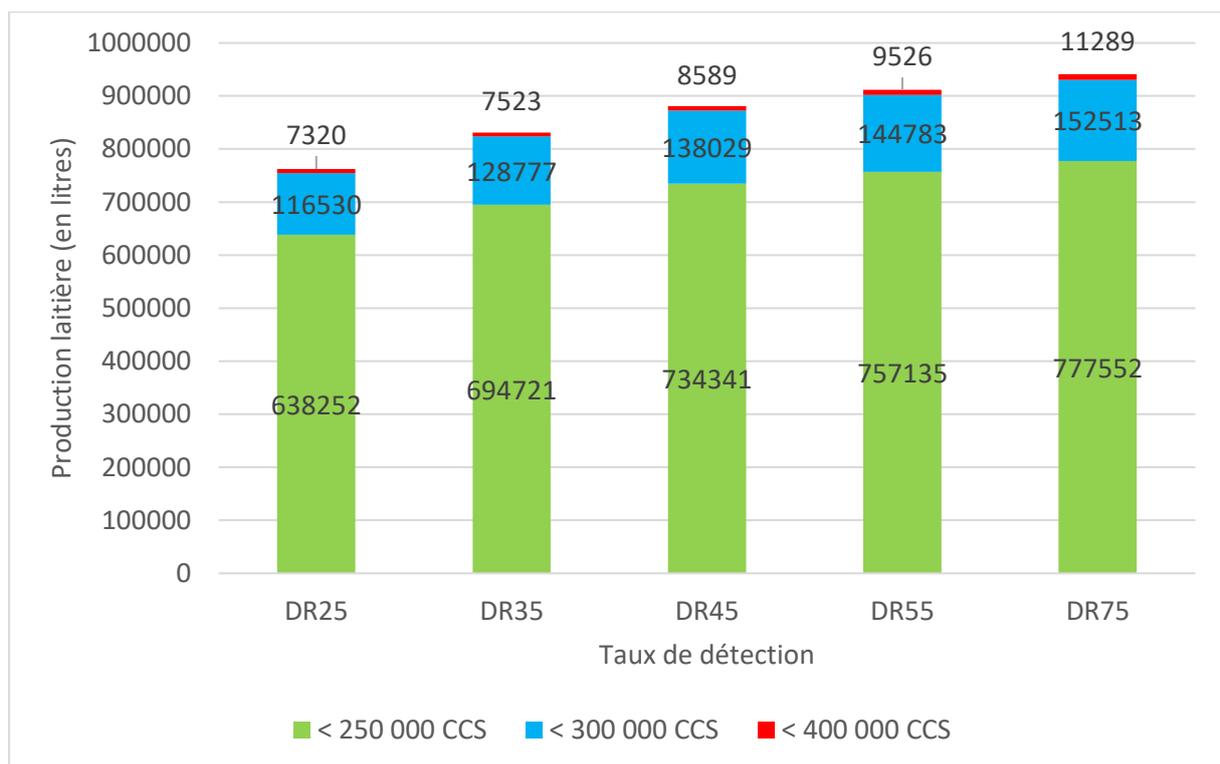


Figure 10 : Production laitière moyenne annuelle classée en fonction des comptages cellulaires somatiques (CCS) et en fonction du taux de détection

L'IVV diminue lorsque le taux de détection est amélioré. Lorsque le taux de détection passe de 25 % à 75 %, on gagne 43,9 jours en moyenne sur chaque vache (Figure 11).

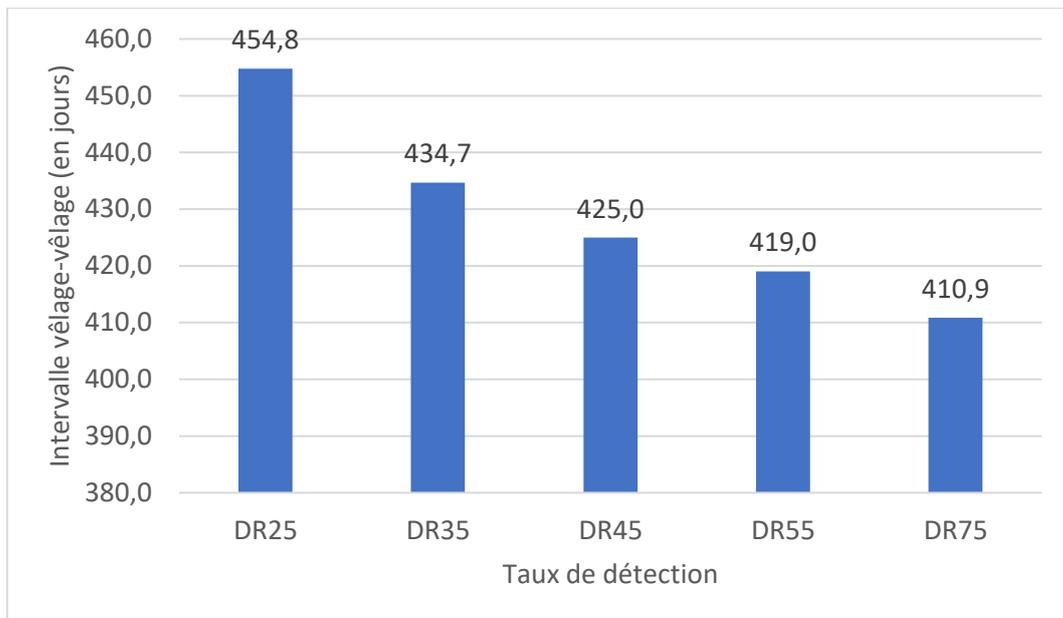


Figure 11 : Intervalle vêlage-vêlage moyen en fonction du taux de détection

Ainsi, la durée moyenne de lactation se retrouve réduite de 8,3 semaines entre les taux de détection DR25 et DR75 (Figure 12).

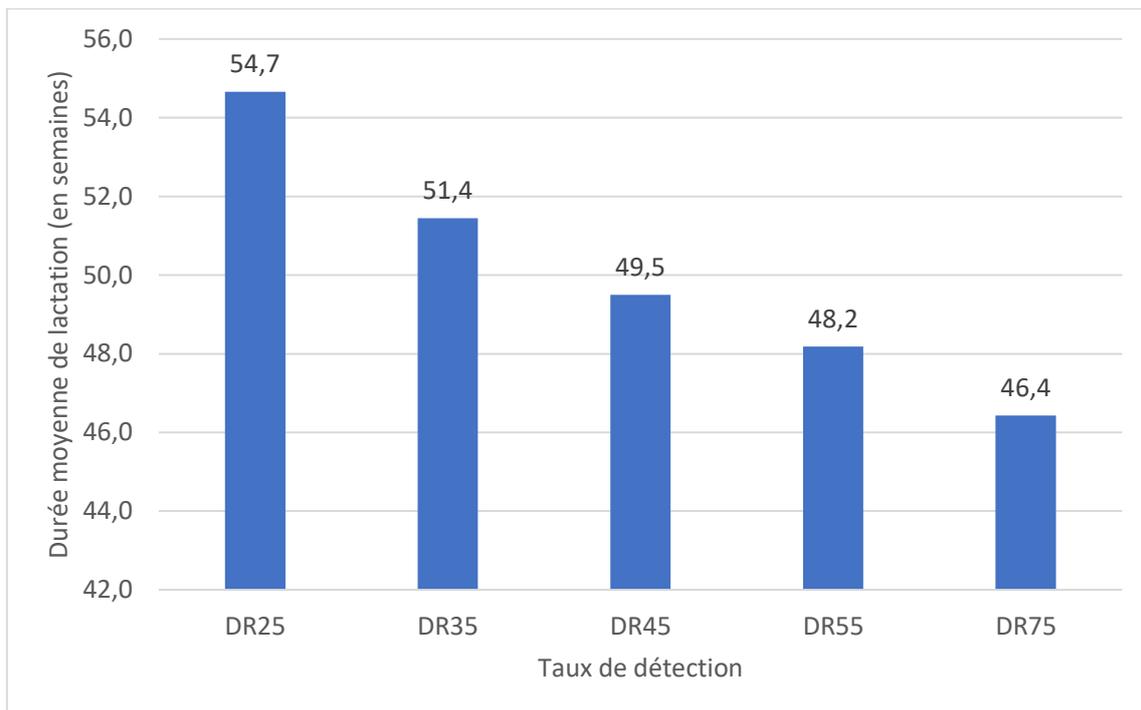


Figure 12 : Durée moyenne de lactation en fonction du taux de détection

En outre, sur la carrière de la vache laitière dans ces élevages, la longévité au sein de l'exploitation diminue de 26,6 semaines soit 6 mois (Figure 13).

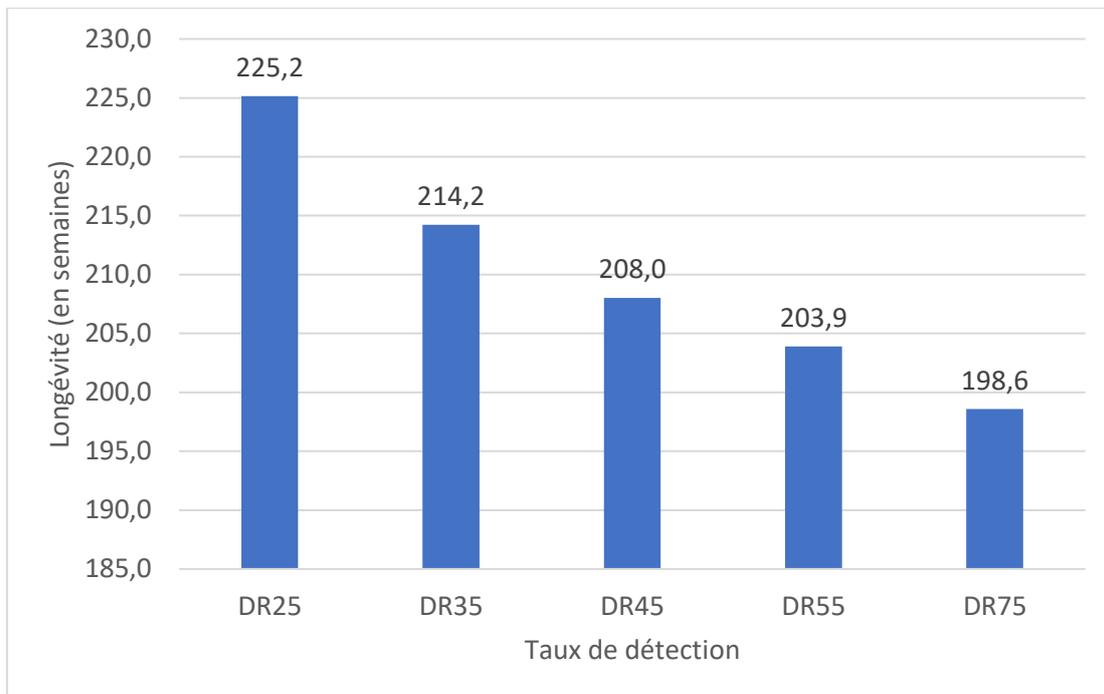


Figure 13 : Longévité moyenne dans l'élevage en fonction du taux de détection

Avec un meilleur taux de détection sur les génisses, l'âge au premier vêlage est donc avancé de 14 semaines pour DR75 par rapport au DR25 (Figure 14). Un plateau apparaît autour de DR=45%.

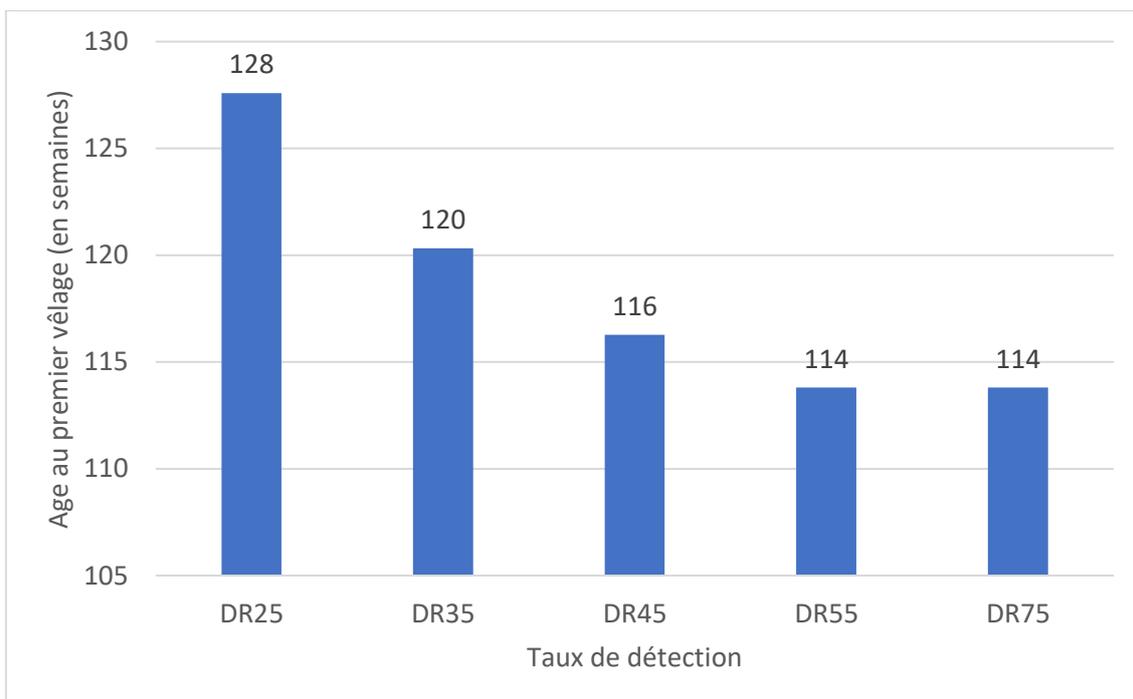


Figure 14 : Age moyen au premier vêlage en fonction du taux de détection

III.1.b. Score de boiterie (LS)

Dans les trois scénarios de boiteries choisis, les prévalences moyennes des boiteries sont de 0,065 pour LS0 (prévalence basale faible), 0,313 pour LS1 (prévalence modérée) et 0,489 pour LS2 (prévalence élevée) (Figure 15). Le modèle reproduit donc très bien les scénarios de boiteries programmés.

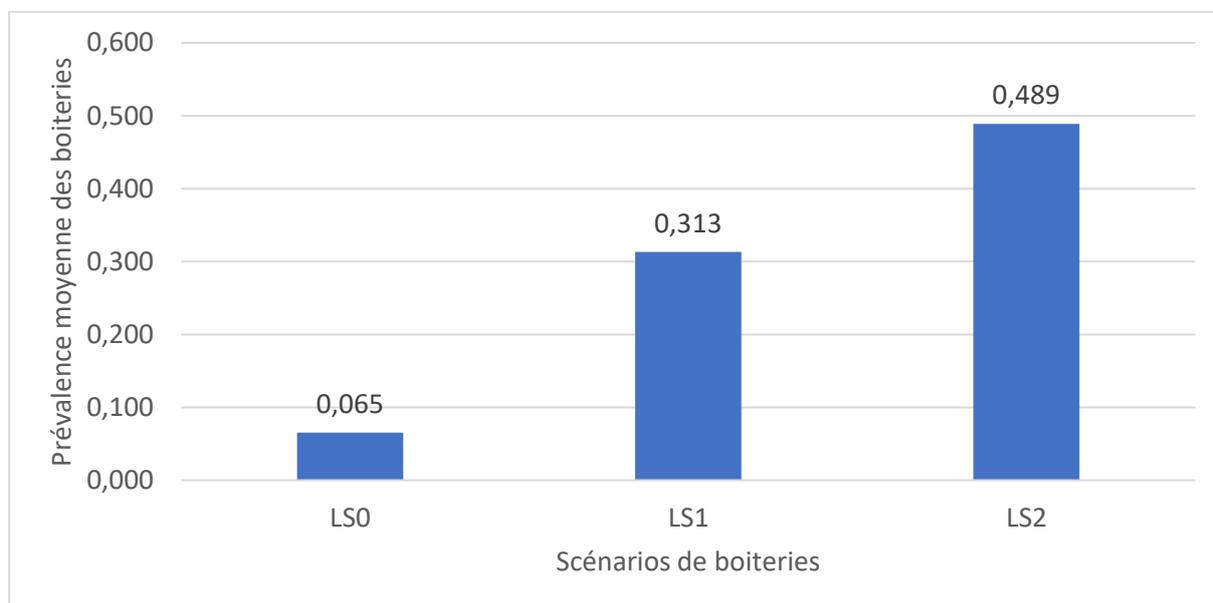


Figure 15 : Prévalence moyenne des boiteries en fonction des scénarios de boiteries

La quantité de lait produit annuellement par le troupeau diminue lorsque la prévalence en boiterie augmente, une perte moyenne de 65 502 L de lait est mise en évidence (Figure 16). L'impact reste néanmoins plus limité que pour le taux de détection.

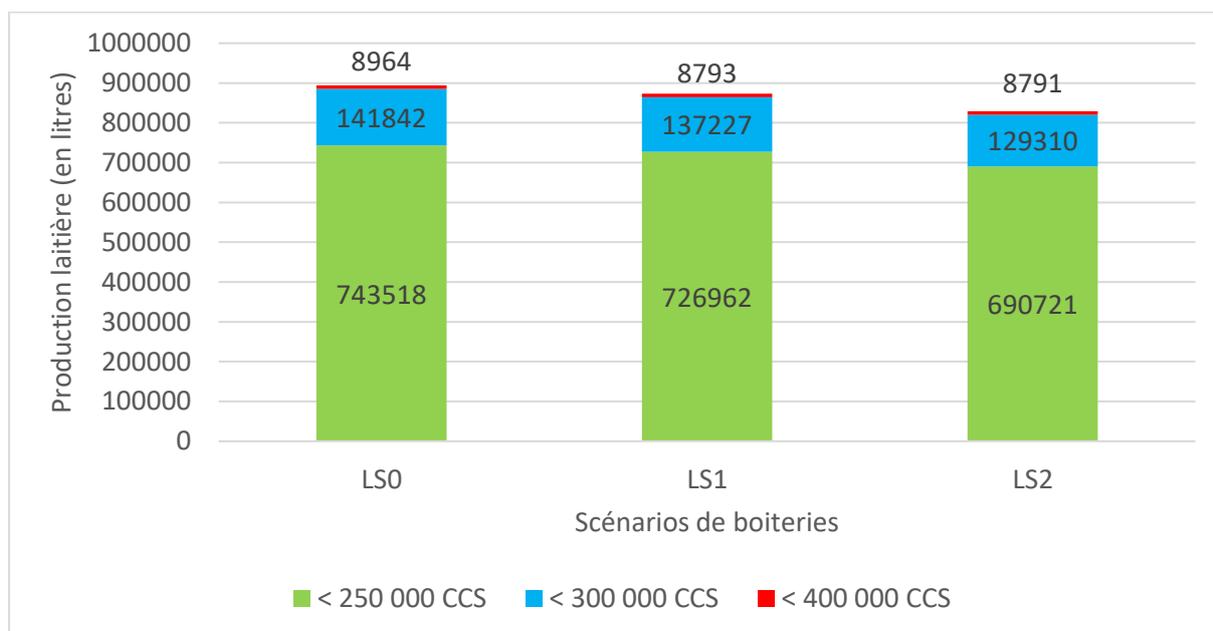


Figure 16 : Production laitière moyenne annuelle en fonction des CCS et en fonction des scénarios de boiteries

L'augmentation de la prévalence des boiteries engendre un léger surcroît du nombre de vaches réformées et d'autant plus pour le critère Boiteries (Figure 17). La première cause de réforme reste toutefois la production laitière.

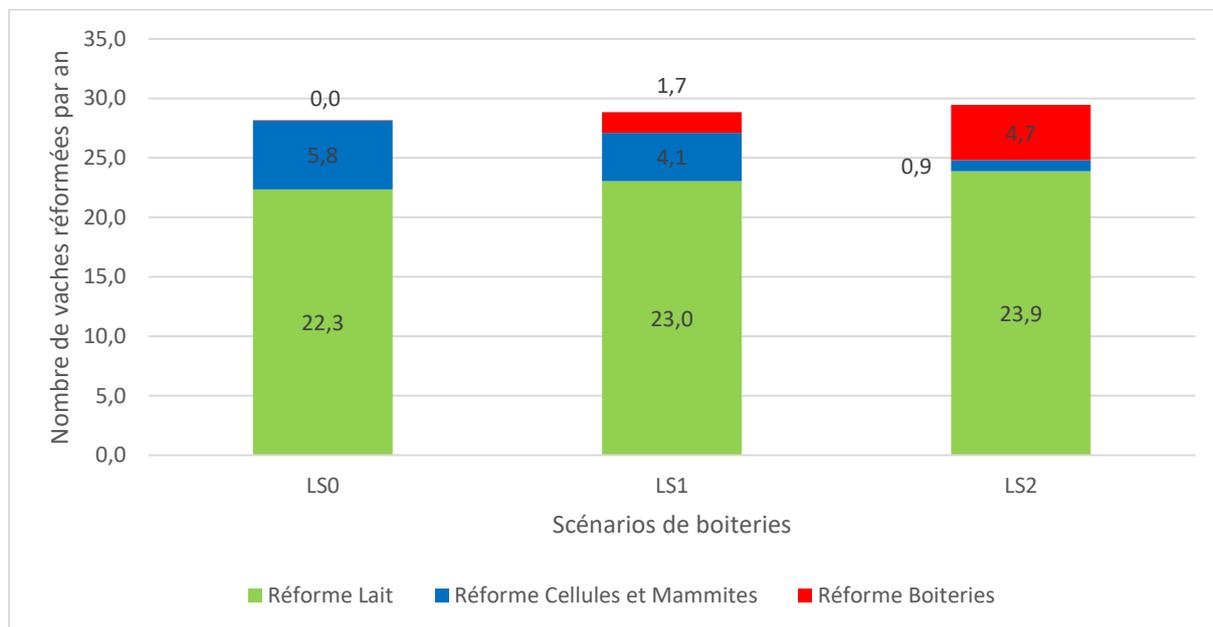


Figure 17 : Nombre de vaches réformées et sa répartition en fonction du critère de réforme et en fonction des scénarios de boiteries

Ainsi, le nombre génisses vendues diminue, avec un écart de 3,6 génisses prêtes à vêler par an (Figure 18).

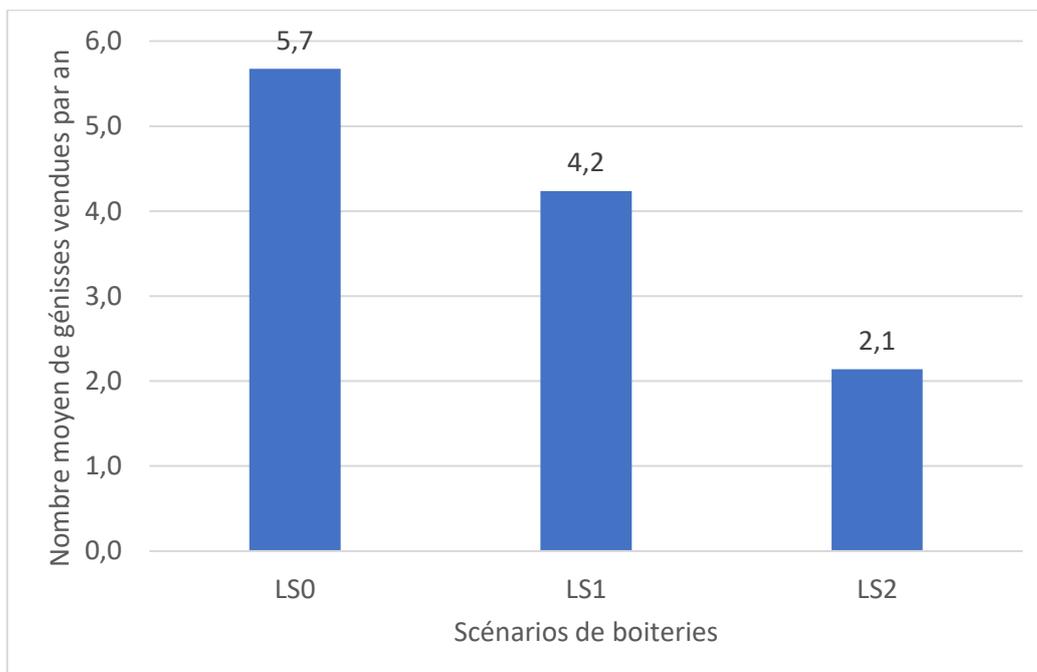


Figure 18 : Nombre moyen de génisses vendues annuellement en fonction des scénarios de boiteries

Plus la prévalence en boiteries est importante, plus les prévalences des cycles ovariens interrompus, des prolongements de cycles ovariens et des cycles atypiques augmentent. Cependant, la prévalence des cycles retardés reste inchangée (Figure 19).

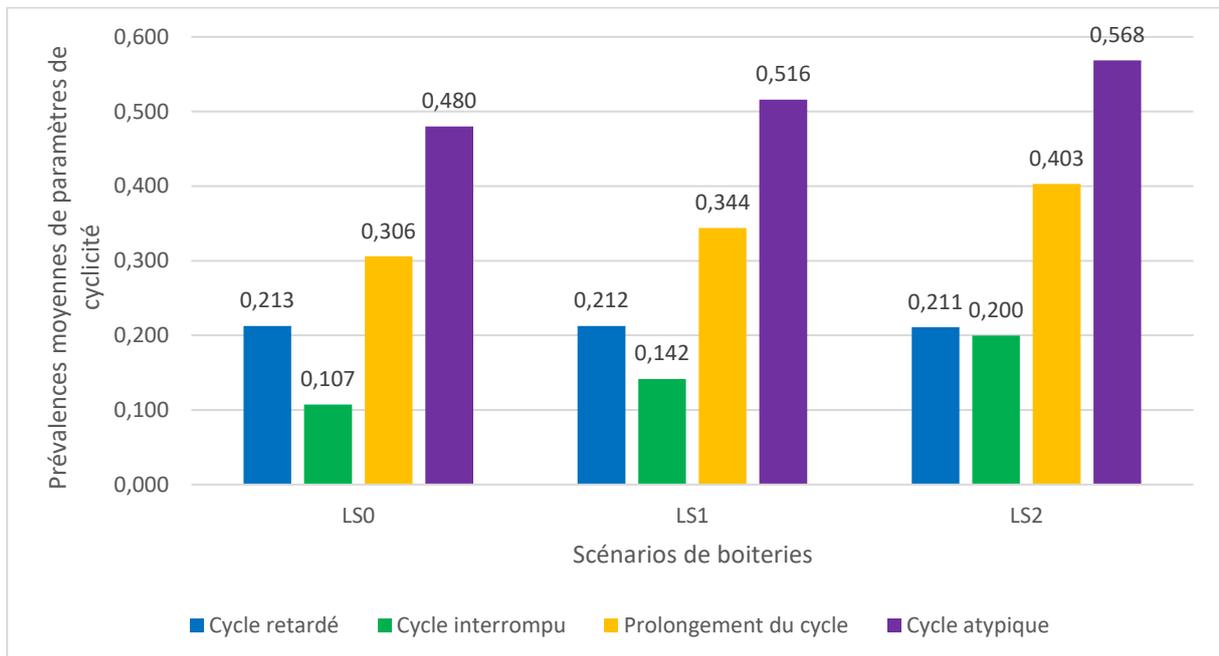


Figure 19 : Prévalences moyennes des paramètres de reproduction liés à la cyclicité ovarienne en fonction des scénarios de boiteries

L'IVV augmente en moyenne de 10,7 jours entre une prévalence de boiterie faible et élevée (Figure 20) mais présente une plus forte variabilité lorsque la prévalence augmente (Figure 21).

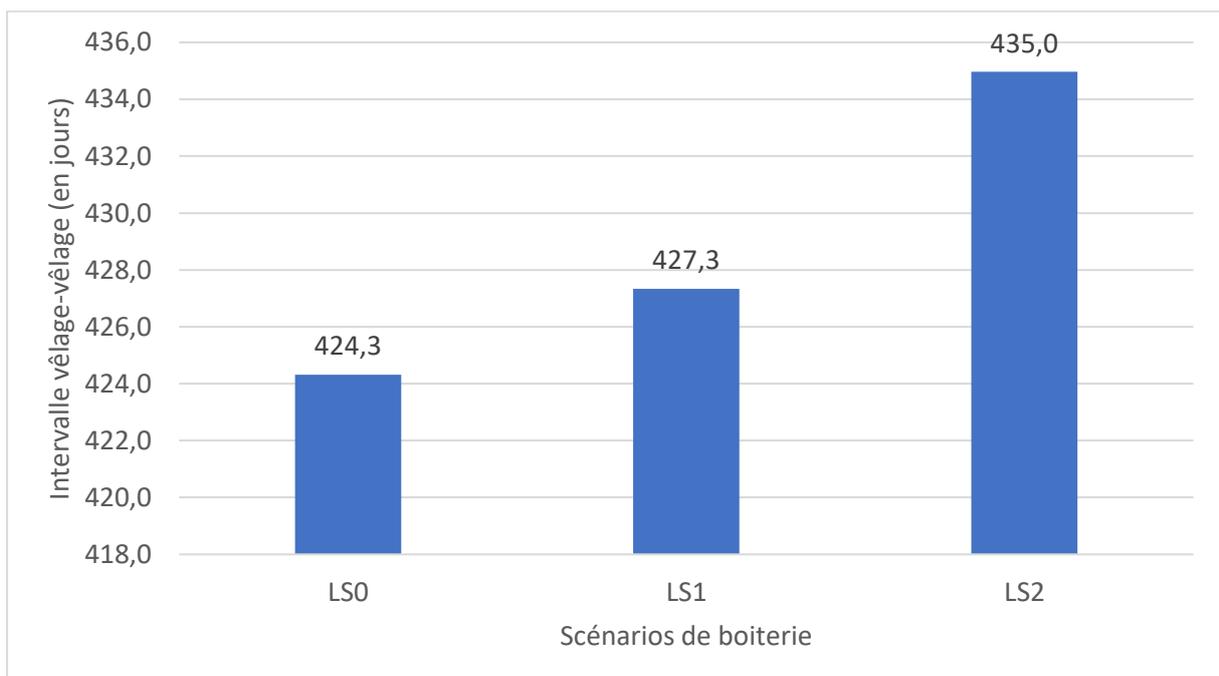


Figure 20 : Intervalle vêlage-vêlage moyen en fonction des scénarios de boiteries

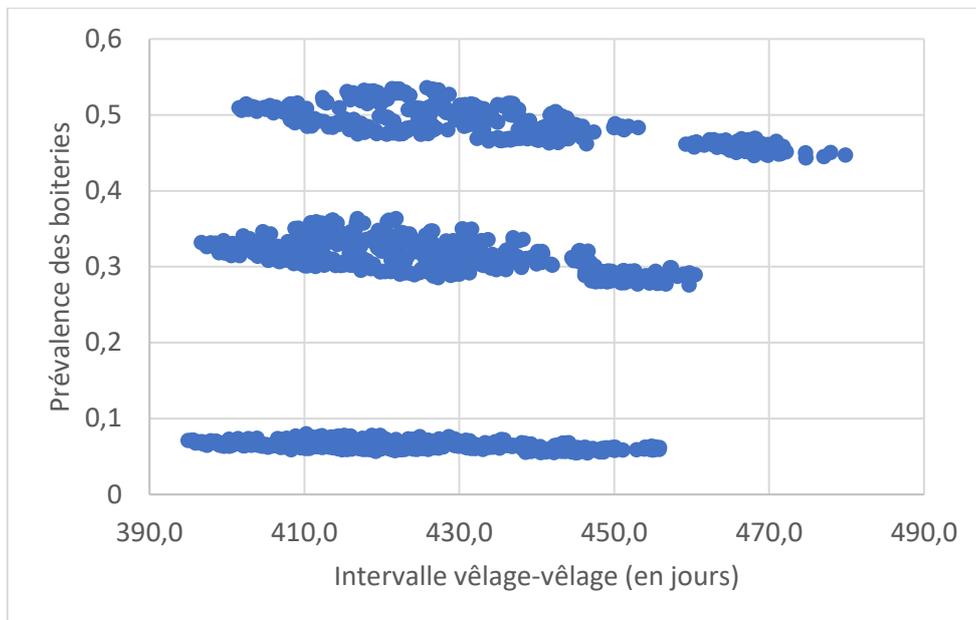


Figure 21 : Intervalle vêlage-vêlage en fonction de la prévalence des boiteries

Le remplissage du bâtiment des vaches en lactation est plus difficile à optimiser lorsque la prévalence des boiteries dans l'élevage est importante (Figure 22) avec une sous densité relative jusqu'à 8,4 vaches, parfois n'atteignant jamais l'optimum lorsque la prévalence en boiteries est élevée (Figure 23).

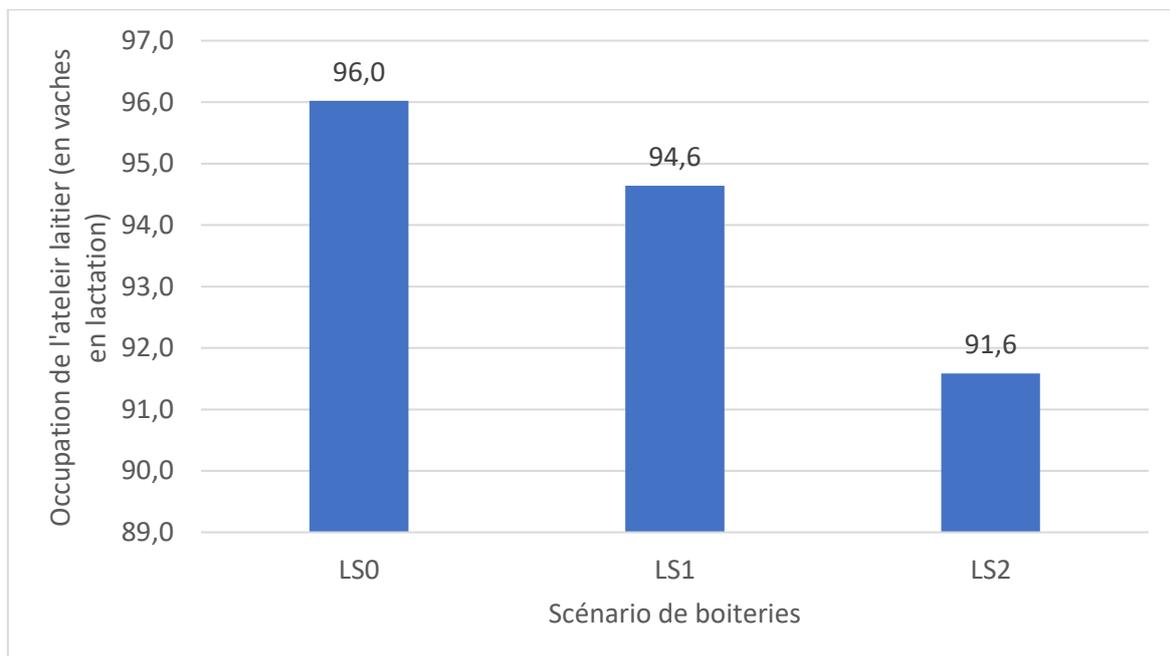


Figure 22 : Occupation de l'atelier laitier par des vaches en lactation en fonction des scénarios de boiteries

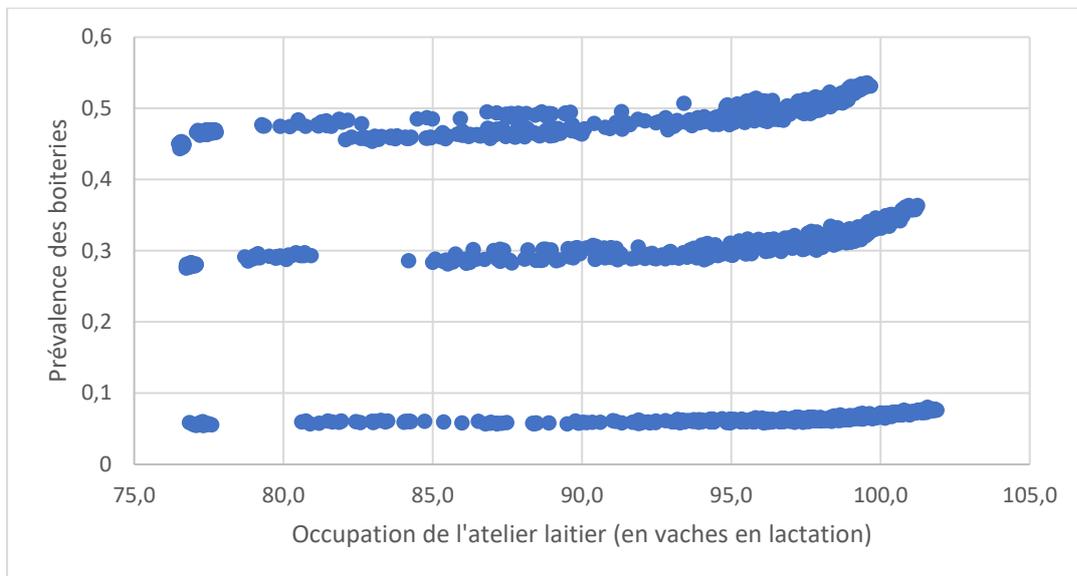


Figure 23 : Prévalence des boiteries en fonction de l'occupation de l'atelier laitier par des vaches en lactation

Le taux de renouvellement est impacté par conséquent avec taux qui augmente en moyenne de 3,5 % (Figure 24) et qui ne sera jamais inférieur à 33 % contrairement à une prévalence basale où le taux de renouvellement peut frôler les 25 % (Figure 25).

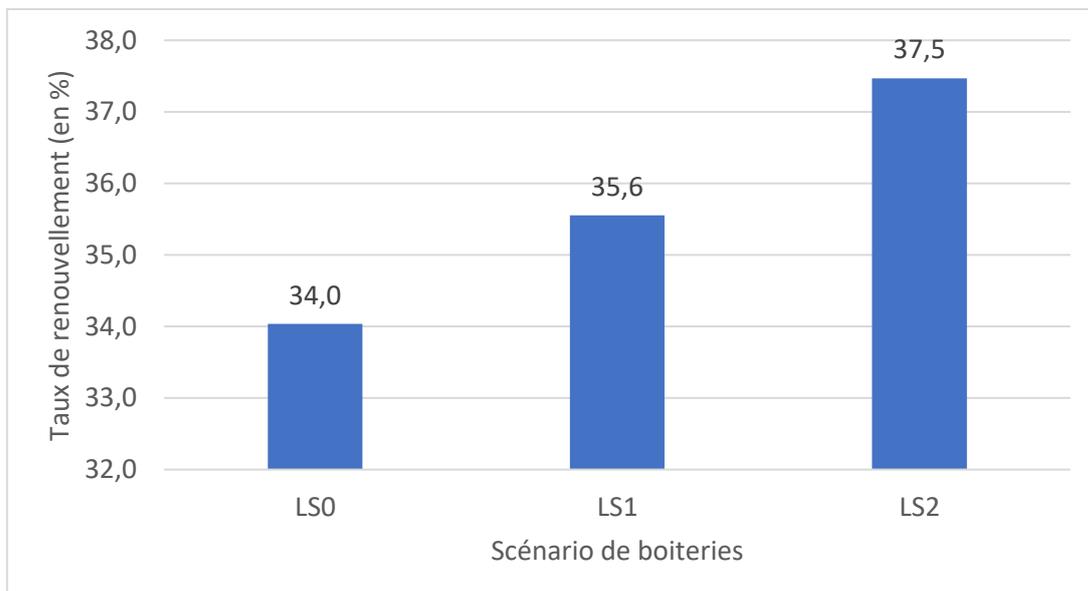


Figure 24 : Taux de renouvellement moyen en fonction des scénarios de boiteries

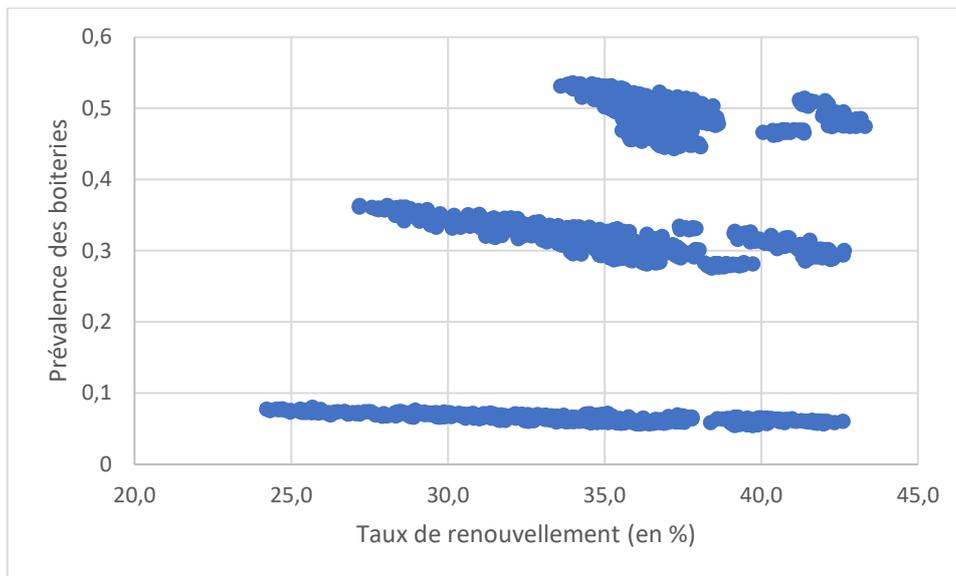


Figure 25 : Prévalence des boiteries en fonction du taux de renouvellement

III.1.c. Hygiène (H)

L'hygiène détériore le taux de renouvellement d'environ 2% lorsque l'hygiène est médiocre (Figure 26).

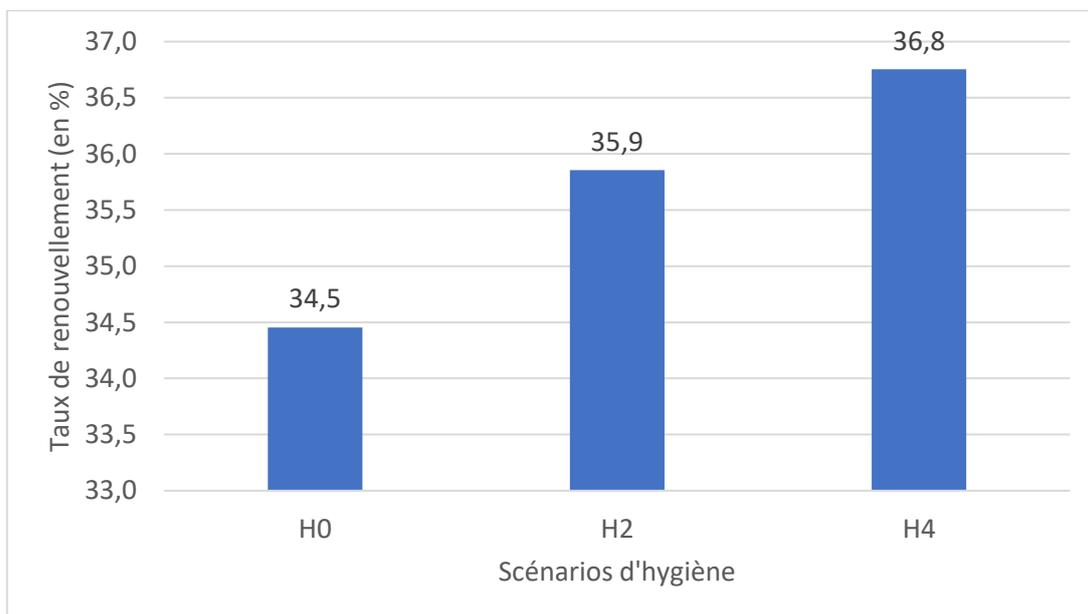


Figure 26 : Taux de renouvellement moyen en fonction des scénarios d'hygiène

La production laitière est diminuée en quantité (perte de 59 369 L) et surtout en qualité, en effet plus de la moitié du lait produit a un CCS > 250 000 (Figure 27). La différence observée entre H2 et H4 est en lien avec les prévalences et incidences très différentes des mammites cliniques et subcliniques (cf infra).



Figure 27 : Production laitière moyenne annuelle en fonction des CCS et des scénarios d'hygiène

Lorsque l'hygiène des bâtiments et lors de la traite est diminuée passant du scénario H0 à H4, la prévalence des mammites cliniques fait plus que doubler et atteignant 0,72 (Figure 28), l'incidence des mammites cliniques est multipliée par 6 soit environ 2,60 pour H4 (Figure 29). Le nombre moyen de mammites cliniques par vache et par lactation approxime 3,6 pour H4 avec un écart de 2,3 avec H0 (Figure 30).

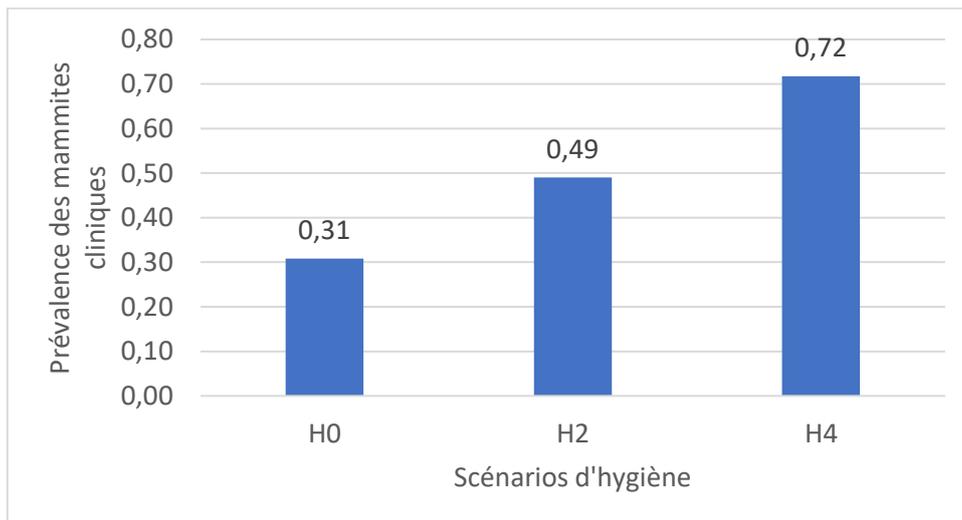


Figure 28 : Prévalence moyenne des mammites cliniques en fonction des scénarios d'hygiène

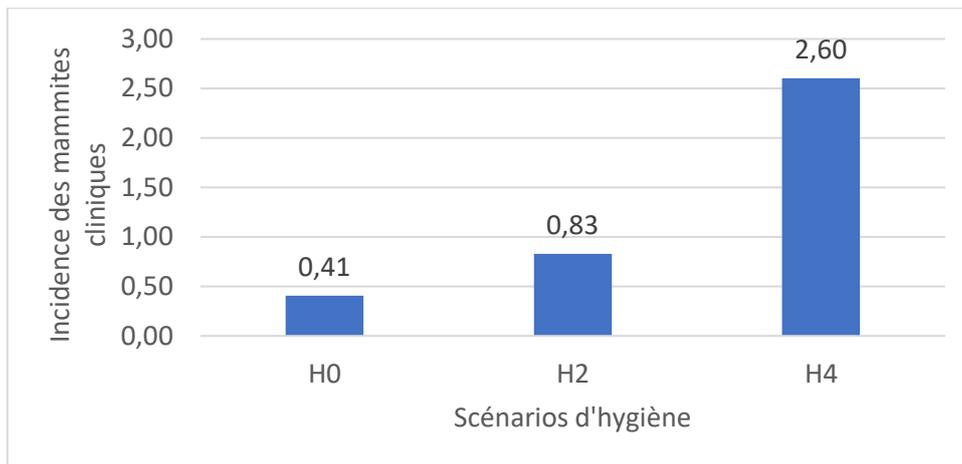


Figure 29 : Incidence des mammites cliniques en fonction des scénarios d'hygiène

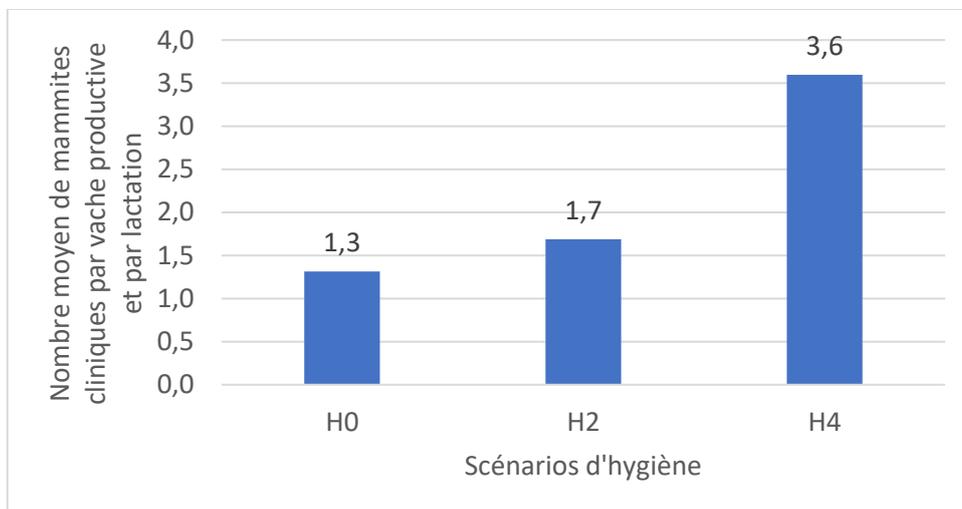


Figure 30 : Nombre moyen de mammites cliniques par vache en lactation et par lactation en fonction des scénarios d'hygiène

Plus l'hygiène est dégradée, plus le nombre de génisses prêtes à vêler vendues est faible, en moyenne une perte de vente de 2 génisses par an (Figure 31).

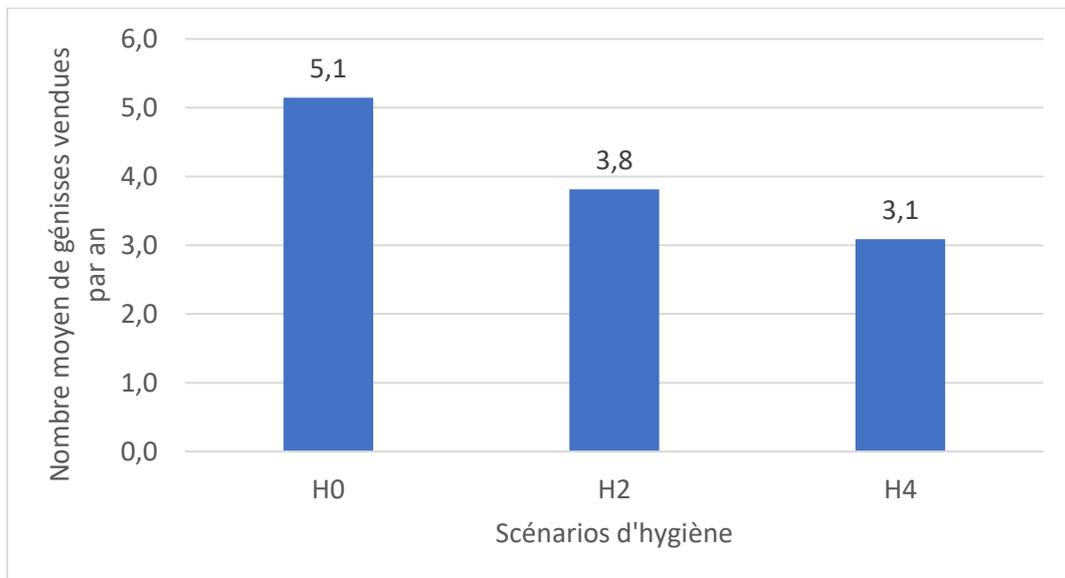


Figure 31 : Nombre moyen de génisses vendues par an en fonction des scénarios d'hygiène

Plus l'hygiène est dégradée, plus la part de vaches réformées pour cause de cellules et mammites est importante comme pour H4 où cela représente 27 % des réformes (Figure 32).

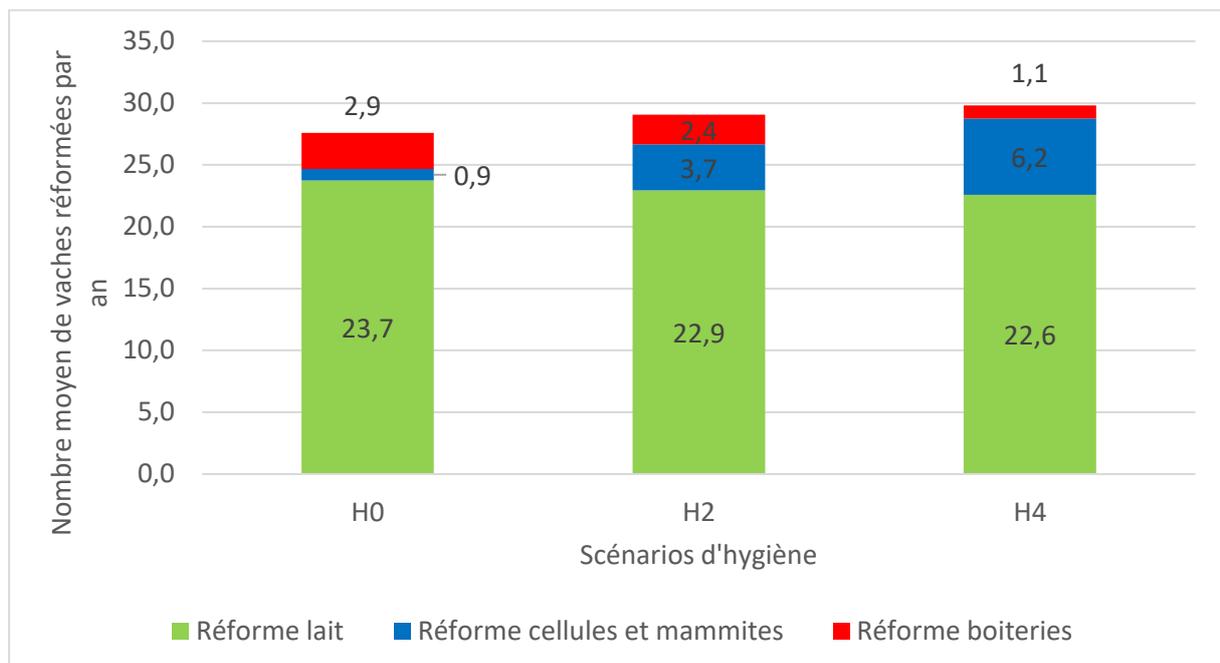


Figure 32 : Nombre moyen annuel de vaches réformées et sa répartition en fonction du critère de réforme et des scénarios d'hygiène

III.1.d. Période d'attente volontaire (VWP)

Lorsque la période d'attente volontaire augmente, passant de VWP6 à VWP12 (soit 6 semaines de plus), les taux de réussites aux inséminations sont améliorés de 2,5 à 3 % (Figure 33), or, l'IVV n'augmente que de 8,9 jours en moyenne (Figure 34).

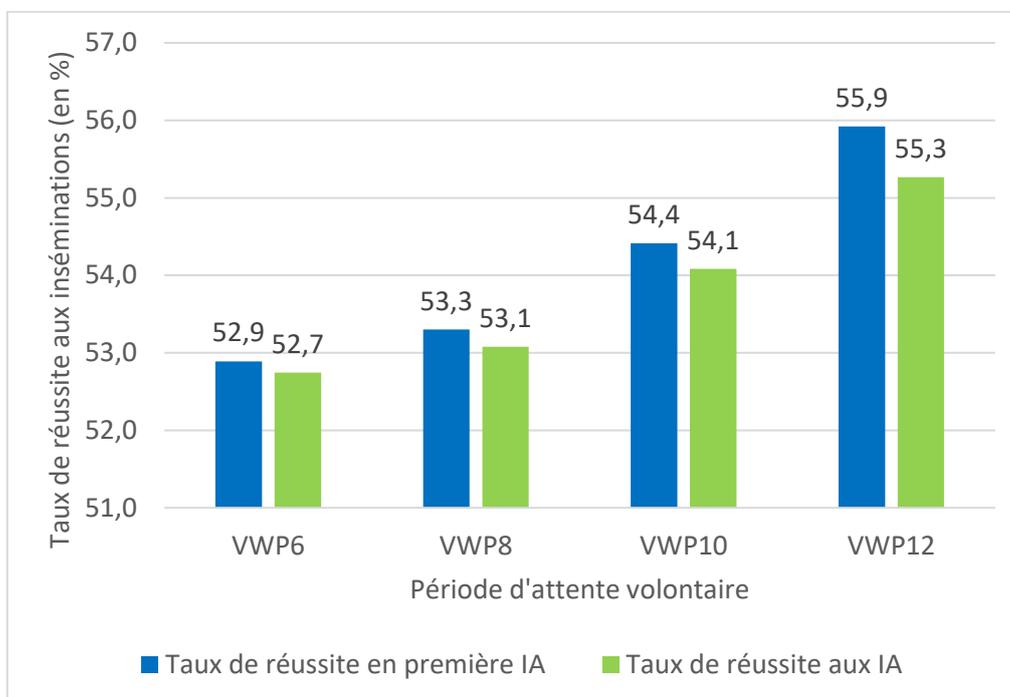


Figure 33 : Taux de réussite des inséminations en fonction de la période d'attente volontaire

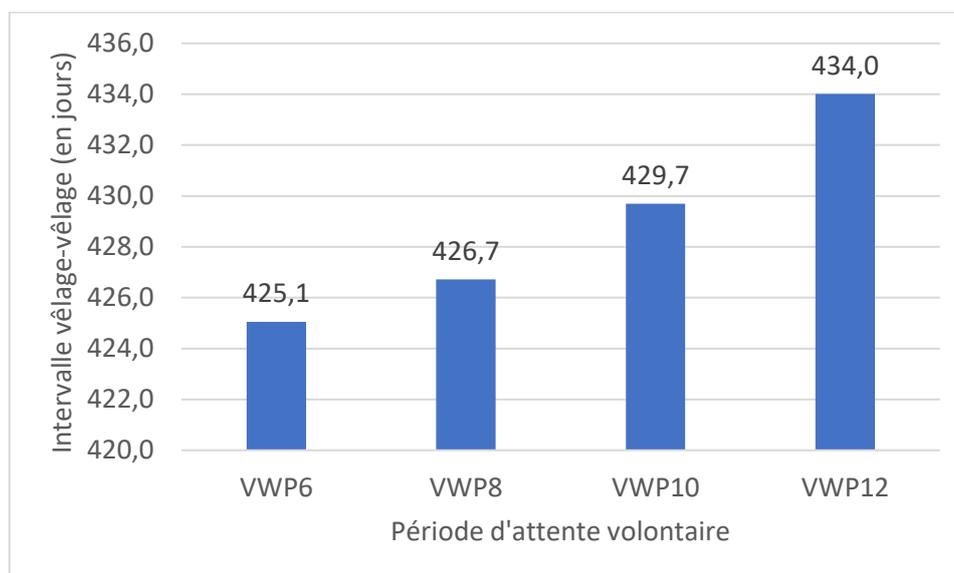


Figure 34 : Intervalle vêlage-vêlage moyen en fonction de la période d'attente volontaire

III.1.e. Stratégies de réforme (PC)

L'IVV est plus court pour les stratégies de réforme PC0 et PC2 de quelques jours (Figure 35). La durée de lactation est plus longue d'environ 2 semaines pour les règles de réforme plus souples sur les critères de reproduction comme PC1, PC2 et PC3 (Figure 36). Ces résultats montrent que l'éligibilité à la pré-réforme DO1 et DO2 (qui sont les plus faibles dans PC0 et PC1) a un impact important sur l'IVV (Figure 35).

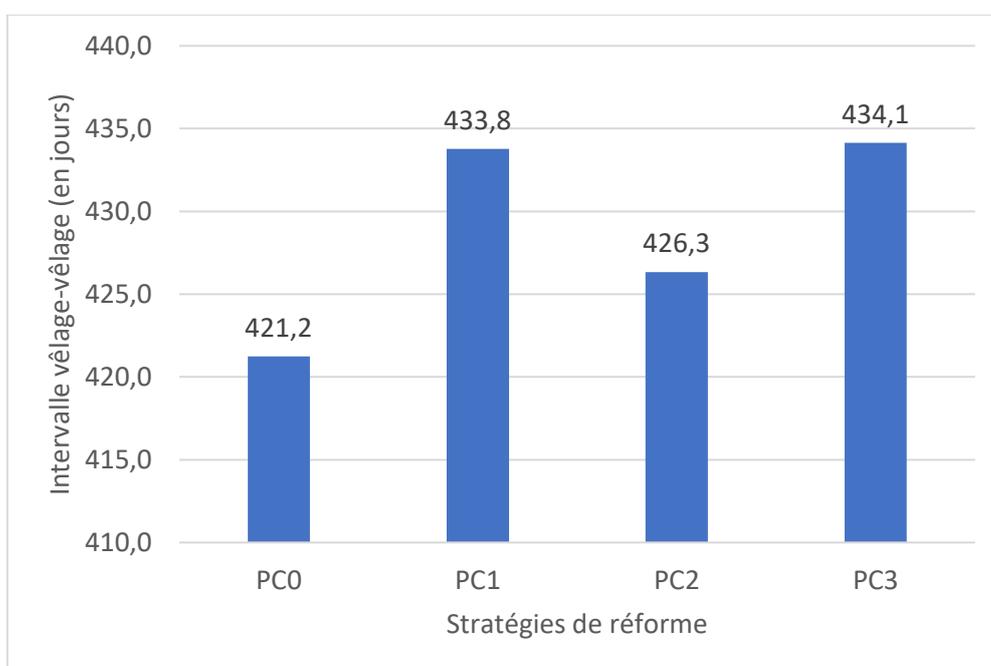


Figure 35 : Intervalle vêlage-vêlage moyen en fonction des stratégies de réforme

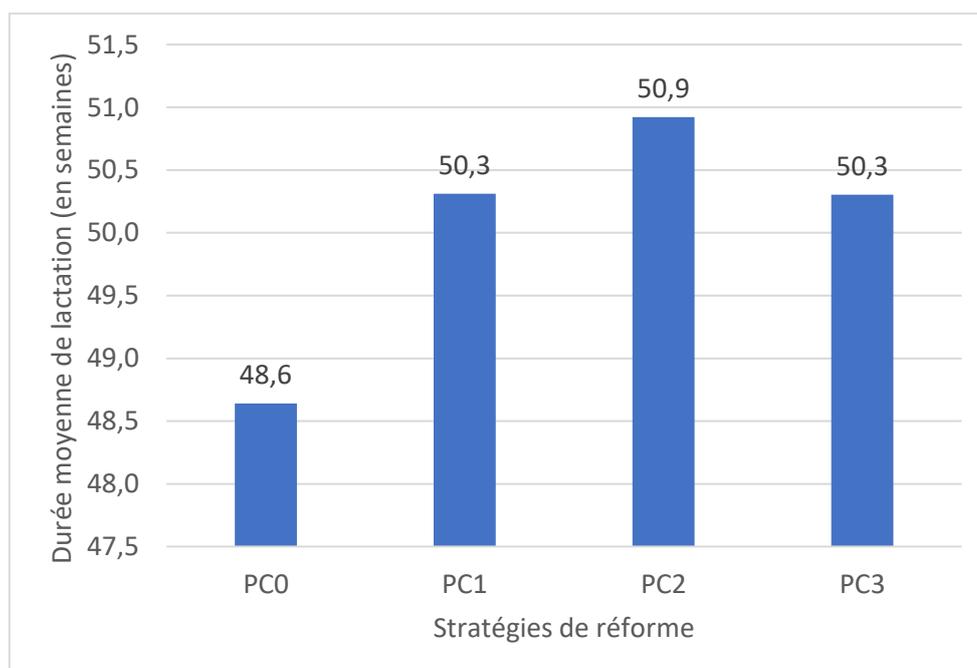


Figure 36 : Durée moyenne de lactation en fonction des stratégies de réforme

Les vaches boiteuses, avec des cellules et/ou mammites peuvent représenter une très grande partie (plus de la moitié) des vaches réformées dans certains scénarios (Figure 37, Figure 38).

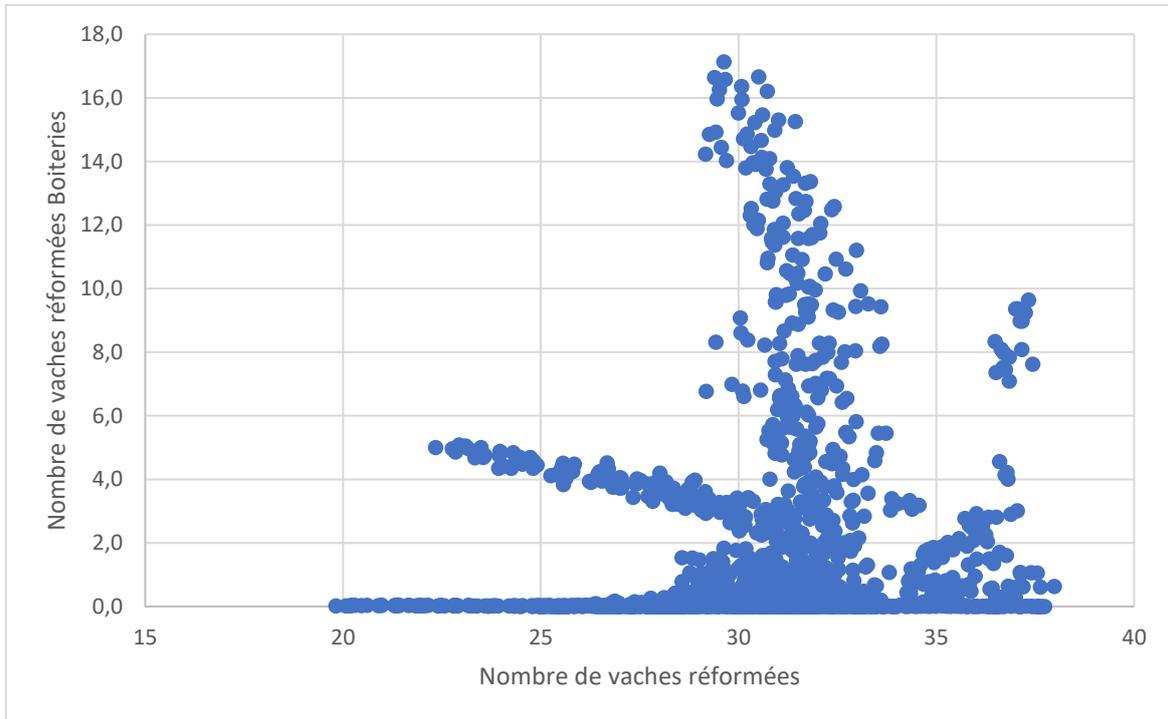


Figure 37 : Nombre de vaches réformées Boiteries en fonction du nombre total de vaches réformées

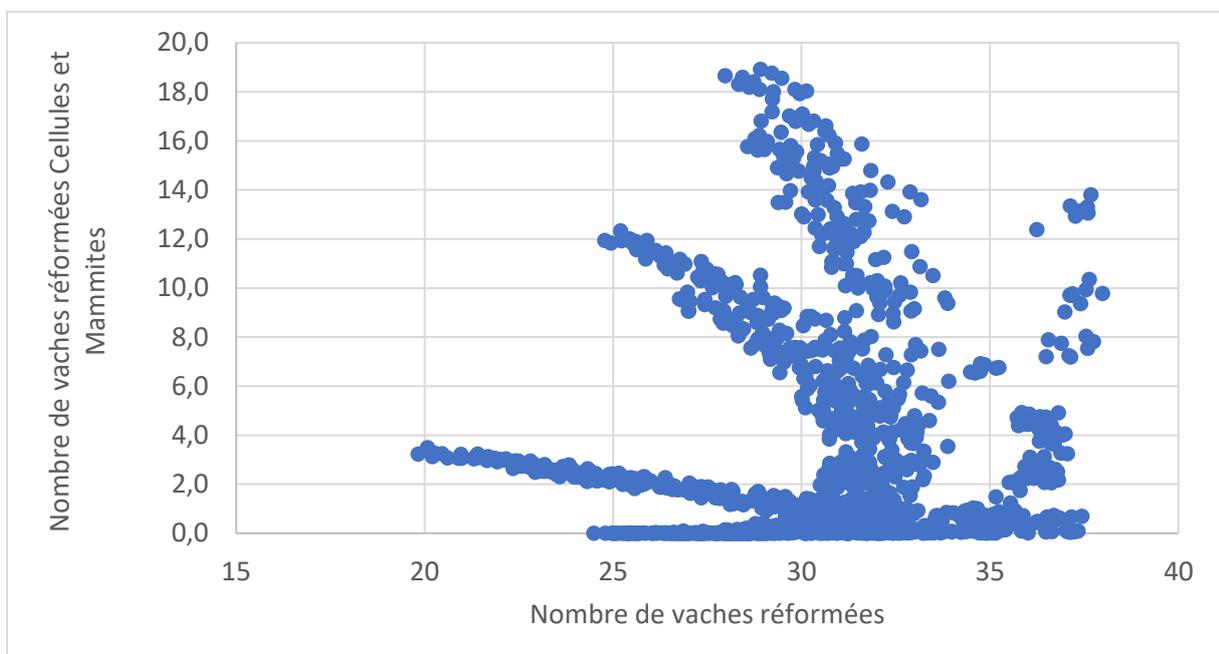


Figure 38 : Nombre de vaches réformées Cellules et Mammites en fonction du nombre total de vaches réformées

Certains scénarios possèdent donc une majorité ou une minorité ou une absence de vaches réformées pour cause de boiterie ou de cellules et/ou mammites (Figure 39).

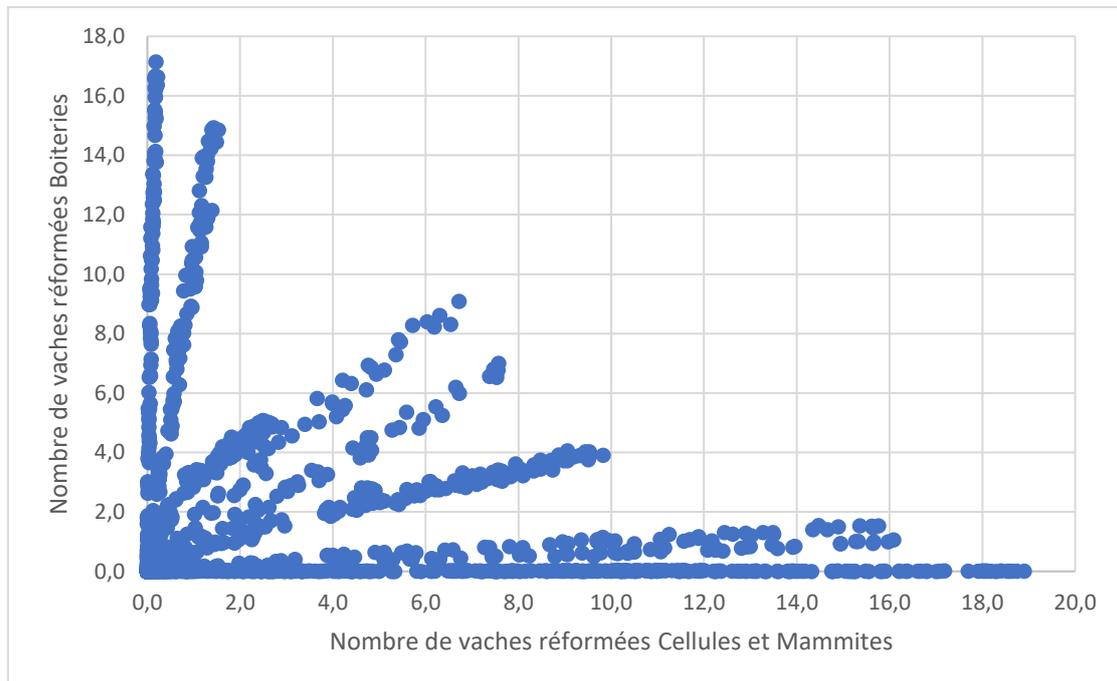


Figure 39 : Nombre de vaches réformées Boiteries en fonction du nombre de vaches réformées Cellules et Mammites

L'occupation de l'atelier laitier est très stable (autour de 100) jusqu'à un seuil de 27 % de renouvellement (Figure 40). Au-delà de 27 %, la taille du troupeau en lactation peut-être fortement affecté, en effet, pour un taux de renouvellement de 30%, le nombre de vache productive peut varier de 76,5 à 99,5. Ainsi la production laitière suit la même tendance, plus le taux de réforme est élevé, plus la quantité de lait produit annuellement chute (Figure 41).

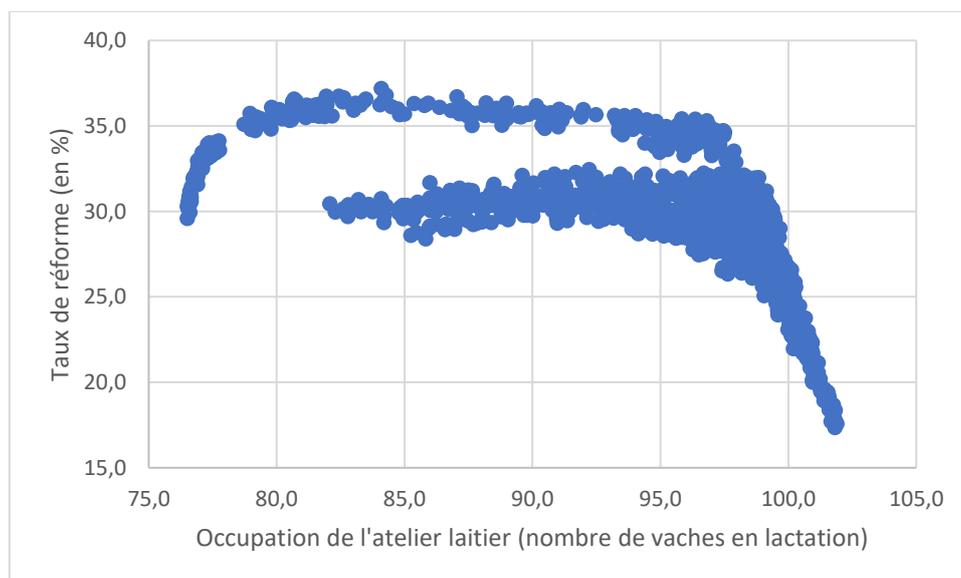


Figure 40 : Occupation de l'atelier laitier en fonction du taux de réforme

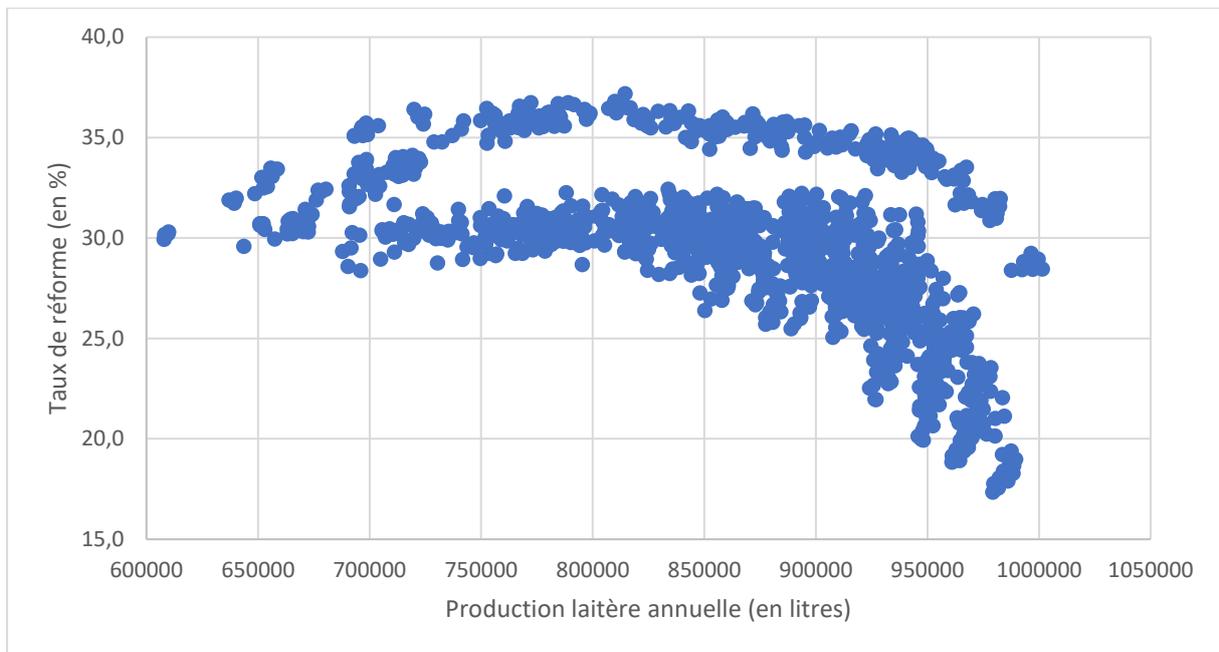


Figure 41 : Production laitière annuelle en fonction du taux de réforme

La vente de génisses prêtes à vêler varie proportionnellement au taux de réforme. En effet, un taux de réforme faible implique un besoin en génisses de renouvellement moindre (Figure 42). Ainsi, le nombre de génisses prêtes à vêler vendues est plus élevé.

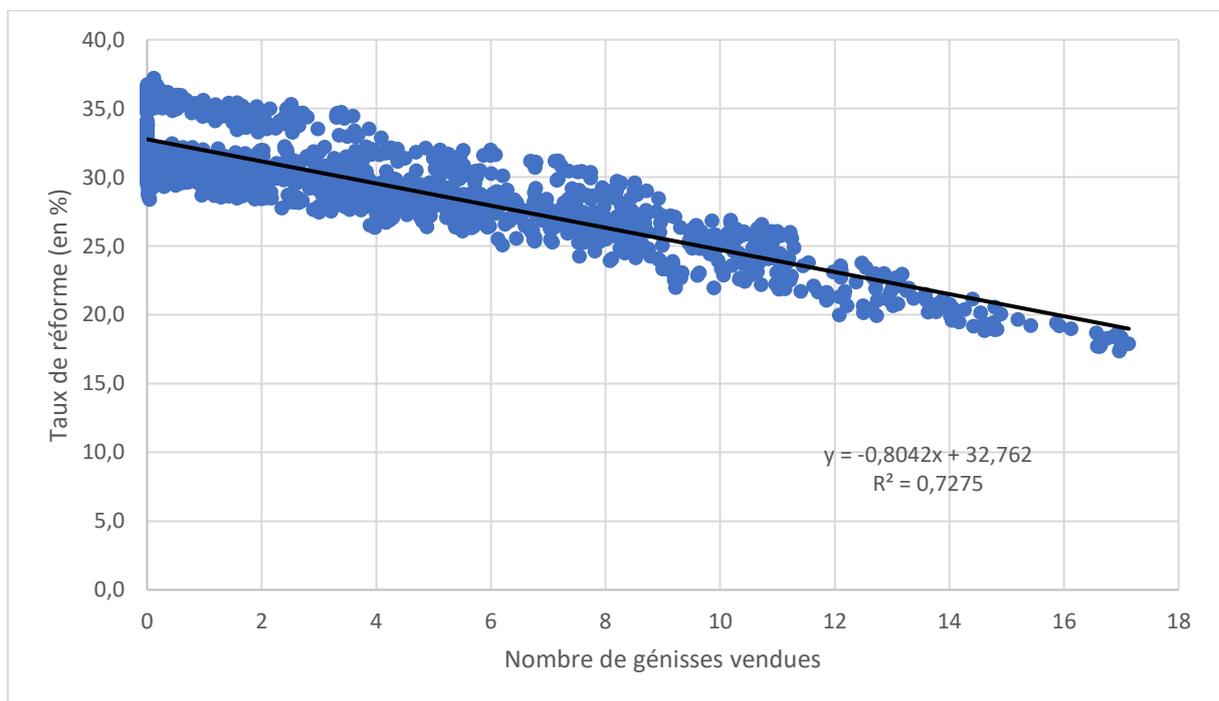


Figure 42 : Nombre de génisses vendues par an en fonction du taux de réforme

La semaine de vie productive représente la durée cumulée des lactations en semaines. Le nombre moyen de semaines de vie productives du troupeau varie de 119 à 222 semaines dans les différents scénarios (Figure 43). Cet indicateur est un proxy de la longévité des vaches. Celui-ci est fortement corrélé au taux de réforme dans cette étude. En effet, il est d'autant plus élevé que le taux de réforme est faible.

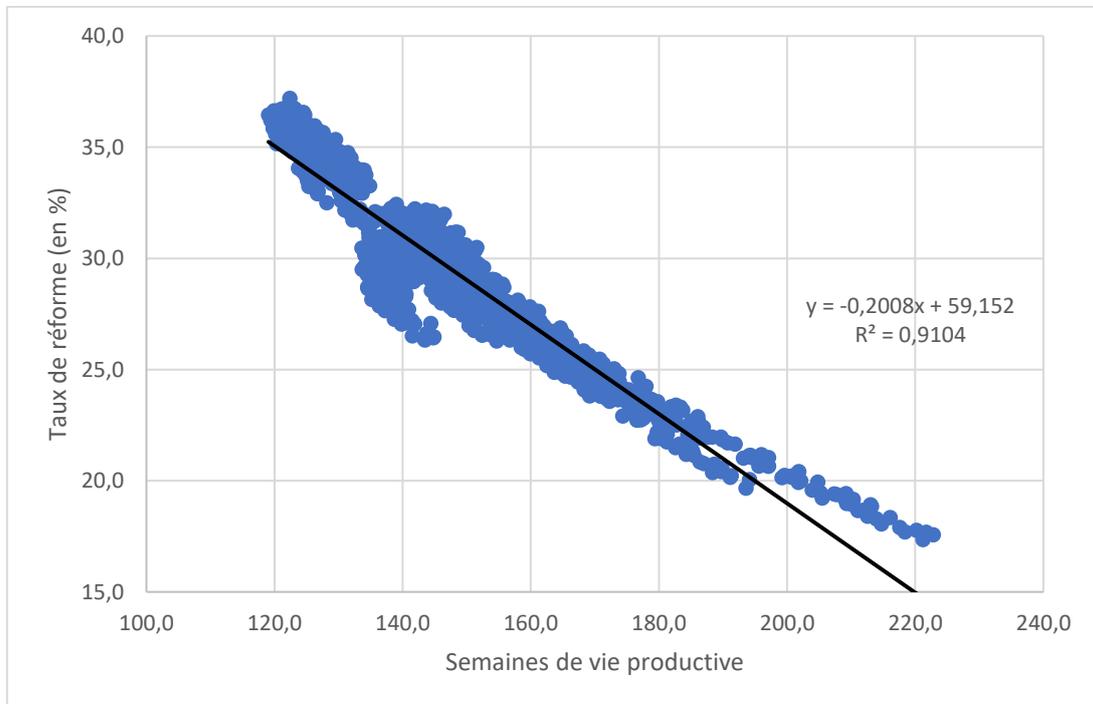


Figure 43 : Semaines de vie productive en fonction du taux de réforme

III.1.f. Production laitière et vente de génisses

La tendance à une production plus élevée pour les IVV courts, sur la gamme d'IVV de 400-470 jours, est observée (Figure 44). Mais pour un IVV donné, la production totale varie beaucoup (jusqu'à 30%) limitant l'intérêt de cet indicateur pris de manière isolé.

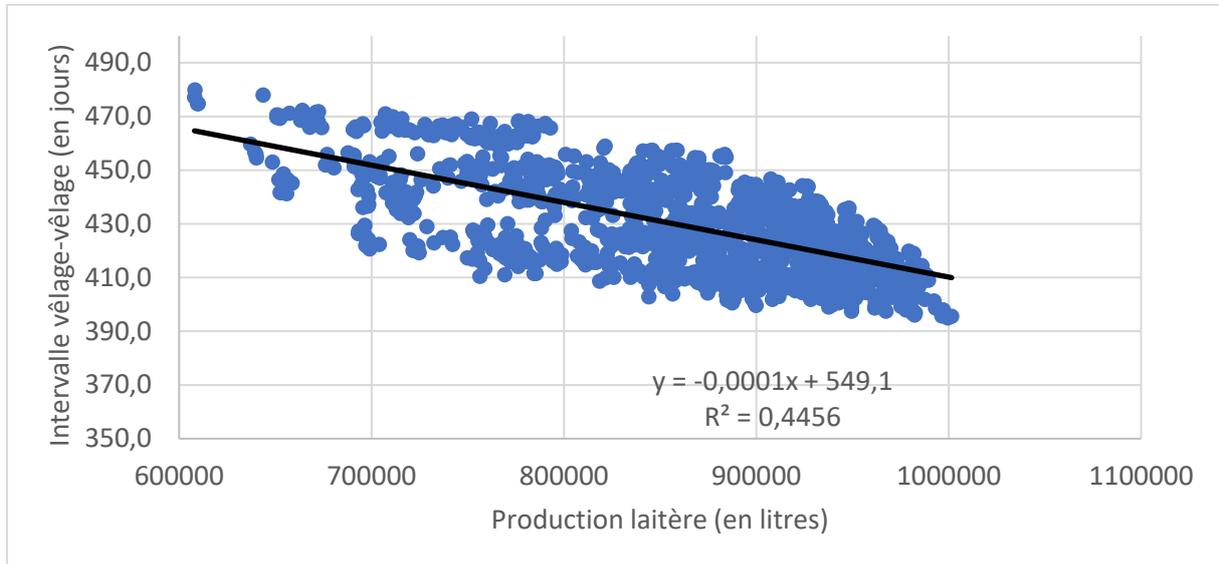


Figure 44 : Intervalle vêlage-vêlage en fonction de la production laitière annuelle

La longévité (semaines de vie dans l'élevage, de la naissance à la réforme ou mort) permet une production laitière élevée de l'élevage, mais des niveaux comparables de production laitière sont aussi observés avec des longévités plus faibles (Figure 45).

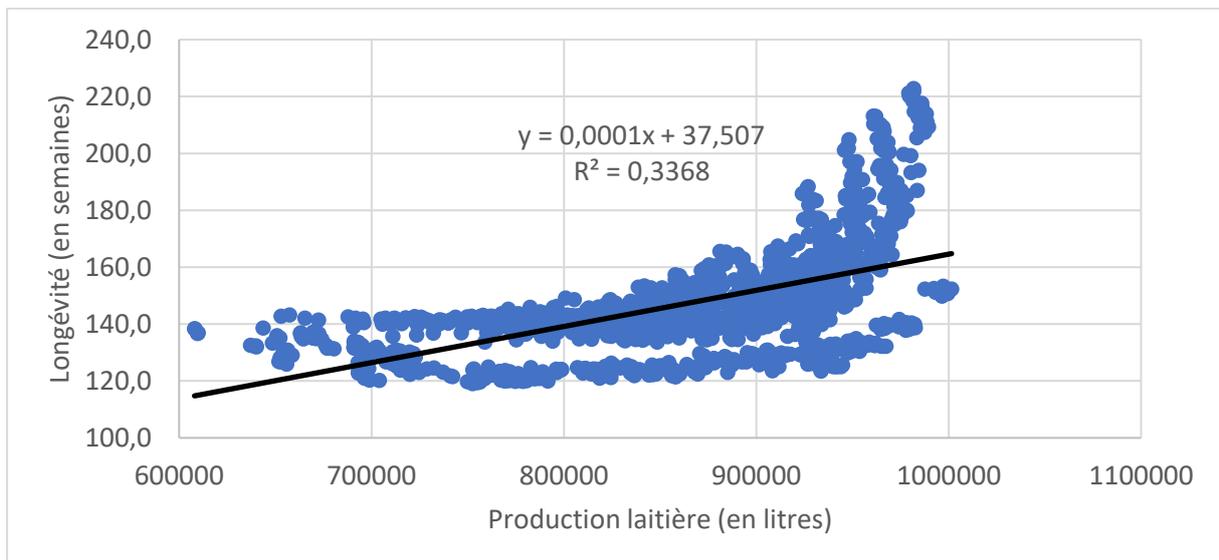


Figure 45 : Longévité en fonction de la production laitière annuelle

La production laitière est optimisée et augmente quand l'occupation de l'atelier laitier est totale (Figure 46). Toutefois, un niveau d'occupation optimal (100 vaches) ou suboptimal (>90-95) est associé

à une grande disparité de niveaux de production, montrant que la limite de ce seul critère pour caractériser la situation productive.

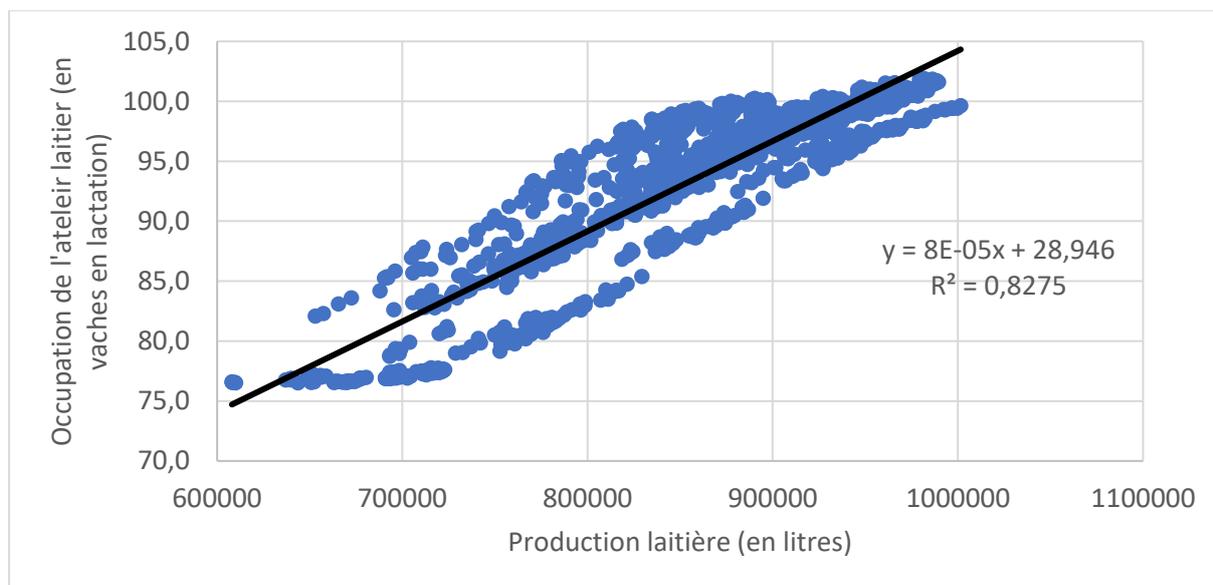


Figure 46 : Occupation de l'atelier laitier par des vaches en lactation en fonction de la production laitière annuelle

Plus le taux de renouvellement est élevé, plus le nombre de génisses vendues tend vers 0. Pour un taux de 25 %, l'élevage peut espérer vendre jusqu'à 17 génisses prêtes à vêler (Figure 47).

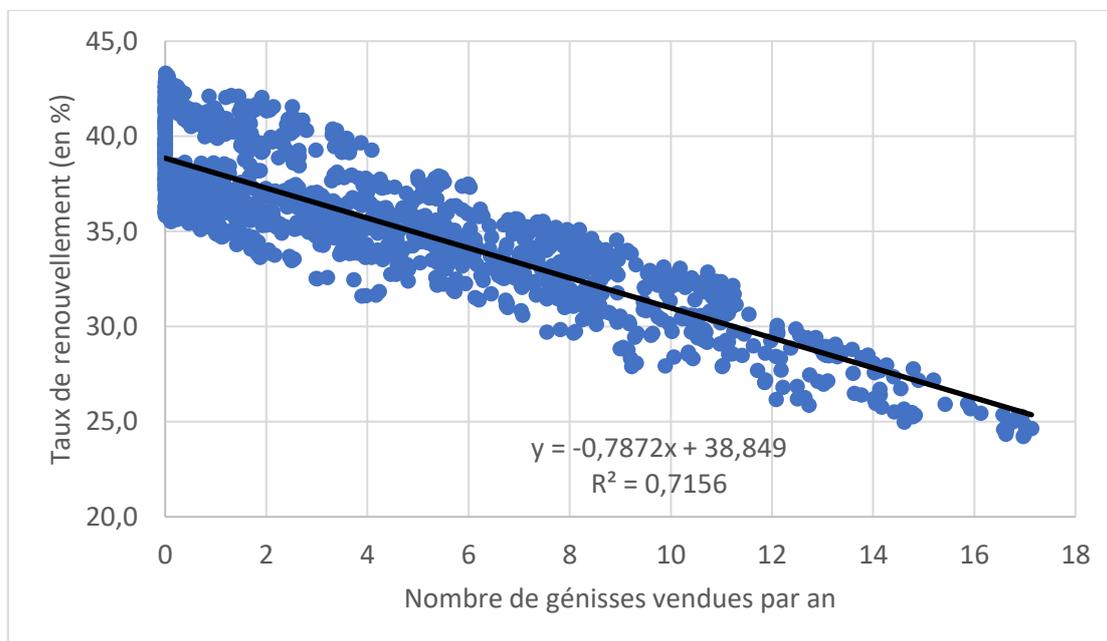


Figure 47 : Taux de renouvellement en fonction de la vente de génisses

III.2. Analyse économique

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

Dans un premier temps, le modèle économique permet d'identifier le scénario optimal pour les 1 152 combinaisons de contraintes (Tableau 2) quand les objectifs peuvent être remplis, sinon la résolution est infaisable. Parmi les 1 152 combinaisons, 673 sont faisables pour lesquels 24 scénarios de gestion (sur 1 440 simulés) remplissent les objectifs/critères d'optimisation (temps d'observation, temps de travail, réduction de l'utilisation des antibiotiques et longévité).

Parmi les 1 440 scénarios simulés dans cette étude (Figure 3), pour optimiser 1 152 combinaisons de contraintes possibles (Tableau 2), 673 combinaisons ont été pourvues d'un scénario optimal (soit 479 combinaisons dont les scénarios optimaux sont indéterminables). Sur ces 673 combinaisons de contraintes où un scénario optimal a été déterminé, seulement 24 scénarios simulés (sur les 1 440) remplissent les critères d'optimisation de contraintes (temps d'observation, temps de travail, réduction de l'utilisation des antibiotiques et longévité).

Tableau 4 : Scénarios optimaux (n=673) et contraintes respectives d'optimisation

LS	Scénarios optimaux					Fréquences d'apparition du scénario*	Contraintes**			
	A	H	VWP	DR	PC		OBSTIME	GTIME	ALEA	ADULTAGE
LS0	A1	H0	VWP06	DR35	PC1	50	Obs_20			
			VWP08	DR25	PC3	42		G_35		
				DR35	PC0	9	Obs_20	G_30		
					PC2	15	Obs_20	G_30		
				DR75	PC0	38	Obs_free	G_free & G_40		
			PC2		6	Obs_free	G_free			
		VWP10	DR25	PC0	18		G_25			
				PC3	88	Obs_0 & Obs_10	G_free & G_40			
		VWP12	DR25	PC0	12		G_25		A_130	
			DR45	PC2	3	Obs_free	G_40		A_170	
	H2	VWP06	DR75	PC1	9	Obs_free		No RED	A_170	
		VWP08	DR75	PC2	16	Obs_free		No RED		
		VWP10	DR75	PC0	9	Obs_free		No RED	A_140	
		VWP12	DR35	PC3	63	Obs_20		No RED		
A2	H2	VWP06	DR75	PC0	36	Obs_free		No RED		
		VWP12	DR25	PC1	108			No RED		
LS1	A1	H0	VWP08	DR55	PC0	12	Obs_free	G_35		
				DR75	PC2	3	Obs_free	G_40		A_160
	A2	H0	VWP12	DR25	PC2	36		G_30		
LS2	A1	H0	VWP08	DR35	PC0	18		G_25		
				VWP12	DR55	PC0	9	Obs_free	G_30	
		PC2	3			Obs_free	G_35		A_140	
		H2	VWP06	DR25	PC0	64			RED_10	
	A2	H0	VWP08	DR35	PC2	6		G_30		A_130

Obs_20 = OBSTIME_20 ; Obs_free = OBSTIME_Free ; G_35 = GTIME_35 ; G_30 = GTIME_30 ; G_free = GTIME_Free ; G_40 = GTIME_40 ; G_25 = GTIME_25 ; No RED = ALEA_NoRED ; RED_10 = ALEA_RED10 ; A_130 = ADULTAGE_130w ; A_170 = ADULTAGE_170w ; A_140 = ADULTAGE_140w ; A_160 = ADULTAGE_160w

* Fréquence d'apparition du scénario optimal cité en fonction de l'optimisation les contraintes

**Sous-contrainte dans laquelle le scénario indiqué optimise le mieux la contrainte. Les *cases vides* sont la liste exhaustive d'une partie des sous contraintes afin d'améliorer la lisibilité du tableau.

Le Tableau 4 illustre les scénarios de gestion optimaux pour chaque combinaison de contraintes en mentionnant la principale sous-contrainte optimisée (dans chaque contrainte), au minimum une sous-contrainte principale est déterminée.

On peut remarquer dans le Tableau 4 que les DR55 et DR75 du modèle optimisent toujours sur le temps d'observation des chaleurs (ce qui est en accord avec la contextualisation et la scénarisation du modèle) et uniquement sur la sous-contrainte Obs_free (temps d'observation sans aucune contrainte de temps).

H0 optimise sur la contrainte charge de travail alors que H2 optimise sur les ALEA.

La contrainte de longévité est souvent optimisée en seconde ou en complémentarité d'une autre contrainte.

Aucun scénario H4 n'est représenté parmi les scénarios optimaux, toutefois H0 est déterminé dans 55% des cas. LS0 représente plus des ¾ des scénarios (77,5%) optimaux pour la contextualisation boiterie.

III.2.b. Analyse des revenus

III.2.b.1. Sur les 1 440 scénarios simulés

Tableau 5 : Gain différentiel par heure travaillée des 10 scénarios les plus rentables

LS	A	H	VWP	DR	PC	Gain différentiel par heure travaillée (en €)
LS0	A1	H4	VWP10	DR25	PC2	116,11
			VWP12			117,68
VWP10			115,02			
VWP12			116,02			
LS2			VWP06		PC1	114,82
			VWP10			115,10
			VWP12		PC2	114,96
					PC1	116,40
					PC3	115,48
					PC2	115,19

Tableau 6 : Gain différentiel par heure travaillée des 10 scénarios les moins rentables

LS	A	H	VWP	DR	PC	Gain différentiel par heure travaillée (en €)
LS2	A2	H4	VWP06	DR75	PC1	8,96
					PC3	8,93
					PC2	8,94
			VWP08		PC3	8,94
					PC2	8,93
			VWP10		PC1	8,94
					PC3	8,92
			VWP12		PC2	8,93
					PC1	8,92
					PC3	8,88

Soit on gagne indirectement du temps à n'effectuer aucune tâche d'hygiène (H4 – temps passé négatif), soit l'éleveur utilise du temps raisonnablement pour avoir une hygiène adéquate (H2 – temps

passé nul car compris dans le travail quotidien), soit il travaille en plus pour maîtriser l'hygiène au maximum (H0 – charge de travail ajoutée), mais dans les 3 cas la marge brute annuelle peut varier de 170 000 à 265 000 € (Figure 48).

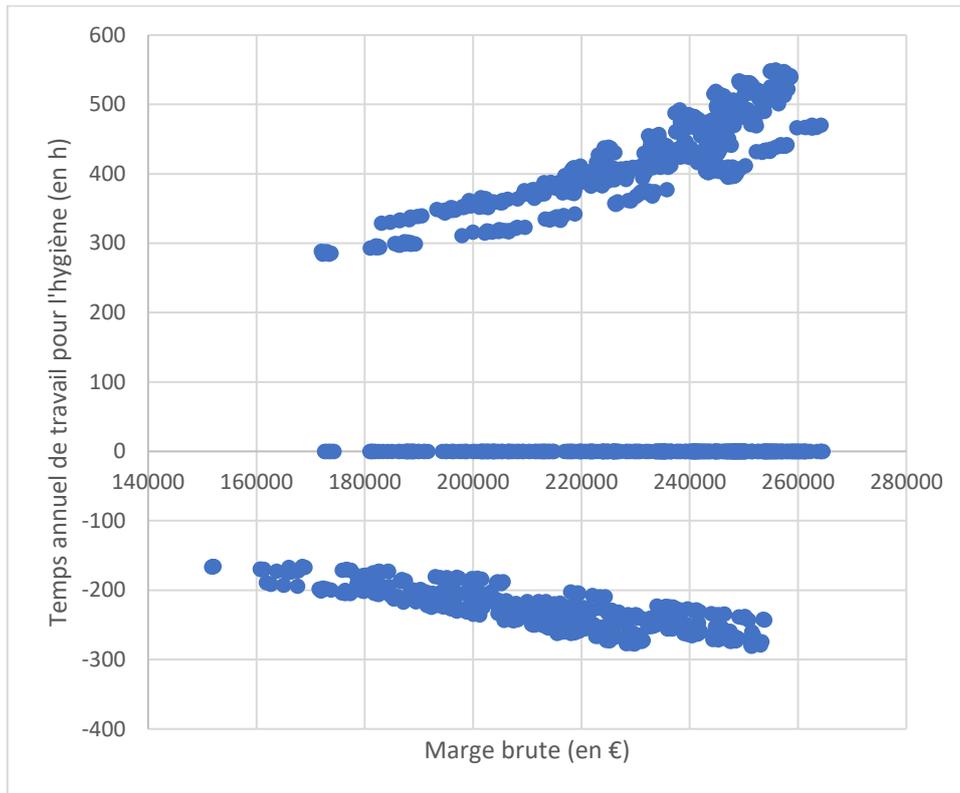


Figure 48 : Marge brute annuelle en fonction du temps passé à gérer l'hygiène

Le travail de reproduction (total) comprend le temps passé à l'observation des chaleurs et à celui pour gérer l'insémination. Moins on passe de temps pour maîtriser la reproduction (DR25), plus la marge brute annuelle espérée est aléatoire et variable. Au contraire, plus un éleveur passe du temps à observer les chaleurs et à participer à la gestion de la reproduction de son troupeau (DR75), plus la marge brute annuelle augmente et réduit en variabilité (Figure 49).

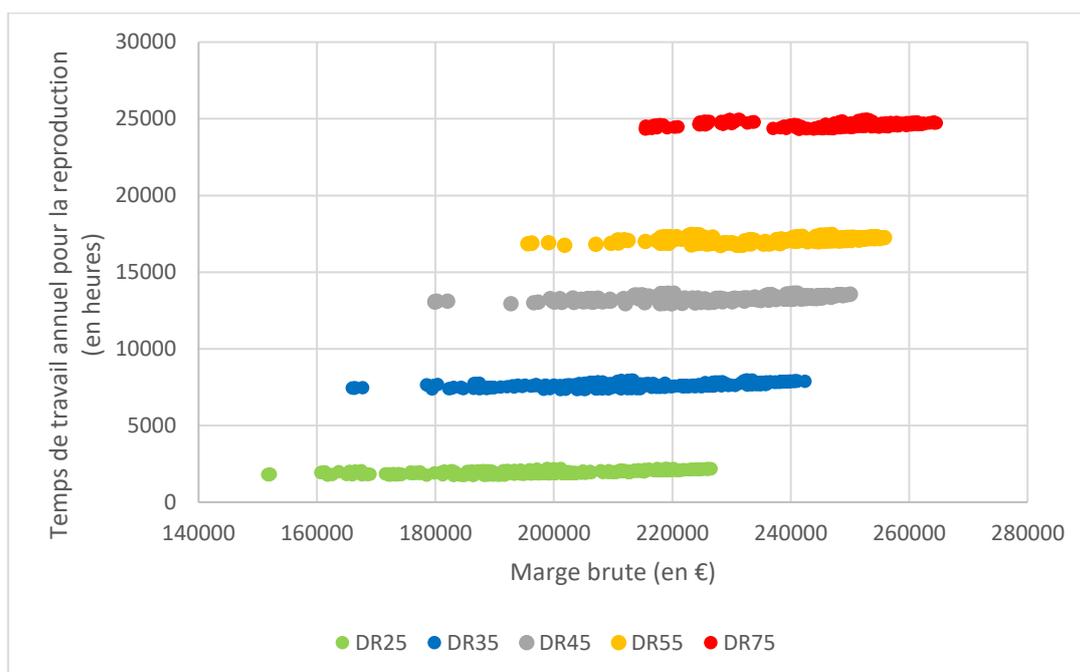


Figure 49 : Marge brute annuelle en fonction du temps de travail pour gérer la reproduction suivant les différents taux de détection des chaleurs (DR)

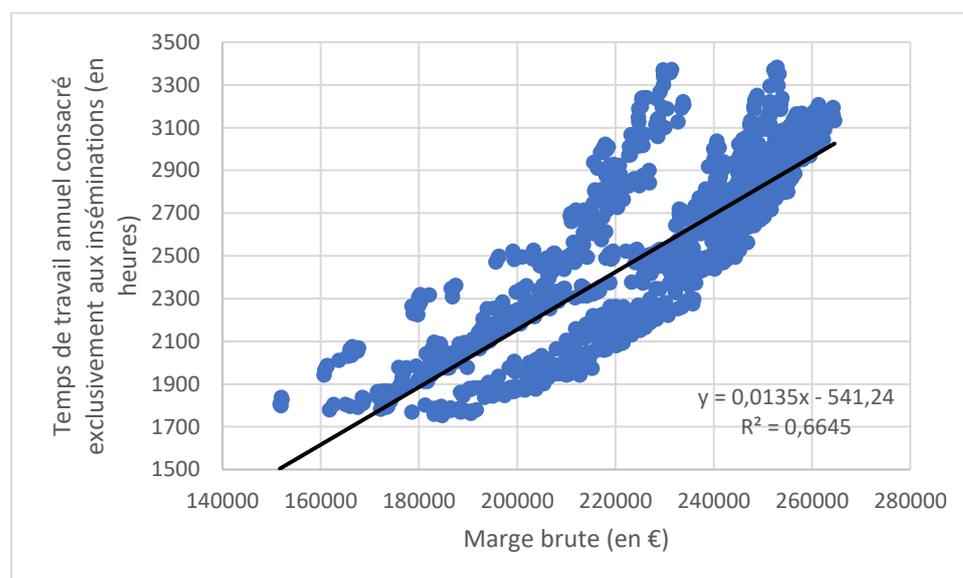


Figure 50 : Marge brute annuelle en fonction du temps de travail consacré exclusivement aux inséminations

Plus l'éleveur consacre du temps aux inséminations, plus sa marge brute potentielle augmente (Figure 50).

Plus la lactation en cours est longue, plus la marge brute annuelle décroît, pour un écart de 10 semaines (différence entre une durée moyenne de lactation de 43 et 53 semaines), l'éleveur peut avoir une perte de gain jusqu'à 120 000 €. Avec une réduction de la durée de lactation, entre 44 et 46 semaines, l'éleveur peut espérer obtenir une marge brute annuelle d'au moins 200 000 € (Figure 51).

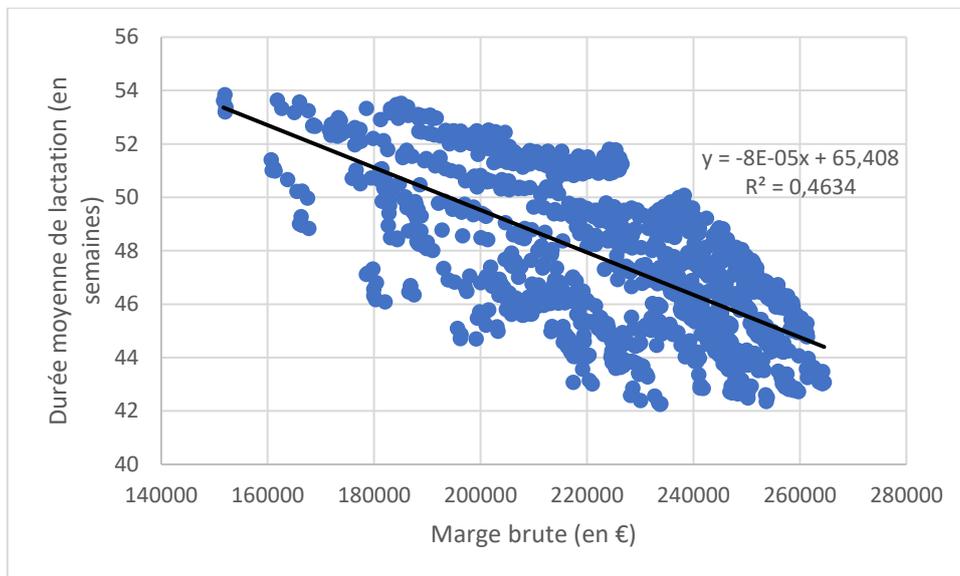


Figure 51 : Marge brute annuelle en fonction de la durée moyenne de lactation

Selon les scénarios, une longévité « courte », entre 120 et 145 semaines de vie (soit 2,5 ans), la marge brute espérée varie de 150 000 à 265 000 € (Figure 52). Pour un troupeau avec une longévité maximisée (supérieure à 200 semaines soit 4 ans), la marge brute espérée minimale est de 245 000 € (Figure 52). Ces résultats montrent que la longévité n'est pas incompatible avec de bons résultats économiques.

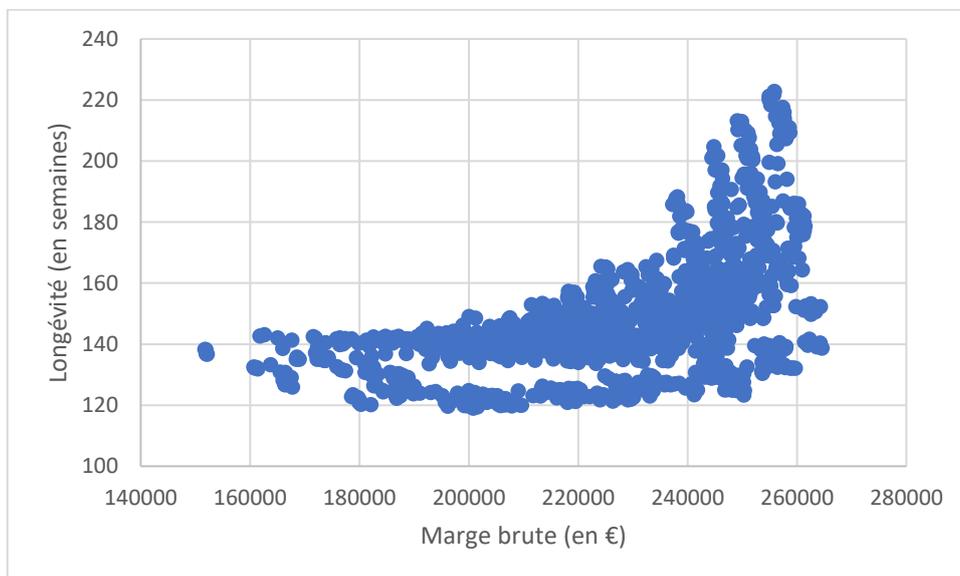


Figure 52 : Marge brute annuelle en fonction de la longévité moyenne des vaches

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 des chaleurs implique une meilleure marge pour l'éleveur (Figure 53).

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 versus DR75). En effet, la

différence entre la marge minimum et maximum (5 088 €) pour DR25 est bien supérieure à la différence entre la marge minimum et le maximum (449 €) pour DR75 (Figure 53). Lorsque le 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 (Figure 53).

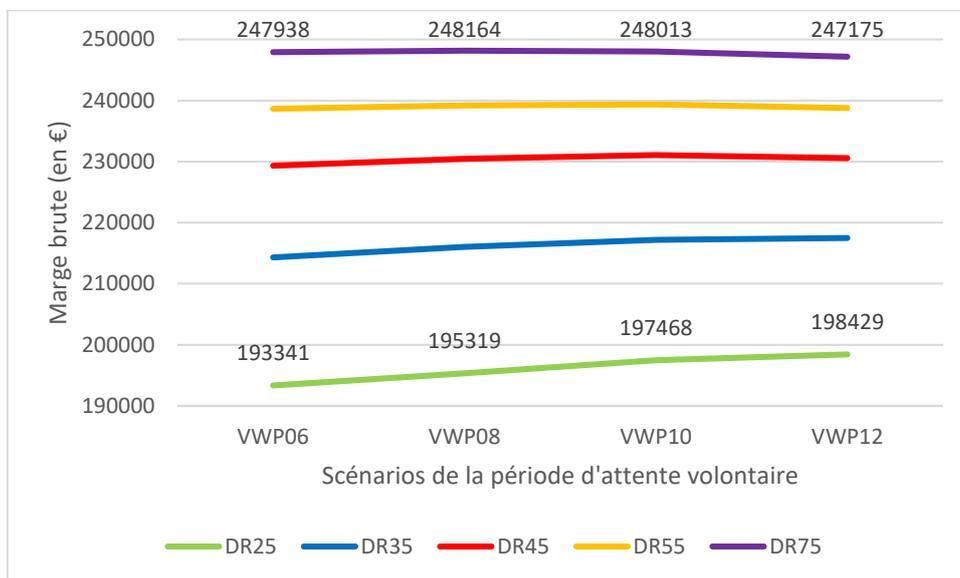


Figure 53 : Marge brute moyenne annuelle en fonction des scénarios DR et VWP

La marge brute croît lorsque le taux de détection augmente et la prévalence des boiteries diminue (Figure 54).

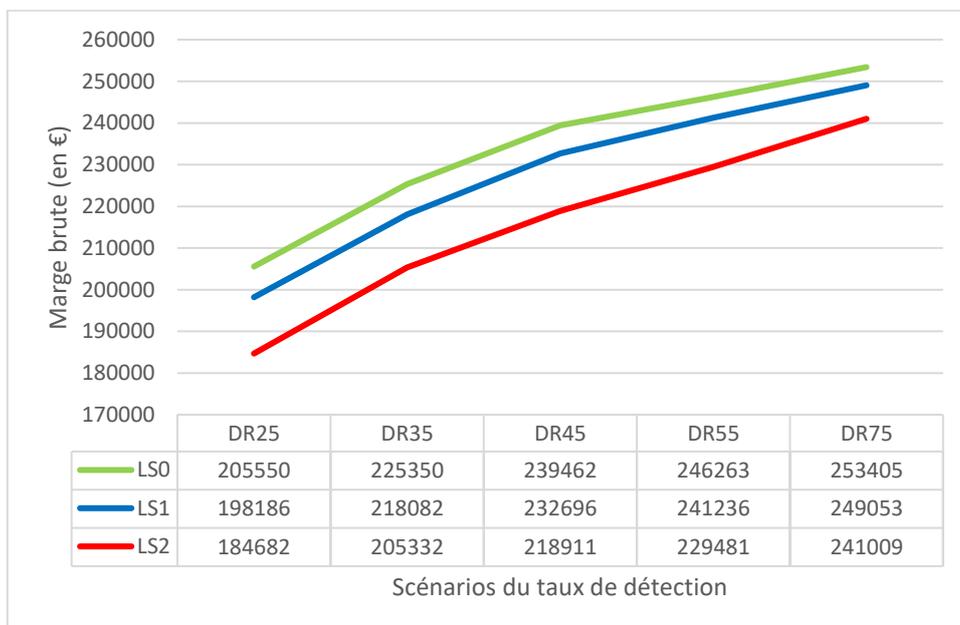


Figure 54 : Marge brute moyenne annuelle en fonction du taux de détection et des scénarios de boiteries

La marge brute croît lorsque le taux de détection augmente et l'hygiène est gérée comme pour H0 et H2 (Figure 55).

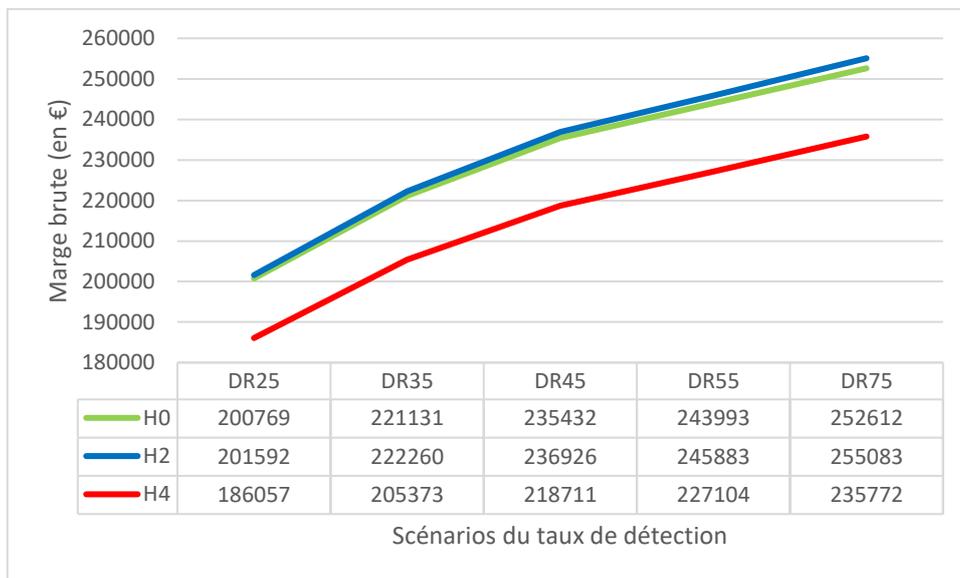


Figure 55 : Marge brute moyenne annuel en fonction du taux de détection et des scénarios d'hygiène

Lorsque la l'hygiène décroît et lorsque la prévalence des boiteries au sein du troupeau augmente, la marge brute peut diminuer environ de 20 000 € par an (Figure 56).

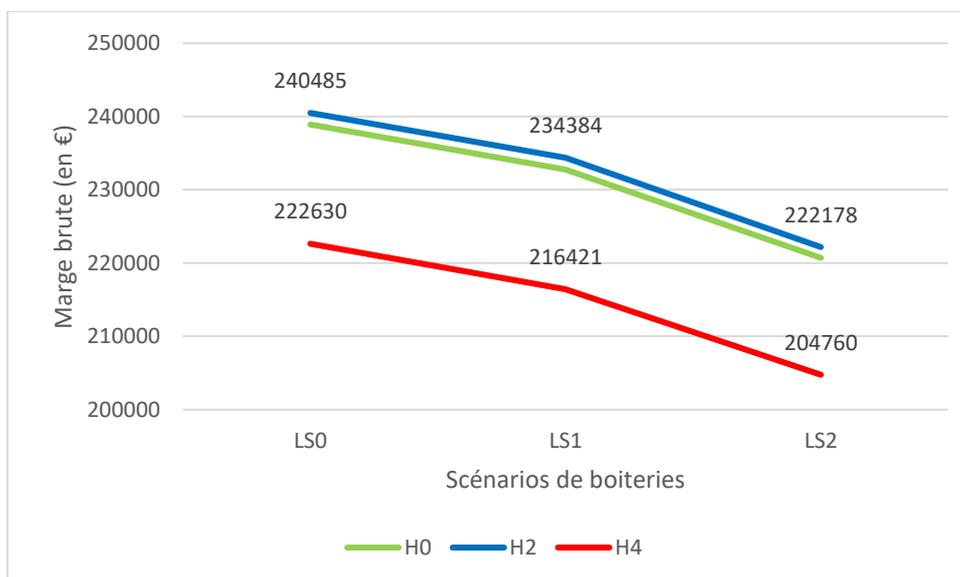


Figure 56 : Marge brute moyenne annuelle en fonction des scénarios de boiteries et d'hygiène

Avec les scénarios PC1 et PC3, l'éleveur optimise ses marges brutes. Cependant, le scénario de réforme PC0 semble le moins performant pour augmenter la marge brute, ce n'est donc pas la stratégie à choisir si l'éleveur veut optimiser sa marge brute par rapport au choix des réformes à effectuer (Figure 57).

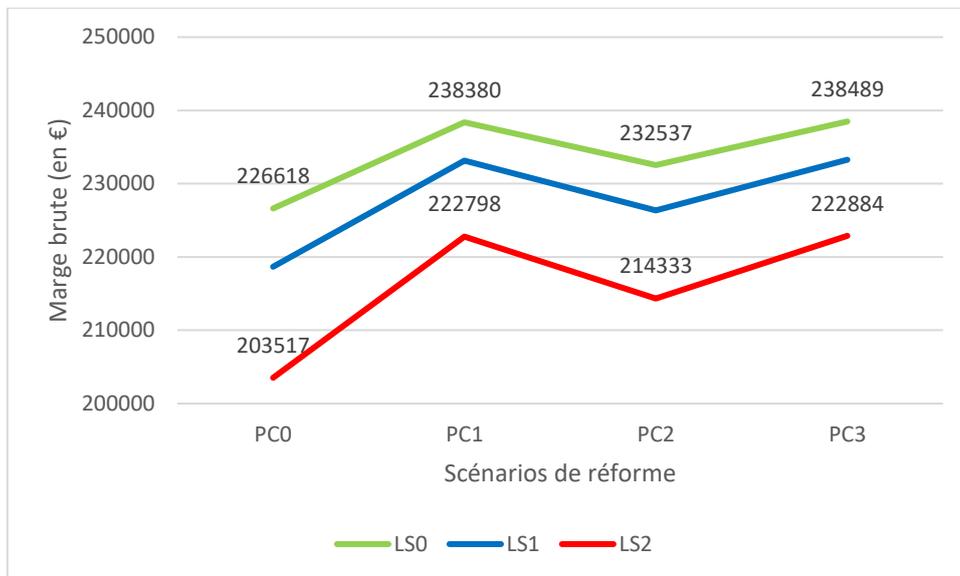


Figure 57 : Marge brute moyenne annuelle en fonction des scénarios de boiteries et de réforme

Plus la production laitière augmente plus la marge brute annuelle augmente, et ceci avec un fort taux de corrélation (Figure 58).

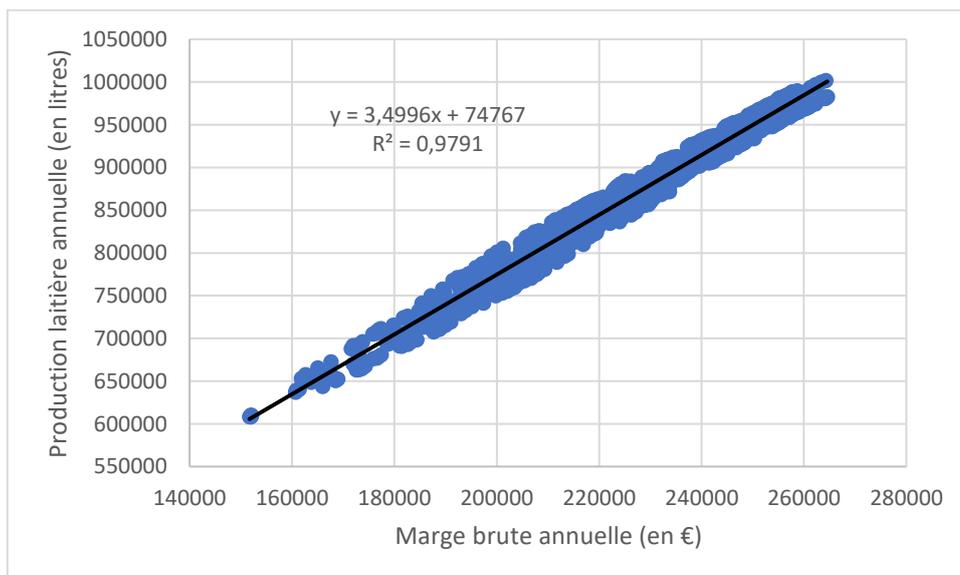


Figure 58 : Marge brute annuelle en fonction de la production laitière annuelle

Plus le nombre de vaches en lactation est optimisé (le plus proche de 100 dans ce modèle), plus la marge brute annuelle augmente et plus l'occupation de l'atelier laitier est valorisée (Figure 59).

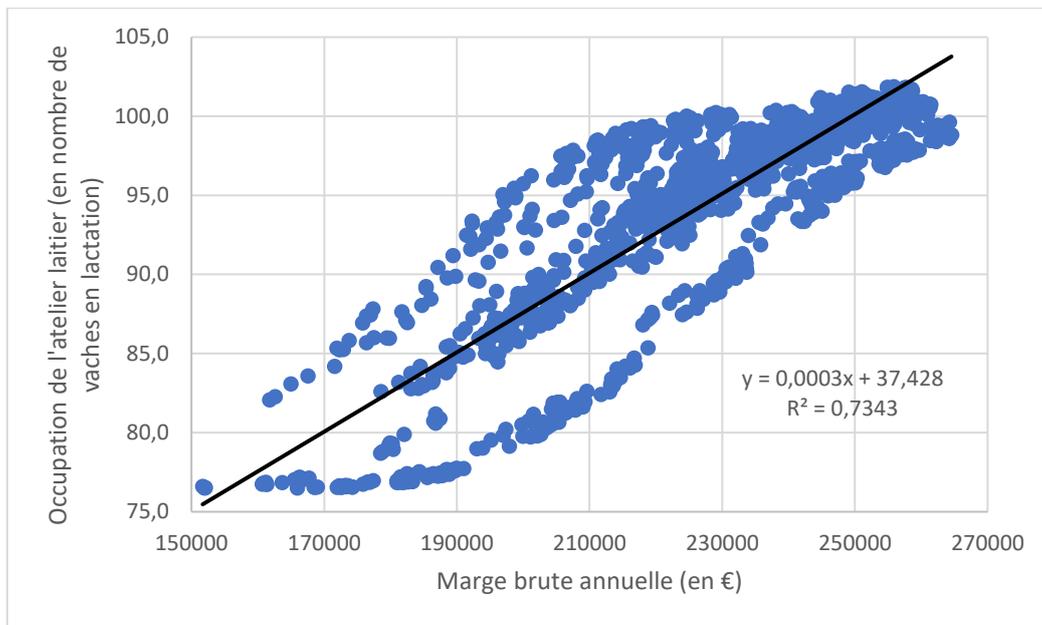


Figure 59 : Marge brute annuelle en fonction de l'occupation de l'atelier laitier

III.2.b.2. Sur les 24 scénarios optimaux déterminés

Le scénario optimal déterminé selon les combinaisons de contraintes (Tableau 2) le plus rentable est LSO_A2_H2_VWP12_DR25_PC1 avec un gain différentiel à l'heure travaillée de 103,68 €. Sa fréquence d'apparition est de 108 (Tableau 4) sur 673 scénarios optimaux.

Cependant, le scénario optimal déterminé le moins rentable est LS1_A1_H0_VWP08_DR75_PC2 avec un gain différentiel à l'heure travaillée de 10,07 € avec une fréquence d'apparition de 3 sur les 673 scénarios optimaux déterminés.

La sélection des scénarios permet de mettre en avant le fruit du travail de l'éleveur, en effet, plus l'éleveur à une charge de travail plus sa marge brute croît (Figure 60). Cependant, rapporté à l'heure, l'éleveur perçoit une plus petite marge brute pour sa charge de travail (Figure 61).

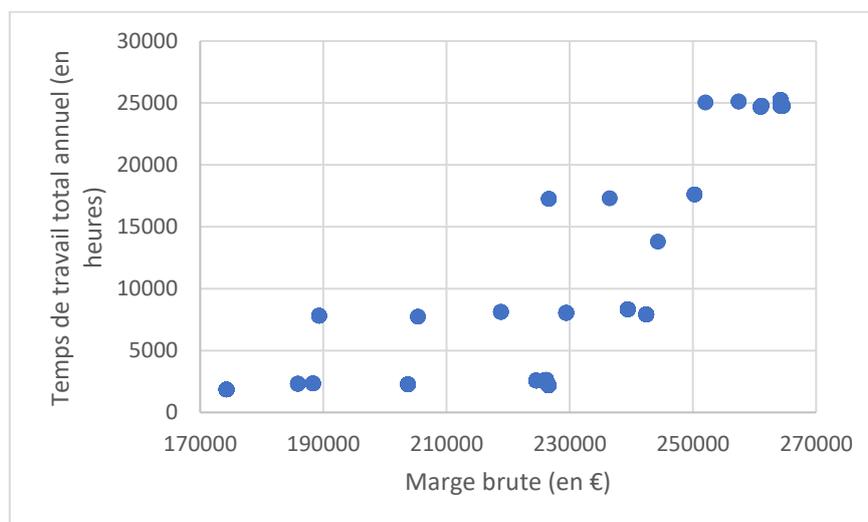


Figure 60 : Marge brute moyenne annuelle en fonction du temps total de travail

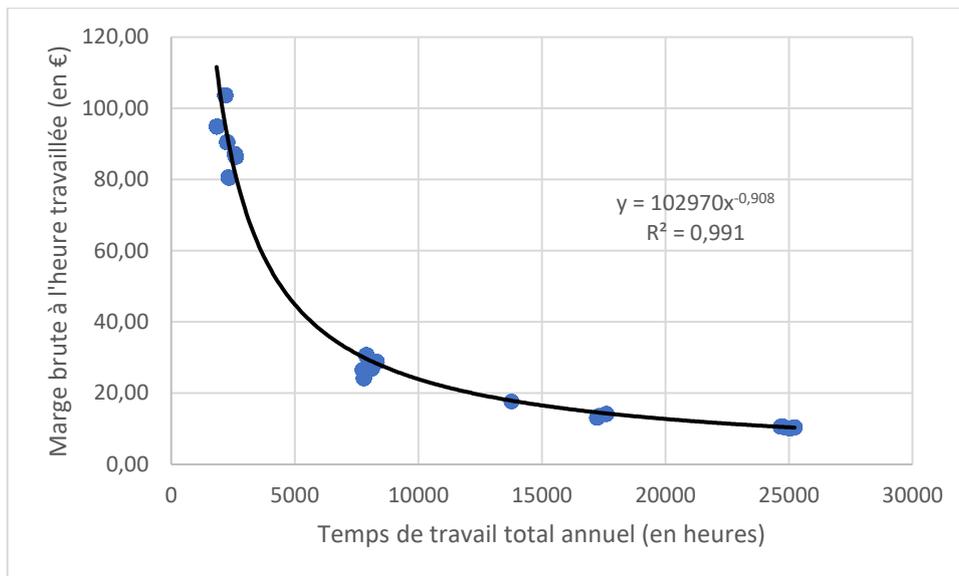


Figure 61 : Marge brute moyenne à l'heure travaillée en fonction de la charge de travail consacré à l'année

III.2.c. Gain différentiel du temps d'observation en reproduction en fonction des scénarios de boîtes

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'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 de l'œstrus dédié), nous avons calculé le gain différentiel 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 différentiel de 220,45 €/heure d'observation (DR35) (Figure 62). Pour un éleveur qui passe d'une situation DR35 à DR45, le gain différentiel est de 32,96 € alors que d'une situation de DR45 à DR55, le gain différentiel n'est plus que de 11,37 €. Ce gain est de 34,52 pour le passage d'une situation de DR55 à DR75.

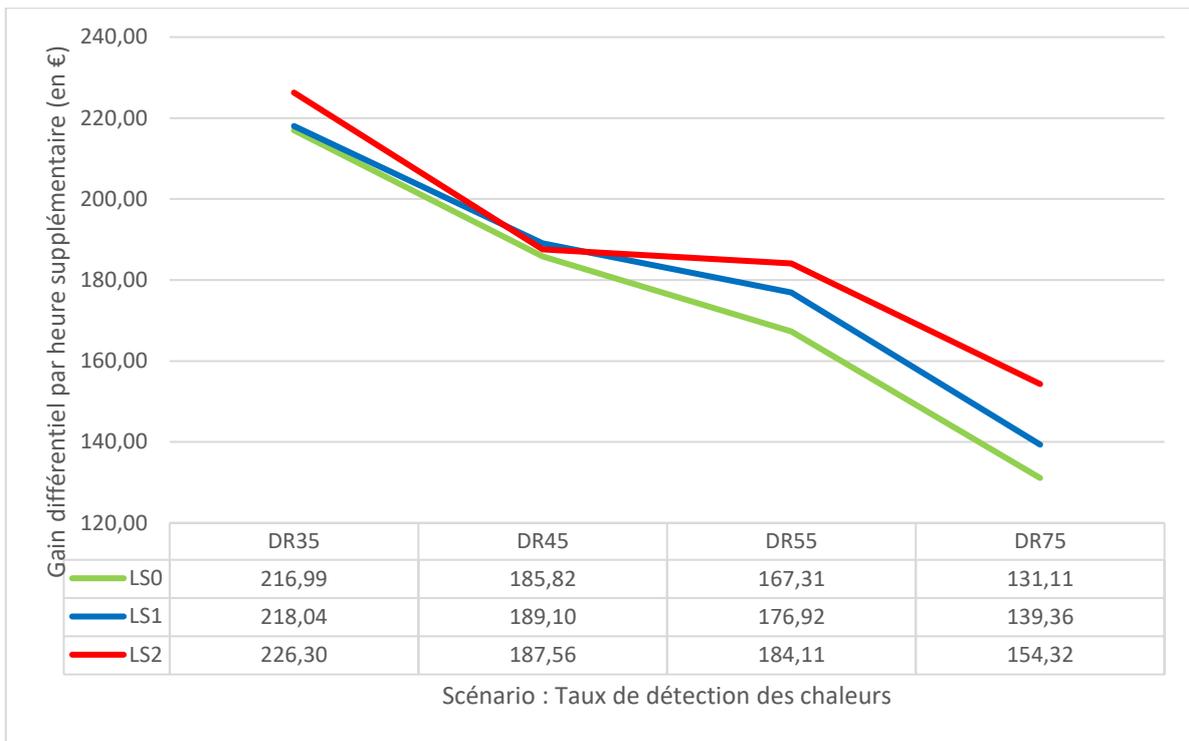


Figure 62 : Gain différentiel de marge brute par heure de détection de l'œstrus et en fonction des scénarios de boiteries

IV. Discussion

IV.1. Une modélisation innovante : intérêts limites de cet outil de simulation utilisé

Cette 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 inexpiquée, 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, Burgers 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 étude précédente (Groenendaal et al. 2004), les résultats mettent en évidence l'existence d'un moment économiquement optimal pour réformer une vache. En effet, réformer une vache trop tôt s'accompagne d'une diminution des bénéfices alors que la réformer trop tard augmente les dépenses. L'approche du modèle DHS® n'offre aucune vision individuelle de la gestion des réformes mais une approche globale à l'échelle du troupeau.

Le modèle proposé et son application à la question de la gestion de la reproduction en lien avec les boiteries en élevage ont été validés en termes de vraisemblance des résultats et des scénarii testés. En effet, il apparaît clairement que les paramètres de reproduction évalués en fonction des scénarios de boiteries (LS0, LS1 et LS2), observés en sorties de modèles répondent de manière sensible aux scénarios évalués. Les résultats des paramètres biologiques (première partie des résultats) ont aussi démontré la validation du modèle et sa capacité de réponse aux changements de calibration et tests de comportement.

Le modèle reste toutefois très sensible au nombre de vaches en production, qui influence les revenus de manière important : entre 90 et 100 vaches, la production de lait permise par le troupeau varie en lien avec les scénarii et de manière relativement indépendante du nombre de vaches alors qu'au-delà d'un seuil d'environ 90 vaches, les revenus sont très dépendants de la production laitière totale qui dépend de ce faible nombre de vaches (Figure 46 et Figure 58). Dans cette dernière situation, l'interprétation des résultats doit être précautionneuse. Toutefois, compte tenu du modèle d'optimisation utilisé, les scénarii correspondant aux faibles densités en élevage (faible nombre de vaches) ne sont pas retenus comme situation optimales.

En effet, dans les scénarios les plus dégradés en termes de prévalence de boiteries, la taille du cheptel diminue fortement (Figure 22 et Figure 23) car le nombre de génisses de renouvellement n'est pas suffisant pour remplacer l'ensemble des vaches réformées. Le modèle ne permettant pas les achats d'animaux, la gestion du troupeau n'est alors pas en adéquation avec les pratiques actuelles qui tendent vers une occupation de l'atelier laitier optimale (supérieure à 95%). Il serait donc intéressant d'intégrer dans le modèle la possibilité pour l'éleveur d'acheter des animaux afin de maintenir une

occupation satisfaisante de l'atelier laitier. Toutefois, dans ce modèle, comparé à l'étude sur les réformes utilisant le même simulateur (données non publiées), un taux de réforme atteignant les 40 % diminuait le nombre de vache dans le troupeau, ici un taux de réforme de plus de 35 % affecte la vente de génisses de renouvellement ou prêtes à vêler, souvent se concluant par une absence de vente car aucune génisse disponible à la vente (Figure 40 et Figure 42).

IV.2. Taux de détection des chaleurs (DR) : un indicateur clé de performance de reproduction

Les résultats montrent que le coût marginal de la période d'attente volontaire (VWP) interagit avec le taux de détection (DR) mais n'augmente pas avec la période d'attente volontaire (VWP). Ces résultats montrent clairement que la VWP n'est pas un indicateur clé de performance pour la gestion de la reproduction des troupeaux laitiers puisque le coût différentiel de la VWP est faible quel que soit le DR. A l'opposé, ces résultats montrent que la marge brute est fortement dépendante de DR qui doit être considéré comme un indicateur clé de performance. Le scénario DR considéré dans ce travail 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, H2, H4). Ainsi l'optimisation multicritère, incluant la main d'œuvre, est nécessaire pour essayer de représenter le comportement des éleveurs. Les résultats démontrent que DR peut entraîner de nombreuses supplémentaires pour l'éleveur. En outre, l'inclusion des coûts des employés est peu pertinente car une seule heure supplémentaire par jour est requise pour l'observation des chaleurs.

IV.3. Quelle gestion de la réforme en élevage ?

IV.3.a. Seuil de production laitière minimale lors de réforme

Les résultats montrent clairement que la production laitière est liée au nombre de vaches en lactation et également au taux de réforme (Figure 41 et Figure 46). Ces résultats doivent être replacés dans un contexte où les réformes restent majoritairement associées aux règles de production de lait. Les réformes pour cause de mauvaise santé de la mamelle et de boiteries ne sont pas les causes de réformes principales, y compris dans les scénarios les plus dégradés en termes d'hygiène et de prévalence de boiteries (Figure 17 et Figure 32). En effet, les réformes liées à une production laitière faible restent prépondérantes dans ces scénarios, même si les réformes pour les autres causes sont plus importantes que dans d'autres scénarios. Cependant, les vaches pré-réformées pour boiterie ou une santé de la mamelle dégradée et finalement réformées pour production laitière sont inclus dans les causes de réforme production laitière, ce qui augmente artificiellement cette catégorie. Ces vaches restent en effet dans le troupeau jusqu'à ce que leur production franchisse un seuil prédéfini conduisant à leur réforme.

Les résultats montrent aussi qu'appliquer des règles strictes de réforme vis-à-vis de la production laitière entraîne une augmentation probable du nombre de primipares réformées. Celles-ci étant de plus faibles productrices que les multipares, il serait intéressant d'appliquer des règles de réforme (seuil de production) différentes en fonction de leur parité. En effet, appliquer des seuils de production minimale différents aux vaches primipares de ceux des multipares pourrait permettre d'améliorer la gestion des réformes dans le modèle. Toutefois, ce biais semble limité car les multipares représentent 70% à 85 % des réformes dans la situation actuelle.

IV.3.b. Stratégies de gestion de l'élevage : taille du troupeau, bien-être animal et performance économique

Il apparaît dans le modèle que dans certains scénarios, la gestion d'un troupeau de 90 vaches peut suffire à atteindre une production laitière totale sensiblement identique voire supérieure à celle d'un troupeau de 100 vaches. Ces éléments montrent que la stratégie adoptée par l'éleveur ne doit pas dépendre uniquement de la taille de son cheptel mais elle doit prendre en compte une multitude de paramètres permettant d'optimiser ses performances globales. Même si l'impact Carbone n'est pas intégré dans le modèle à ce jour, il est fort probable que la baisse du nombre de vaches soit associée à une baisse des émissions de gaz à effet de serre. L'approche multicritère proposée ici permet ainsi de mieux comprendre les effets de seuils et les critères de décision. Il apparaît en effet dans les résultats qu'un nombre de vaches trop bas reste systématiquement associé à des revenus faibles.

L'outil réforme est un levier d'action important vis-à-vis du bien-être animal. Les critères de longévité (nombre de semaines de vie productive ou de vie sur l'exploitation) représentent en effet un critère de viabilité et de durabilité économique, sociétale et environnementale de l'atelier bovin laitier.

Le critère de longévité d'une femelle productive s'insère parfaitement dans la gestion du bien-être animal et dans la carrière économique de l'exploitation agricole laitière. D'une part, la longévité permet au niveau de l'élevage une performance zootechnique comme une baisse du taux de réforme, une augmentation de la vente des génisses, un intervalle vêlage-vêlage plus court dont ainsi une durée de lactation plus courte et également une production laitière plus élevée. D'autre part, la conséquence de cette capacité zootechnique, la longévité engendre une performance économique importante (Figure 52) d'autant plus marquée lorsque le taux de détection est élevé comme le DR75 (Figure 49), quand la prévalence des boiteries est faible et l'hygiène correcte (Figure 56).

La charge de travail pour l'éleveur, dans ce modèle, est liée principalement au taux de détection des chaleurs, ce qui n'est pas dépendant de la taille du troupeau. En revanche, la marge brute annuelle dépend de la taille du troupeau de vaches en lactation, elle est maximisée lorsque l'occupation de l'atelier laitier est maximale (Figure 59).

V. Conclusion

La gestion de la reproduction et la gestion des boiteries en élevage bovin laitier représentent des enjeux zootechniques, sanitaires, sociétaux, durables et économiques. En effet, la reproduction et les boiteries sont en lien avec la production laitière, la santé et le bien-être animal et impactent également les revenus de l'éleveur. Il est donc primordial de définir des règles décisionnelles claires quant à la reproduction (en lien avec la détection des chaleurs et la période d'insémination) et aux boiteries (règles de réforme). Cette étude mobilise l'outil d'analyse bioéconomique Dairy Health Simulator DHS®. DHS® a permis de simuler de multiples scénarios de reproduction et de boiteries dans différents contextes d'élevage. Les résultats montrent des interactions entre la reproduction, les boiteries et la réforme des animaux. Par ailleurs, la longévité du troupeau améliore le bien-être animal et augmente les revenus de l'éleveur, c'est un très bon critère de contrôle de performance zootechnique. Les résultats montrent qu'une modification des règles de réforme concernant la production laitière a des répercussions importantes tant sur les résultats biologiques que sur les résultats économiques alors que les règles de réformes concernant la santé de la mamelle (mammites et cellules) et les boiteries n'ont que peu d'influence sur ces résultats. Ces résultats originaux permettent d'envisager une meilleure approche de la gestion de reproduction en lien avec les boiteries par les éleveurs afin d'optimiser leurs résultats bioéconomiques. Toutefois, chaque stratégie de gestion doit être adaptée à l'élevage et surtout à ses caractéristiques. Enfin, ce travail a permis de suggérer des améliorations au modèle DHS®, et d'affiner l'aide à la prise de décision qu'il pourrait apporter.

VI. Bibliographie

- Adams A.E., Lombard, J.E., Fossler, C.P., Román-Muñiz, I.N., Kopral, C.A.** Associations between housing and management practices and the prevalence of lameness, hock lesions, and thin cows on US dairy operations [Revue] // *Journal of Dairy Science* 100. - 2017. - pp. 2119-2136.
- Anderson J.R., Dillon, J.L.** Risk analysis in dryland farming systems [Revue] // *Food & Agriculture Organization*. - 1992.
- Bar D., Gröhn, Y.T., Bennett, G., González, R.N., Hertl, J.A., Schulte, H.F., Tauer, L.W., Welcome, F.L., Schukken, Y.H.** Effect of Repeated Episodes of Generic Clinical Mastitis on Milk Yield in Dairy Cows [Revue] // *Journal of Dairy Science* 90. - 2007. - pp. 4643-4653.
- Bar D., Gröhn, Y.T., Bennett, G., González, R.N., Hertl, J.A., Schulte, H.F., Tauer, L.W., Welcome, F.L., Schukken, Y.H.**, Effects of Repeated Episodes of Generic Clinical Mastitis on Mortality and Culling in Dairy Cows [Revue] // *Journal of Dairy Science* 91. - 2008. - pp. 2196-2204.
- Bardano D.M., Lynch, J.M.** Major Advances in testing of Dairy Products: milk Component and Dairy Product Attribute Testing [Revue] // *Journal of Dairy Science* 89. - 2006. - pp. 1189-1194.
- Beaudeau F., Ducrocq, V., Fourichon, C., Seegers, H.** Effect of Disease on Length of Productive Life of French Holstein Dairy Cows Assessed by Survival Analysis [Revue] // *Journal of Dairy Science* 78. - 1995. - pp. 103-117.
- Bruijnis M.R.N., Beerda, B., Hogeveen, H., Stassen, E.N.** Assessing the welfare impact of foot disorders in dairy cattle by a modelling approach [Revue] // *Animal*. - 2012. - pp. 962-970.
- Bruijnis M.R.N., Hogeveen, H., Garforth, C., Stassen, E.N.** Dairy farmers' attitudes and intentions towards improving dairy cow foot health [Revue] // *Livestock Science* 155. - 2013. - pp. 103-113.
- Bruijnis M.R.N., Hogeveen, H., Stassen, E.N.** Assessing economic consequences of foot disorders in dairy cattle using a dynamic stochastic simulation model [Revue] // *Journal of Dairy Science* 93. - 2010. - pp. 2419-2432.
- Bruijnis M.R.N., Hogeveen, H., Stassen, E.N.** Measures to improve dairy cow foot health: consequences for farmer income and dairy cow welfare [Revue] // *Animal*. - 2013. - pp. 167-175.
- Cha E., Hertl, J.A., Schukken, Y.H., Tauer, L.W., Welcome, F.L., Gröhn, Y.T.** The effect of repeated episodes of bacteria-specific clinical mastitis on mortality and culling in Holstein dairy cows [Revue] // *Journal of Dairy Science* 96. - 2013. - pp. 4993-5007.
- Cha E., Kristensen, A.R., Hertl, J.A., Schukken, Y.H., Tauer, L.W., Welcome, F.L., Gröhn, Y.T.** Optimal insemination and replacement decisions to minimize the cost of pathogen-specific clinical mastitis in dairy cows [Revue] // *Journal of Dairy Science* 97. - 2014. - 4. - pp. 2101-2117.
- Charfeddine N., Pérez-Cabal, M.A.** Effect of claw disorders on milk production, fertility, and longevity, and their economic impact in Spanish Holstein cows [Revue] // *Journal of Dairy Science* 100. - 2017. - pp. 1-13.
- De Vries A.** Economics of Delayed Replacement When Cow Performance is Seasonal [Revue] // *Journal of Dairy Science* 87. - 2004. - pp. 2947-2958.
- De Vries Albert** Improved accuracy of a model to optimize breeding and replacement decisions for dairy cattle [Revue] // *Computers in Agriculture and Natural Resources*. - 23-25 July 2006.
- Dechow C.D. et Goodling R.C.** Mortality, Culling by Sixty Days in Milk, and Production Profiles in High- and Low-Survival Pennsylvania Herds [Revue] // *Journal of Dairy Science* 91. - 1 December 2008. - 12. - pp. 4630-4639.
- Dolecheck K.A., Bewley, J.M.** Animal board invited review: Dairy cow lameness expenditures, losses and total cost [Revue] // *Animal*. - 2018. - pp. 1462-1474.

- Dolecheck K.A., Overton, M.W., Mark, T.B., Bewley, J.M.** Estimating the value of infectious or noninfectious foot disorder prevention strategies within dairy farms, as influenced by foot disorder incidence rates and prevention effectiveness [Revue] // Journal of Dairy Science 102. - 2019. - 1. - pp. 715-730.
- Dolecheck K.A., Overton, M.W., Mark, T.B., Bewley, J.M.** Use of a stochastic simulation model to estimate the cost per case of digital dermatitis, sole ulcer, and white line disease by parity group and incidence timing [Revue] // Journal of Dairy Science 102. - 2019. - 1. - pp. 731-741.
- Enting H., Kooij, D., Dijkhuizen, A. A., Huirne, R. B.M., Noordhuizen-Stassen E. N.** Economic losses due to clinical lameness in dairy cattle [Revue] // Livestock Production Science 49. - 1997. - pp. 259-267.
- Ettema J., Østergaard, S., Kristensen, A.R.** Modelling the economic impact of three lameness causing diseases using herd and cow level evidence [Revue] // Preventive Veterinary Medicine 95. - 2010. - pp. 64-73.
- Ettema J.F., Østergaard, S.** Economic decision making on prevention and control of clinical lameness in Danish dairy herds [Revue] // Livestock Production Science 102. - 2006. - pp. 92-106.
- Ferchiou A., Lhermie, G., Raboisson, D.** New standards in bio-economic modelling applied to animal health: health management optimization for rational decision-making using the example of dairy production [Revue] // Agricultural Systems. - 2021.
- Freund R.J.** The introduction of Risk into a Programming Model [Revue] // Econometrica 24. - 1956. - pp. 253-263.
- Friggens N.C., Ingvarsten K.L. et Emmans G.C.** Prediction of Body Lipid Change in Pregnancy and Lactation [Revue] // Journal of Dairy Science 87. - 2004. - 4. - pp. 988-1000.
- Giordano J.O., Kalantari, A.S., Fricke, P.M., Wiltbank, M.C., Cabrera, V.E.** A daily herd Markov-chain model to study the reproductive and economic impact of reproductive programs combining timed artificial insemination and estrus detection [Revue]. - Journal of Dairy Science 95 : [s.n.], 2012. - 9. - pp. 5442-5460.
- Groenendaal H., Galligan, D.T., Mulder, H.A.** An Economic Spreadsheet Model to Determine Optimal Breeding and Replacement Decisions for Dairy Cattle [Revue] // Journal of Dairy Science 87. - 2004. - 7. - pp. 2146-2157.
- Gussmann M., Kirkeby, C., Græsbøll, K., Farre, M., Halasa, T.** A strain-, cow-, and herd-specific bio-economic simulation model of intramammary infections in dairy cattle herds [Revue] // Journal of Theoretical Biology 449. - 2018. - pp. 83-93.
- Haas Y. de, Barkema, H.W., Veerkamp, R.F.** The Effect of Pathogen-Specific Clinical Mastitis on the Lactation Curve for Somatic Cell Count [Revue] // Journal of Dairy Science 85. - 2002. - 5. - pp. 1314-1323.
- Hardaker J.B., Huirne, R.B.M., Anderson, J.R., Lien, G.** Coping with risk in agriculture : Applied Decision Analysis [Revue] // Cabi. - 2004.
- Hernandez J., Shearer, J.K., Webb, D.W.** effect of lameness ont the calving-to-conception interval in dairy cows [Revue] // Journal of the American Veterinary Medical Association. - 2001. - 10 : Vol. 218. - pp. 1611-1614.
- Hertl J.A., Gröhn, Y.T., Leach, J.D.G., Bar, D., Bennett, G., González, R.N., Rauch, B.J., Schulte, H.F., Welcome, F.L., Tauer, L.W., Schukken, Y.H.** Effects of clinical mastitis caused by gram-positive and gram-negative bacteria and other organisms on the probability of conception in New York State Holstein dairy cows [Revue] // Journa of Dairy Science 93. - 2010. - pp. 1551-1560.
- Hertl J.A., Schukken, Y.H., Bar, D., Bennett, G., González, R.N., Rauch, B.J., Welcome, F.L., Tauer, L.W., Gröhn, Y.T.** The effect of recurrent episodes of clinical mastitis caused by gram-positive and gram-negative bacteria and other organisms on mortality and culling in Holstein dairy cows [Revue] // Journal of Dairy Science 94. - 2011. - pp. 4863-4877.

- Inchaisri C., Jorritsma, R., Vos, P.L.A.M., Van Der Weijden, G.C., Hogeveen, H.** Analysis of the economically optimal voluntary waiting period for first insemination [Revue] // Journal of Dairy Science 94. - 2011. - 8. - pp. 3811-3823.
- Inchaisri C., Jorritsma, R., Vos, P.L.A.M., Van Der Weijden, G.C., Hogeveen, H.** Economic consequences of reproductive performance in dairy cattle [Revue] // Theriogenology 74. - 2010. - 8. - pp. 835-846.
- Kalantari A.S., Cabrera, V.E.** 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 [Revue] // Journal of Dairy Science 95. - 2012. - 10.
- Kocherlakota N.** Implications of efficient risk sharing without commitment [Revue] // Review of Economic Studies 63. - 1996. - pp. 595-609.
- Korver S.** Efficiency of Breeds for Milk and Beef Production [Revue]. - 1984.
- Kossaibati M.A., Esslemont, R.J.** The Costs of Production Diseases in Dairy Herds in England [Revue] // The Veterinary Journal 154. - 1997. - pp. 41-51.
- Kristensen E., Østergaard, S., Krogh, M.A., Enevoldsen, C.** Technical Indicators of Financial Performance in the Dairy Herd [Revue] // Journal of Dairy Science. - 2008. - 2. - pp. 620-631.
- Leach K.A., Whay, H.R., Maggs, C.M., Barker, Z.E., Paul, E.S., Bell, A.K., Main, D.C.J.** Working towards a reduction in cattle lameness: 1. Understanding barriers to lameness control on dairy farms [Revue] // Research in Veterinary Science 89. - 2010. - pp. 311-317.
- Liang D., Arnold, L.M., Stowe, C.J., Harmon, R.J., Bewley, J.M.** Estimating US dairy clinical disease costs with a stochastic simulation model [Revue] // Journal of Dairy Science 100. - 2017. - pp. 1472-1486.
- Ma J., Burgers, E.E.A., Lam, T., Kemp, B., Van Knegsel, A.T.M.** Consequences of extending the voluntary waiting period for insemination on ovarian cyclicity and reproductive performance in dairy cows [Revue] // in: Wias Annual Conference 2020. - 2020. - pp. 69-69.
- Machado V.S., Caixeta, L.S., McArt, J.A.A., Bicalho, R.C.** The effect of claw horn disruption lesions and body condition score at dry-off on survivability, reproductive performance, and milk production in the subsequent lactation [Revue] // Journal of Dairy Science 93. - 2010. - pp. 4071-4078.
- Manske T., Hultgren, J., Bergsten, C.** Prevalence and interrelationships of hoof lesions and lameness in Swedish dairy cows [Revue] // Preventive Veterinary Medicine 54. - 2002. - pp. 247-263.
- Markowitz H.M.** Portfolio Selection [Revue] // Yale University Press. - 1959.
- Østergaard S., Chagunda, M.G.G., Friggens, N.C., Bennedsgaard, T.W., Klaas, I.C.** A Stochastic Model Simulating Pathogen-Specific Mastitis Control in a Dairy Herd [Revue] // Journal of Dairy Science 88. - 2005. - 12. - pp. 4243-4257.
- Sadiq M.B., Ramanoon, S.Z., Mossadeq, W.M.S., Mansor, R., Hussain, S.S.S.** Dairy Farmers' Perceptions of and Actions in Relation to Lameness Management [Revue] // Animals. - 2019. - Vol. 9.
- Santos J.E.P., Juchem, S.O., Cerri, R.L.A., Galvão, K.N., Chebel, R.C., Thatcher, W.W., Dei, C.S., Bilby, C.R.** Effect of bST and Reproductive Management on Reproductive Performance of Holstein Dairy Cows [Revue] // Journal of Dairy Science 87. - 2004. - 4. - pp. 868-881.
- Schukken Y.H., Hertl, J.A., Bar, D., Bennett, G., González, R.N., Rauch, B.J., Santisteban, C., Schulte, H.F., Tauer, L.W., Welcome, F.L., Gröhn, Y.T.** Effects of repeated gram-positive and gram-negative clinical mastitis episodes on milk yield loss in Holstein dairy cows [Revue] // Journal of Dairy Science 92. - 2009. - pp. 3091-3105.
- Shahinfar S., Guenther, J.N., Page, C.D., Kalantari, A.S., Cabrera, V.E., Fricke, P.M., Weigel, K.A.** Optimization of reproductive management programs using lift chart analysis and cost-sensitive evaluation of classification errors [Revue] // Journal of Dairy Science. - 2015. - 6. - pp. 3717-3728.

- Sogstad Å.M., Østerås O., Fjeldaas, T.** Bovine Claw and Limb Disorders Related to Reproductive Performance and Production Diseases [Review] // Journal of Dairy Science. - 2006. - pp. 2519-2528.
- Somers J.G.C., Frankena, K., Noordhuizen-Stassen, E.N., Metz, J.H.M.** Prevalence of Claw Disorders in Dutch Dairy Cows Exposed to Several Floor Systems [Review] // Journal of Dairy Science 86. - 2003. - pp. 2082-2093.
- Speijers M.H.M., Finney, G., McBride, J., Watson, S., Logue, D.N., O'Connell, N.E.** Effectiveness of different footbathing frequencies using copper sulfate in the control of digital dermatitis in dairy cows [Review] // Journal of Dairy Science. - 2012. - pp. 2955-2964.
- Sprecher D.J., Hostetler, D.E., Kaneene, J.B.** A lameness scoring system uses posture and gait to predict dairy cattle reproductive performance [Review] // Theriogenology 47. - 1997. - 6. - pp. 1179-1187.
- Valvekar M., Cabrera, V.E., Gould, B.W.** Identifying cost-minimizing strategies for guaranteeing target dairy income over feed cost via use of the Livestock Gross Margin dairy insurance program [Review] // Journal of Dairy Science 93. - 2010. - pp. 3350-3357.
- van Arendonk J.A.M.** A Model to Estimate the Performance, Revenues and Costs of Dairy Cows Under Different Production and Price Situations [Review] // Agricultural Systems 16. - 1985. - pp. 157-189.
- Von Neumann J., & Morgenstern, O.** Theory of games and economic behavior (2nd rev. ed.) [Review] // Princeton University Press. - 1947.
- Wathes D.C., Pollott, G.E., Johnson, K.F., Richardson, H., Cooke, J.S.** Heifer fertility and carry over consequences for life time production in dairy and beef cattle [Review] // Animal 8. - 2014. - Suppl. 1. - pp. 91-104.
- Wood P.D.P.** Algebraic Model of the Lactation Curve in Cattle [Review] // Nature 216. - 1967. - 5111. - pp. 164-165.

VII. Annexes

Annexe 1 : Paramètres d'entrée du modèle biologique

Paramètres	Références
Risques et effets des maladies	(Enting et al. 1997 ; Østergaard, Gröhn 1999 ; Gröhn et al. 2003 ; Østergaard et al. 2003 ; Ettema, Østergaard 2006 ; Raboisson et al. 2014 ; 2015 ; Mahnani et al. 2015 ; Raboisson, Barbier 2017)
Risques et effets des mammites (clinique et subclinique)	(de Haas et al. 2002 ; Gröhn et al. 2003 ; Østergaard et al. 2003 ; 2005 ; Cha et al. 2014 ; Raboisson et al. 2014)
Lactation	(Wood 1967 ; Meadows et al. 2005 ; Rutten et al. 2016)
Poids et besoins alimentaires	(van Arendonk 1985 ; Friggens et al. 2004 ; Giordano et al. 2012)
Reproduction et croissance des génisses	(Gröhn et al. 2003 ; Groenendaal et al. 2004 ; De Vries 2006 ; Inchaisri, Jorritsma, P. L.A.M. Vos, et al. 2010 ; Wathes et al. 2014 ; Mahnani et al. 2015 ; Mohd Nor et al. 2015)
Paramètres de reproduction	(Opsomer et al. 1999 ; Østergaard et al. 2003 ; 2005 ; de Vries 2004 ; Groenendaal et al. 2004 ; Santos et al. 2004 ; Meadows et al. 2005 ; De Vries 2006 ; Kristensen et al. 2008 ; Cabrera 2010 ; Ettema et al. 2010 ; Inchaisri, Jorritsma, P. L.A.M. Vos, et al. 2010 ; Giordano et al. 2012 ; Kalantari, Cabrera 2012 ; Raboisson et al. 2014 ; Rutten et al. 2014 ; 2016 ; Wathes et al. 2014 ; Mahnani et al. 2015 ; Mohd Nor et al. 2015 ; Shahinfar et al. 2015)
Règles de réforme	(Sørensen et al. 1992 ; Østergaard et al. 2005 ; Dechow, Goodling 2008 ; Kristensen et al. 2008 ; Cha et al. 2014 ; Rutten et al. 2014 ; Mahnani et al. 2015 ; Mohd Nor et al. 2015)

Annexe 2 : Paramètres de calibrage des fonctions de production

Label	Unité	Valeur	Références
BW_{Birth}	kg	44	Auteurs
ADG	kg	< 6 mois d'âge : 0,65 Jusqu'au premier vêlage : 0,75	Auteurs
t_{pc}	-	$t_p - 50 > 0 : t_p - 50$ $t_p - 50 \geq 0 : 0$	(Van Arendonk 1985)
k	-	0,0028	(Korver 1984)
p_1	kg	50	(Van Arendonk 1985)
p_2	jours	75	(Van Arendonk 1985)
p_3	-	0,0187	(Van Arendonk 1985)
BW_{MAT}	kg	U(650, 725)	Auteurs
$CarC_{Cull}$	%	55	Auteurs
$DMI_{dry-off}$	kg	13 ± 0,33	Auteurs
$a (L1, L2, L3+)$		7,418 ; 11,274 ; 10,478	(Meadows et al. 2005)
$b (L1, L2, L3+)$		0,429 ; 0,411 ; 0,447	(Meadows et al. 2005)
$c (L1, L2, L3+)$		0,00525 ; 0,00666 ; 0,00725	(Meadows et al. 2005)
DRY_{Length}		7	Auteurs
$PREG_{Length}$		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	Auteurs
Stillbirth	%	5	Auteurs
$HeifAgePub$	semaines	U(32, 58)	(Wathes et al. 2014)
$HeifWeiPub$	kg	274	(Wathes et al. 2014)
$HeifAgeElig$	semaines	59	(Wathes et al. 2014)
$HeifWeiElig$	% BW_{MAT}	U(55, 65)	(Margerison, Downey 2005)
$GenderRatio$	%	50%	Auteurs

^a : PP : primipares ; MP : multipares

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

Prod. laitière quotidienne (kg/j)	Besoins alimentaires		
	UFL (/kg MSI ^a)	Protéines Brutes (% MSI ^a)	Fibres Brutes (% MSI ^a)
0 (période sèche)	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 : MSI : matière sèche ingérée

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

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

	Effets sur le CCS 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
Cultures négatives	1440	493	363	233	-1317
Autres cultures	1660	474	370	266	-999

Références : (Østergaard et al. 2005 ; Cha et al. 2014)

	Traitement dans les temps			Traitement retardé			Pas de traitement		
	1 ^{ère} inf.	Recid.	Rech.	1 ^{ère} inf.	Recid.	Rech.	1 ^{ère} inf.	Recid.	Rech.
<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%*

1^{ère} inf. : première infection de mammite clinique durant la lactation ; Recid. : Récidive, nouvelle infection 21 jours avant la première infection ; Rech. : 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	Références	Vétérinaire	Eleveur
Echec de transfert d'immunité	0 (naissance)	N(0,1, 0,005)	Raboisson et al. 2016	0%	0%
Diarrhée	1 à 4	N(0,227, 0,127)	Raboisson et al. 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 et al. 2016	0%	100%
Septicémie	1 à 4	N(0,03, 0)	Raboisson et al. 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 la 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 la 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	AB	SC	1	3	2.5	21
Dexadreson	Dexaméthasone	AIS	IM	1	1	3	8
Nuflor	Florfénicol	AB	SC	1	1	0	37
Draxxin100	Tulathromycine	AB	SC	1	1	0	22
Tolfine	Acide tolfénamique	AINS	IM	1	2	0	12
Shotapen	Benzylpénicilline	AB	IM	2	4	5	64
Potencil	Amoxicilline	AB	IM	2	3	0	10
Amphoprim	Sulfadimidine, triméthoprim	AB	IM	2	3	2	5
StopM	Pénéthamate	AB	IM	1	3	4	14
Colibolus	Colistine	AB	OR	1	3	0	5
Estrumate	Cloprosténol	H	IM	1	1	0	1
Bioveine_GMC	Acétylméthionine, choline, Glucose	ME	IV	2	1	0	0
Bioveine_Calcium	Calcium, Magnésium	ME	IV	0	1	0	0
Speciale2411	Bicarbonate de sodium, Glucose, Saccharose	ME	IV	3	1	0	0
Rehydion	Sodium, Potassium, Glucose	REH	OR	3	2	0	0
Metricure	Céfapirine	AB	IVG	1	1	2	2
Lincocine	Lincomycine	AB	IMA	1	1.5	3.5	3
Mastijet	Néomycine	AB	IMA	3	2	4	30
Ubrolexin	Céfalexine	AB	IMA	2	2	5	10
Mastipeni	Benzylpénicilline	AB	IMA	2	2	6.5	7
Masticoli	Cloxacilline	AB	IMA	2	2	4	0
Synulox	Amoxicilline	AB	IMA	2	1.5	4	7
Clamoxyl_Oblets	Amoxicilline	AB	IU	1	1	0	1
Calform_Bolus	Magnésium	ME	OR	0	1		
Cepravin	Céfalonium	AB	IMA	1	1	6	21
Orbeseal	Bismuth lourd		IMA	0	1	0	0

Les médicaments sont supposés utilisés à dose normale. NA : nombre d'applications par animal. Abréviations des voies d'administration des traitements : IM : intramusculaire ; IMA : intramammaire ; OR : oral ; IU : intra-utérine ; IVG : intravaginal ; IV : intraveineux ; SC : sous-cutanée. Abréviations pour la nature des traitements : AB : 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

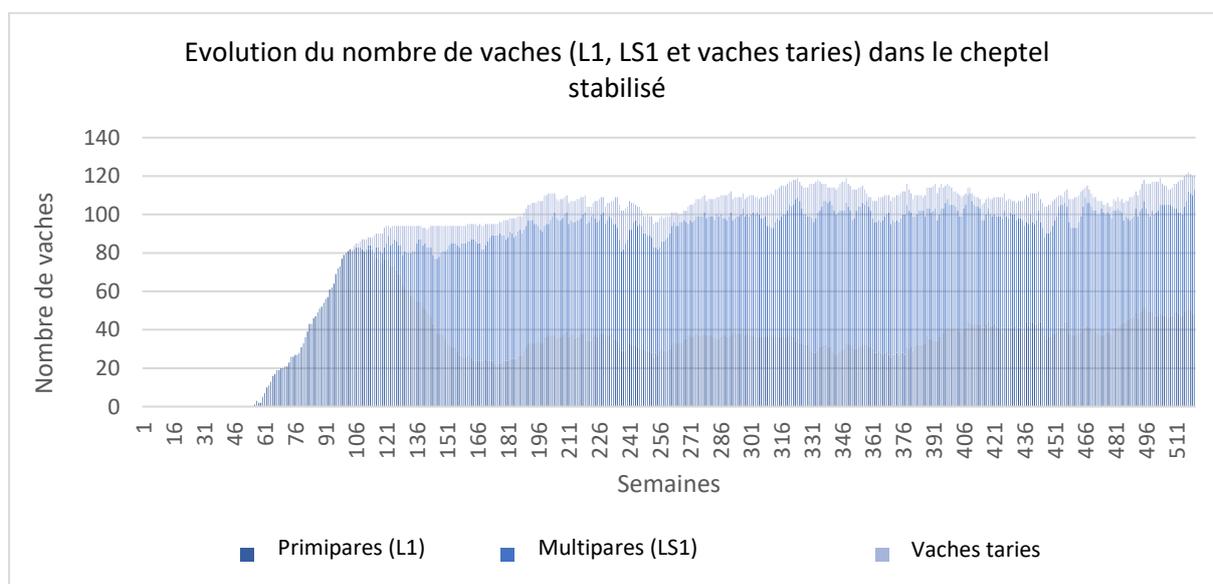
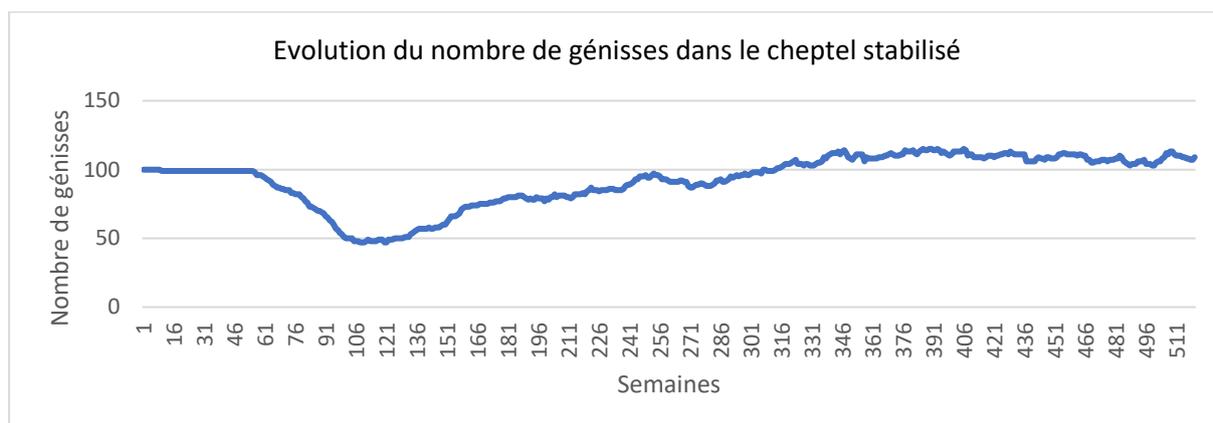
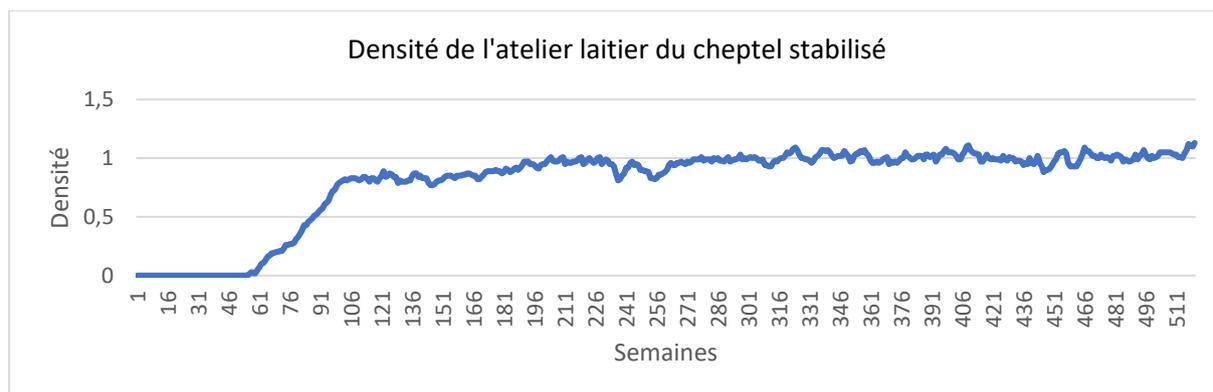
	Définition	Unité	Valeur*
Calibration des règles de pré-réformes			
DOCullL1	Jours ouverts pour appliquer l'option pré-réforme pour les vaches en première lactation (primipares)	jours	180 ou 240
DOCullLs1	Jours ouverts pour appliquer l'option pré-réforme pour les vaches en deuxième lactation et plus (multipares)	jours	160 ou 220
Numlact_precull	Seuil de parité de la vache pour être pré-réformée (hors de tout autre critère)	-	6
NbAI_precull_Simp	Nombre d'échecs à l'IA pour être éligible à la pré-réforme	-	5 ou 6
NbAI_precull_Comp	Nombre d'IA pour être éligible à la pré-réforme si la production laitière justifie (DMYPrecull)	-	4 ou 5
DMY_Precull	Seuil de rendement journalier en lait pour la pré-réforme (quand il est considéré)	kg	25
Calibration des règles de réformes			
DMY_Cull	Le seuil peut également être de 3 ou 5% pour les vaches les moins productives pour la semaine donnée	kg	15
PregDur_Cull	Seuil de durée de gestation pour la réforme	semaines	26 ou 4
LameCow_Cull_Comp	Score de locomotion pour être éligible à la réforme si la prévalence justifie (LameHerd_Cull)	score	[3-4[
LameCow_Cull_Simp	Score de locomotion pour être éligible à la réforme	score	4
LameHerd_Cull	Pourcentage des vaches avec un score de locomotion > 3	%	15%
CMCow_Cull_Simp	Nombre de mammites cliniques durant la lactation en cours pour être éligible à la réforme	-	4
CMCow_Cull_Comp	Nombre de mammites cliniques durant la lactation en cours pour être éligible à la réforme si la prévalence du troupeau en mammites cliniques justifie (CMHerdCull)	-	[2-4[
CMHerd_Cull	Pourcentage des vaches avec moins d'une mammite clinique l'année précédente	%	25
SCCCow_Cull_Simp	Average monthly SCC for the current lactation	10 ³ cellules /ml	900
SCCCowCull_Comp1	Moyenne des CCS du mois dernier pour la lactation en cours si le CCS du tank justifie (SCCBulkCullH) - Elevé		250
SCCCowCull_Comp2	Moyenne des CCS du mois dernier pour la lactation en cours si le CCS du tank justifie (SCCBulkCullH) - Faible		350
SCCBulk_CullH	CCS du lait de tank de la semaine - Elevé	10 ³ cellules /ml	300
SCCBulk_CullL	CCS de lait de tank de la semaine - Faible		350

*Valeur variable selon les scénarios

Annexe 9 : Présentation du cheptel stabilisé

Sorties de troupeaux pour le cheptel stabilisé

	Vaches réformées	Génisses réformées	Mortalité vaches	Mortalité génisses	Vente génisses gravides
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

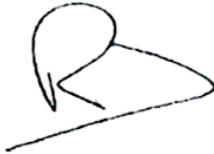


AGREMENT SCIENTIFIQUE

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

Je soussigné, Didier RABOISSON, Enseignant-chercheur, de l'École Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de **BENOIST Adrien** intitulée « **Optimisation bioéconomique de la gestion de la reproduction et des boiteries en élevages bovins laitiers** » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.

Fait à Toulouse, le 17/05/2021
Enseignant-chercheur de l'École Nationale
Vétérinaire de Toulouse
Professeur Didier RABOISSON



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



Vu :
Le Président du jury
Professeur Laurent MOLINIER

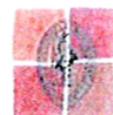


Vu et autorisation de l'impression :
Le Président de l'Université Paul
Sabatier

Monsieur Jean-Marc BROTO
Par délégation, le Doyen de la faculté de
Médecine de Toulouse-Rangueil
Monsieur Elie SERRANO



M. BENOIST Adrien
a été admis(e) sur concours en : 2016
a obtenu son diplôme d'études fondamentales vétérinaires le: 06/07/2020
a validé son année d'approfondissement le : 25/03/2021
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.



NOM : BENOIST

PRENOM : ADRIEN

TITRE : OPTIMISATION BIOECONOMIQUE DE LA GESTION DE LA REPRODUCTION ET DES BOITERIES EN ELEVAGES BOVINS LAITIERS

RESUME :

En élevage laitier, la gestion des boiteries et les décisions de gestion de la reproduction sont complexes de par la multiplicité des paramètres desquels elles dépendent, qu'il est important de définir et de maîtriser. Elles ont un impact sur les performances zootechniques et économiques de l'élevage, ainsi que sur le bien-être animal du troupeau. Afin de déterminer les décisions de gestions optimales en élevage laitier, nous avons simulé à l'aide du modèle bioéconomique DairyHealthSim® différentes stratégies de gestion de la reproduction tel que l'amélioration du taux de détection de chaleurs et le rallongement de la période d'attente volontaire, dans 3 différents contextes d'hygiène des bâtiments (H) et de prévalence des boiteries (LS). Les simulations sont couplées à un modèle d'optimisation multicritères qui permet de de déterminer à travers des compromis de temps de travail de l'éleveur, d'exposition aux antibiotiques et de longévité des vaches, les optimums économiques pour chaque situation.

Les résultats montrent que le principal indicateur de gestion de la reproduction ayant un impact sur les résultats économiques de l'atelier laitier est celui de la détection des chaleurs. Une meilleure détection des chaleurs peut permettre d'obtenir un gain différentiel jusqu'à 220,45 € par heure d'observation pour un temps de détection passant de 0 à 15 minutes par jour. Un compromis doit cependant être trouvé afin de concilier santé (boiteries, autres pathologies), longévité du troupeau et réduction de l'exposition aux antibiotiques.

MOTS CLES : BOVIN LAIT, MODELE BIOECONOMIQUE, REPRODUCTION, BOITERIE

TITLE : BIOECONOMIC OPTIMIZING OF REPRODUCTION AND LAMENESS MANAGEMENT IN DAIRY COW FARMING

SUMMARY :

In dairy farming, lameness management and reproduction management decisions are complex due to the multiplicity of parameters on which they depend, which it is important to define and control. They have an impact on the zootechnical and economic performance of breeding, as well as on the animal welfare of the herd. In order to determine the optimal management decisions in dairy farming, using the DairyHealthSim® bioeconomic model, we simulated various reproductive management strategies such as improving the heat detection rate and extending the period of voluntary waiting, in 3 different contexts of cowshed hygiene (H) and prevalence of lameness (LS). The simulations are coupled with a multi-criteria optimization model which makes it possible to determine, through compromises of the farmer's working time, exposure to antibiotics and cow longevity, the economic optimum for each situation.

The results show that the main indicator of reproduction management having an impact on the economic results of the dairy farm is that of heat detection. Better heat detection can make it possible to obtain a differential gain of up to € 220.45 per hour of observation for a detection time going from 0 to 15 minutes per day. However, a compromise must be found in order to reconcile health (lameness, other pathologies), longevity of the herd and reduction of exposure to antibiotics.

KEYWORDS : DAIRY COW, BIOECONOMIC MODELLING, REPRODUCTION, LAMENESS