



HAL
open science

Etude des relations entre mammites en début de lactation, réformes et dynamique des concentrations en cellules somatiques pendant la période tarie

Joanna Araujo

► **To cite this version:**

Joanna Araujo. Etude des relations entre mammites en début de lactation, réformes et dynamique des concentrations en cellules somatiques pendant la période tarie. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04831709

HAL Id: dumas-04831709

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04831709v1>

Submitted on 11 Dec 2024

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

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

Oniris - Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation

ANNEE 2024 - Thèse n° 86

Étude des relations entre mammites en début de lactation, réformes et dynamique des concentrations en cellules somatiques pendant la période tarie.

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Nantes

le 17 octobre 2024

par

Joanna ARAUJO

Sous la direction de

Aurélien MADOUASSE

Président du jury : Monsieur François BEAUDEAU Professeur à Oniris

Membres du jury : Monsieur Jean-michel GALHARRET Maître de conférences à Oniris

Monsieur Aurélien Madouasse Maître de conférences à Oniris

ONIRIS – VetAgroBio Nantes
ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE,
AGROALIMENTAIRE ET DE L'ALIMENTATION
Site de la Chantrerie
101 route de Gachet
44307 Nantes Cedex 3

Liste des enseignants d'Oniris



Département BPSA Biologie, Pathologie et Sciences de l'Aliment		
Responsable : Emmanuel JAFFRES – Adjointe : Frédérique NGUYEN		
Pharmacologie et Toxicologie	Jean-Claude DESFONTIS (Pr) Yassine MALLEM (Pr) Hervé POULIQUEN (Pr)	Antoine ROSTANG (MC) Meg-Anne MORICEAU (CERC) Martine KAMMERER (PR émérite)
Physiologie fonctionnelle, cellulaire et moléculaire	Jean-Marie BACH (Pr) Lionel MARTIGNAT (Pr) Julie HERVE (MC HDR) Grégoire MIGNOT (MC)	Solenn GAVAUD (CERC)
Histologie et anatomie pathologique	Marie-Anne COLLE (Pr) Pierre CORDIER (CERC) Jérôme ABADIE (MC)	Laetitia JAILLARDON (MC) Frédérique NGUYEN (MC)
Biochimie alimentaire industrielle	Carole PROST (Pr) Joëlle GRUA (MC)	Clément CATANEO (MC) Alix KHALIL (MC) Laurent LE THUAUT (MC)
Microbiotech	Hervé PREVOST (Pr) Géraldine BOUE (MC) Nabila HADDAD (MC HDR) Emmanuel JAFFRES (MC HDR)	Mathilde MOSSER (MC) Boris MISERY (MC) Raouf TAREB (MC) Quentin PRUVOST (CEC)
PACENV = VET1	Eléonore BOUGUYON (PRAG) Nicolas BROSSAUD (PRAG)	Charlotte MOCQUARD (PRAG) Aurore CALVEL (PRAG)
Département SAESP Santé des Animaux d'Élevage et Santé Publique		
Responsable : Raphaël GUATTEO – Adjoint : Jean-Michel CAPPELIER		
Élevage, nutrition et santé des animaux domestiques	Nathalie BAREILLE (Pr) François BEAUDEAU (Pr) Christine FOURICHON (Pr)	Juan Manuel ARIZA CHACON (MC) Ségolène CALVEZ (Pr) Aurélien MADOUASSE (MC HDR) Nora NAVARRO-GONZALES (MC)
Infectiologie	Alain CHAUVIN (Pr) François MEURENS (Pr) Emmanuelle MOREAU (Pr) Nathalie RUVOEN-CLOUET (Pr) Pauline MAISONNASSE (CERC)	Albert AGOULON (MC) Suzanne BASTIAN (MC) Léa LOISEL (AERC) Kenny OBERLE (MC) Nadine RAVINET (MC)
Médecine des animaux d'élevage	Catherine BELLOC (Pr) Christophe CHARTIER (Pr émérite) Raphaël GUATTEO (Pr) Anne RELUN (MC)	Sébastien ASSIE (MC) Isabelle BREYTON (MC) Mily LEBLANC MARIDOR (MC) Maud ROUAULT (AERC)
Hygiène et qualité des aliments	Jean-Michel CAPPELIER (Pr) Louis DELAUNAY (CERC) Bruno LE BIZEC (Pr) Marie-France PILET (Pr)	Sofia STRUBBIA (MC) Fanny RENOIS-MEURENS (MC HDR)

Liste des enseignants d'Oniris



Département DSC Sciences cliniques		
Responsable : Catherine IBISCH – Adjoint : Marion FUSELLIER		
Anatomie comparée	Eric BETTI (MC) Claude GUINTARD (MC)	
Pathologie chirurgicale et anesthésiologie	Eric AGUADO (Pr) Olivier GAUTHIER (Pr) Eric GOYENVALLE (Pr)	Pierre MAITRE (MC) Caroline TESSIER (MC) Gwénola TOUZOT-JOURDE (MC) Claire DEFOURMESTRAUX (MC)
Dermatologie, parasitologie des carnivores et des équidés, mycologie	Jacques GUILLOT (Pr) Emmanuel BENSIGNOR (Pr Ass)	Sabrina VIEU (AERC) Maria Dolores SANCHEZ (CERC)
Médecine interne, imagerie médicale et législation professionnelle vétérinaire	Anne COUROUCE (Pr) Jack-Yves DESCHAMPS (Pr) Françoise ROUX (Pr) Juan HERNANDEZ-RODRIGUEZ (Pr Ass) Nora BOUHSINA (MC)	Nicolas CHOUIN (MC) Amandine DRUT (MC) Marion FUSELLIER-TESSON (Pr) Catherine IBISCH (MC HDR) Aurélia LEROUX (MC) Odile SENECAT (MC)
Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Jean-François BRUYAS (Pr) François FIENI (Pr)	Djemil BENCHARIF (Pr) Lamia BRIAND (Pr)
Département GPA Génie des procédés alimentaires		
Responsable : Vanessa JURY – Adjointe : Cyril TOUBLANC		
Lionel BOILLEREAUX (Pr) Sébastien CURET-PLOQUIN (Pr) Marie DE LAMBALLERIE (Pr) Francine FAYOLLE (Pr) Michel HAVET (Pr)	Alain LEBAIL (Pr) Olivier ROUAUD (Pr) Kévin CROUVISIER-URION (MC) Vanessa JURY (Pr) Emilie KORBEL (MC)	Jean-Yves MONTEAU (MC HDR) Eve-Anne NORWOOD (MC) Raphaël PORYLES (MC) Laurence POTTIER (MC) Cyril TOUBLANC (MC)
PAC-ING	Cyril Gaillard (PCEA)	
Département MSC Management, statistiques et communication		
Responsable : Samira ROUSSELIERE – Adjointe : Véronique CARIOU		
Mathématiques, statistiques, informatique	Chantal THORIN (PRAG) Evelyne VIGNEAU (Pr) Jean-Michel GALHARRET (MC stagiaire)	Véronique CARIOU (Pr) Benjamin MAHIEU (MC) Michel SEMENOU (MC)
Economie, gestion, législation	Pascal BARILLOT (MC) Ibrahima BARRY (MC) Florence BEAUGRAND (MC) Sibylle DUCHAINE (MC)	Jean-Marc FERRANDI (Pr) Sonia MAHJOUR (MC) Samira ROUSSELIERE (MC) Christophe PAPINEAU (Ens. Cont.)
Langues et communication	Marc BRIDOU (PLPA) David GUYLER (Ens. Cont.) Nathalie GOODENOUGH (PCEA) Patricia JOSSE (Ens. Cont.)	Shaun MEEHAN (Ens. Cont.) Linda MORRIS (PCEA) Ian NICHOLSON (ENS. Cont.)

Pr Ag : Professeur Agrégé, Pr : Professeur, MC : Maître de Conférence, MCC : MC contractuel,
 PLPA : Professeur Lycée Professionnel Agricole, PCEA : Professeur Certifié Enseignement Agricole,
 HDR : Habilité à Diriger des Recherches, CERC : Chargé d'Enseignement et de Recherche Contractuel, Ens.
 Cont. : Enseignant Contractuel

La reproduction d'extraits de cette thèse est autorisée avec mention de la source. Toute reproduction partielle doit être fidèle au texte utilisé. Cette thèse devra donc être citée en incluant les éléments bibliographiques suivants :

- Nom et prénom de l'auteur : Araujo Joanna
- Année de soutenance : 2024
- Titre de la thèse : Étude des relations entre mammites en début de lactation, réformes et dynamique des concentrations en cellules somatiques pendant la période tarie.
- Intitulé du diplôme : Thèse de doctorat vétérinaire
- Université de soutenance : Faculté de Médecine de Nantes
- Ecole de soutenance : Oniris – Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes Atlantique
- Nombre de pages : 102

Remerciements

À mon jury de thèse

À Monsieur François Beudeau

Professeur en élevage, nutrition et santé des animaux domestique à Oniris.

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury de thèse,

Pour votre pédagogie et les connaissances que vous m'avez enseignées au cours de mes années au sein de cette école,

Hommages respectueux.

À Monsieur Jean-Michel GALHARRET

Maître de conférences à Oniris

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie de mon jury de thèse,

Sincères remerciements.

À Monsieur Aurélien Madouasse

Maître de conférence en élevage, nutrition et santé des animaux domestique à Oniris

Pour m'avoir fait confiance dans ce projet et m'avoir encadré tout au long de ces mois passés au sein de l'unité BIOEPAR. Je vous remercie également pour votre disponibilité et votre accompagnement lors de la rédaction de ce manuscrit et votre engagement dans les nombreuses relectures.

Ce fut un plaisir de travailler avec vous.

Sincères remerciements

À toutes les personnes ayant participé à l'élaboration de ce travail

À Monsieur Julien Jurquet, Monsieur Philippe Roussel

Membres de l'IDELE

Pour votre bienveillance et votre aide précieuse dans la réalisation de ce travail,

Pour votre disponibilité et avoir fait découvrir vos domaines d'expertise,

Pour votre accueil chaleureux au sein de l'IDELE,

Sincères remerciements

Monsieur Etienne Doligez

Membres de Littoral Normand

Pour votre bienveillance et votre aide précieuse dans la réalisation de ce travail,

Pour votre disponibilité et avoir fait découvrir vos domaines d'expertise,

Sincères remerciements

À tous les membres de l'unité BIOEPAR

Pour votre accueil chaleureux au sein de l'unité pendant ces 5 mois et l'aide que vous avez pu m'apporter.

Sincères remerciements

À Maeva, Sabrina et Bibou

Pour avoir partagé votre bureau avec moi et m'avoir permis de passer de bons moments pendant mes pauses. Les câlins de Bibou sont vraiment un plus pour la motivation.

Sincères remerciements

À mes co-stagiaires au sein de l'unité

Pour avoir partagé votre expérience avec moi et rendu ce stage plus conviviale.

Sincères remerciements

Table des matières

Table des annexes	13
Table des figures	14
Table des tableaux.....	19
Liste des abréviations.....	20
I. Introduction	21
II. Etude bibliographique	22
A. Réforme et longévité.....	22
1. Principales causes de réforme.....	22
2. Longévité.....	23
a) Définition de longévité dans la bibliographie	23
b) Evolution de la longévité des vaches laitière au cours des années.....	23
c) Longévité et impact économique	24
d) Longévité et impact environnemental	25
e) Longévité et impact sociétal.....	25
B. Mammites.....	26
1. Etiologie et épidémiologie.....	26
2. Définition dans la bibliographie.....	27
3. Mécanisme physiopathologique	27
4. Importance de la période de tarissement dans l'épidémiologie des mammites...30	
5. Impact économique	30
6. Lien entre mammité et longévité	31
7. Niveau de production laitière	32
8. Performances de reproduction	32
9. Lien entre CCS et mammites	33
a) Dans le cas de mammites subcliniques et cliniques	33
10. Notions statistiques utilisées dans l'étude.....	34
a) Inférence causale.....	34
b) Directed Acyclic Graphs (DAGs)	36
c) Estimands.....	37
C. Modèles statistiques utilisés.....	38
1. Régression linéaire.....	38

2.	où y est la variable dépendante, β_i le coefficient associé à la variable explicative x pour l'individu i et ϵ le terme d'erreur qui représente la part de variabilité de y non expliqué par les variables explicatives (Gelman and Hill, 2006). Régression logistique	38
3.	Régression de Poisson	39
4.	Régression de Cox.....	40
D.	Effets marginaux.....	40
III.	Etude personnelle.....	42
A.	Matériels et méthodes.....	42
1.	Description des données.....	42
2.	Description de la stratégie d'analyse	43
3.	Choix des données et création du tableau de données utilisé pour l'étude statistique	45
a)	Le statut mammité	46
b)	La parité.....	47
c)	La race.....	47
d)	La production laitière	47
2.	Facteurs associés à la décision de mise à la reproduction	47
3.	Facteurs associés à la fertilité	49
3.	Facteurs associés au nombre d'inséminations par lactation.....	50
4.	Facteurs associés à la probabilité de revêlage	51
5.	Modélisation de l'impact des mammites sur le niveau de production laitière	51
6.	Facteurs associés à la mort.....	52
7.	Etude de la dynamique des infections intramammaires entre la fin de lactation et le début de lactation suivante	53
a)	Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement.....	54
b)	Probabilité d'une guérison pendant le tarissement.....	54
c)	Probabilité d'une nouvelle infection acquise pendant le tarissement.....	54
8.	Utilisation des effets marginaux pour réaliser les prédictions.....	54
9.	Etude des contrefactuels.....	54
a)	Présentation des scénarios.....	55
B.	Résultats	56
1.	Résultats des modélisations	56
a)	Modélisation des facteurs associés à la décision de mise à la reproduction.....	56
b)	Facteurs associés à la réussite à la première insémination artificielle d'une lactation	59

c)	Modélisation des facteurs associés au nombre d'inséminations tentées.....	61
d)	Modélisation des facteurs associés à la probabilité de revêlage	63
e)	Modélisation des facteurs associés à la production laitière	66
f)	Modélisation de l'impact des mammites sur le risque de mort.....	69
g)	Modélisation de l'impact des mammites sur les dynamiques de cellules	71
h)	Contrefactuels.....	77
C.	Discussion	83
1.	Pertinence de la méthode.....	83
2.	Interprétation des résultats.....	83
a)	Reproduction	84
b)	Production laitière	85
c)	Mortalité	85
d)	Dynamiques de cellules	85
e)	Contrefactuels.....	85
IV.	Conclusion.....	87
V.	Bibliographie	88
VI.	Annexes.....	94

Table des annexes

Annexe 1 :	Courbe de Wilmink.....	94
Annexe 2 :	Résumé de la régression Logistique pour la décision de mise à la reproduction	94
Annexe 3 :	Résumé de la régression logistique pour la réussite à la première IA	95
Annexe 4 :	Résumé de la régression de poisson pour le nombre d'inséminations.....	96
Annexe 5 :	Résumé de la régression logistique pour la probabilité de vêler à nouveau	97
Annexe 6 :	Résumé de la régression linéaire pour la PL	98
Annexe 7 :	Résumé de la régression de Cox.....	99
Annexe 8 :	Résumé de la régression logistique pour la probabilité d'avoir une CCS avant le tarissement	100
Annexe 9 :	Résumé de la régression logistique pour la probabilité de guérison pendant le tarissement	101
Annexe 10 :	Résumé de la régression logistique pour la probabilité de nouvelle infection	102

Table des figures

Figure 1 : Diagramme d'une section longitudinale de la mamelle d'une vache laitière d'après Nickerson and Akers (2011)	28
Figure 2: (a) Diagramme d'un quartier illustrant le tissu glandulaire. (b) section d'une alvéole mammaire. D'après Nickerson and Akers (2011).....	29
Figure 3: Graphe orienté acyclique montrant l'exemple d'une chaîne.....	36
Figure 4 : Graphe orienté acyclique montrant l'exemple d'une fourche.....	37
Figure 5 : Graphe orienté acyclique montrant l'exemple d'une collision.	37
Figure 6 : vue d'ensemble de la stratégie d'étude.....	44
Figure 7 : Graphe orienté acyclique représentant les causes de réforme en lien avec les mammites. Les différents nœuds représentent les mammites (M), la PL (PL), la mort (M), la mise à la reproduction (R), la réussite à la première insémination (AI), la fertilité (F) et la réforme (C).....	45
Figure 8 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur les performances de reproduction. Les nœuds représentent les mammites (M), la mise à la reproduction (R), la PL (PL), la parité (P), la race (B), et les facteurs communs à toutes les vaches d'un troupeau (T).	48
Figure 9 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur la réussite à la première IA. Les nœuds représentent les mammites (M), la première insémination (IA), la PL (PL), la parité (P), la race (B), et les facteurs communs à toutes les vaches d'un troupeau (T).).....	49
Figure 10 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur le nombre d'inséminations tentées. Les nœuds représentent les mammites (M), le nombre d'IA (Nb), la PL (PL), la parité (P), la race (B), et les facteurs communs à toutes les vaches d'un troupeau (T).....	50
Figure 11 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur les chances de vêler à nouveau. Les nœuds représentent les mammites (M), le vêlage (V), la PL (PL), la parité (P), la race (B), et les facteurs communs à toutes les vaches d'un troupeau (T).	51
Figure 12 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur le niveau de production laitière. Les nœuds représentent les mammites (M), la PL (PL), la parité (P), la race (B), le jour en lait (DIM), et les facteurs communs à toutes les vaches d'un troupeau (T).	52
Figure 13 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur la probabilité de mort instantanée. Les nœuds représentent les mammites (M), la mort (D), la parité (P), la race (B).	53
Figure 14 : Probabilité qu'une vache ait une première insémination artificielle en fonction du statut mammitaire déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 2 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.....	57

Figure 15 : Probabilité qu'une vache ait une première insémination artificielle en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 2 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein..... 57

Figure 16 : Probabilité qu'une vache ait une première insémination artificielle en fonction de sa race Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 2 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne..... 58

Figure 17 : Probabilité qu'une vache ait une première insémination artificielle en fonction de sa PL moyenne. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 2 pour une vache de statut mammite primi_healthy de parité 1 de race Prim'Holstein. 58

Figure 18: Probabilité qu'une vache ait un succès à la première insémination artificielle en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 3 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein. 60

Figure 19: Probabilité qu'une vache ait un succès à la première insémination artificielle en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 3 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou dp_low_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein..... 60

Figure 20 : Probabilité qu'une vache ait un succès à la première insémination artificielle en fonction de sa race. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 3 pour une vache de statut mammite primi healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne..... 60

Figure 21: Probabilité qu'une vache ait un succès à la première insémination artificielle en fonction de sa PL moyenne. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 3 pour une vache PH de statut mammite primi healthy pour la parité 1 et de statut mammite dpLow_healthy pour les autres parités..... 60

Figure 22 : Nombre moyen d'inséminations par vache en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 4 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein. 62

Figure 23: Nombre moyen d'inséminations en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 4 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou dp_low_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein. 62

Figure 24: Nombre moyen d'inséminations en fonction de sa race Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 4 pour une vache de statut mammite primi healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne..... 62

Figure 25 : Nombre moyen d'inséminations en fonction de sa PL moyenne. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 4 pour une vache de statut mammite primi_healthy de parité 1 de race Prim Holstein.62

Figure 26 : Probabilité qu'une vache vêle à nouveau en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 5 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein65

Figure 27: Probabilité qu'une vache vêle à nouveau en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 5 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.....65

Figure 28: Probabilité qu'une vache vêle à nouveau en fonction de sa race. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 5 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.65

Figure 29 : Probabilité qu'une vache vêle à nouveau en fonction de sa PL moyenne. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 5 pour une vache de statut mammite primi_healthy de parité 1 de race Prim Holstein.65

Figure 30 : Production laitière moyenne à 7 jours en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein. ...67

Figure 31 : Production laitière moyenne à 15 jours en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.67

Figure 32 : Production laitière moyenne d'une vache en fonction du jour en lait. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.68

Figure 33 : Production laitière moyenne d'une vache en fonction de la parité. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.68

Figure 34 : Risque qu'une vache meure de manière momentanée en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 7 pour une vache de parité 1 pour les pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.....70

Figure 35: Risque qu'une vache meure de manière momentanée en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau XX pour une vache de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou

dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.	70
Figure 36 : Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement en fonction du statut mammite. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 8 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein	72
Figure 37 : Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement en fonction de la parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 8 pour une vache de de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.....	72
Figure 38 : Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement en fonction de la race. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 8 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.....	72
Figure 39 : Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement en fonction de sa production laitière. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 8 pour une vache PH de statut mammite primi_healthy pour la parité 1 et de statut mammite dpLow_healthy pour les autres parités.	72
Figure 40 : Probabilité pour une vache de guérir au cours du tarissement en fonction de son statut mammite. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 9 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein	74
Figure 41 : Probabilité pour une vache de guérir au cours du tarissement en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 9 pour une vache de de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.	74
Figure 42 : Probabilité pour une vache de guérir au cours du tarissement en fonction de sa race. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 9 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.....	74
Figure 43 : Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement en fonction de sa production laitière. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 9 pour une vache PH de statut mammite primi_healthy pour la parité 1 et de statut mammite dpLow_healthy pour les autres parités.	74
Figure 44 : Probabilité d'une nouvelle infection acquise au cours du tarissement selon le statut mammite en début de lactation. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 10 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein	76
Figure 45 : Probabilité d'une nouvelle infection acquise au cours du tarissement selon la parité. . Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont	

présentés dans le Tableau 10 pour une vache de de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim’Holstein.....	76
Figure 46 : : Probabilité d’une nouvelle infection acquise au cours du tarissement selon la race. Les prédictions ont été générées à partir d’un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 10 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.....	76
Figure 47 : Probabilité d’une nouvelle infection acquise au cours du tarissement selon la PL. Les prédictions ont été générées à partir d’un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 8 pour une vache PH de statut mammite primi_healthy pour la parité 1 et de statut mammite dpLow_healthy pour les autres parités.	76
Figure 48 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ».....	77
Figure 49 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ».	78
Figure 50 : Boxplot montrant la différence de Production laitières moyennes entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario « Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ».....	78
Figure 51 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire ».	79
Figure 52 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire ».	80
Figure 53 : Boxplot montrant la différence de Production laitières moyennes entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire ».	80
Figure 54 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ».	81
Figure 55 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ».	82
Figure 56 : Boxplot montrant la différence de Production laitières moyennes entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ».	83

Table des tableaux

Tableau 1 : Description des différentes catégories de mammites utilisées pour l'étude.....	47
Tableau 2 : Facteurs associés à la survenue d'une première insémination artificielle. Parkat représente la parité, mast_cat1 représente le statut mammite et milk_early_max_scaled représente la PL centrée réduite donnée selon la parité.....	56
Tableau 3 : Facteurs associés à la réussite d'une insémination artificielle. Parkat représente la parité, mast_cat1 représente le statut mammite et milk_early_max_scaled représente la PL donnée selon la parité.....	59
Tableau 4 : Facteurs associés au nombre d'inséminations. Parkat représente la parité, mast_cat1 représente le statut mammite et milk_early_max_scaled représente la PL donnée selon la parité.....	61
Tableau 5 : Facteurs associés à la probabilité de revêler Parkat représente la parité, mast_cat1 représente le statut mammite et milk_early_max_scaled représente la PL donnée selon la parité.....	63
Tableau 6 : Facteurs associés à la PL Parkat représente la parité, mast_cat1 représente le statut mammite et milk_early_max_scaled représente la PL selon une parité donnée.....	66
Tableau 7 : Résultat de la régression de Cox visant à montrer l'impact des mammites sur le risque de mort.....	69
Tableau 8 : Résultat de la régression logistique visant à montrer l'impact des mammites sur la probabilité d'avoir une CCS élevé au dernier contrôle avant tarissement.....	71
Tableau 9 : Résultat de la régression logistique évaluant l'impact des mammites sur la probabilité de guérir au cours du tarissement.....	73
Tableau 10 : Résultat de la régression logistique visant à montrer l'impact des mammites sur la probabilité d'une nouvelle infection au cours du tarissement.....	75
Tableau 11 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour évaluer si les moyennes sont significativement différentes ou non.....	77
Tableau 12 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.....	78
Tableau 13 : test statistiques montrant la significativité de différence entre les moyennes des productions laitières factuelles et contrefactuelles au cours du scénario «Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.....	78

Tableau 14 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire ».Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.	79
Tableau 15 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire ».Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.	80
Tableau 16 : test statistiques montrant la significativité de différence entre les moyennes des productions laitières factuelles et contrefactuelles au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.	80
Tableau 17 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wolcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.	81
Tableau 18 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.....	82
Tableau 19 : test statistiques montrant la significativité de différence entre les moyennes des productions laitières factuelles et contrefactuelles au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ».Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.....	83

Liste des abréviations

IA = insémination artificielle

PL = production laitière en kg

CCS = concentration en cellules somatiques en français exprimé en cellules/mL

Taux de renouvellement = rapport entre le nombre de génisses introduites dans le troupeau et la population totale moyenne sur une population donnée.

AIC = Akaike Information Criterion

I. Introduction

La longévité se définit couramment comme la durée de vie, d'un individu ou d'un groupe d'individus. Elle s'obtient en général, en prenant la durée entre la naissance d'un individu et sa mort (Dallago et al. 2021).

La longévité des vaches laitières a une importance à la fois économique, écologique et sociale. En effet, il a été montré que le fait de garder un animal dans le troupeau plus longtemps permet de réduire le nombre de génisses à élever pour le renouvellement et donc de réduire le nombre d'animaux improductifs. Cela permet également de réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'élevage en ayant moins d'animaux sur l'exploitation (Grandl et al. 2019). Cela a également une composante sociale et de bien-être animal car la capacité à garder un animal plus longtemps et donc à avoir un taux de renouvellement plus faible, peut être indirectement mise en lien avec de meilleures conditions d'élevage (Compton et al. 2017). Le consommateur peut voir cela comme un indicateur positif de bien-être.

La réforme en élevage laitier se définit comme la sortie d'un animal du troupeau. On distingue classiquement deux types de réformes : la réforme volontaire qui intervient généralement suite à la décision de l'éleveur de réformer pour production laitière insuffisante. Et la réforme involontaire, liée à un problème de santé ou de reproduction, qui sans cela n'aurait pas entraîné la réforme de l'animal. Les principales causes de réforme en élevage laitier sont les troubles de reproduction, les problèmes locomoteurs ainsi que les infections intramammaires (Ducrocq 1994). On pourrait croire que cette dichotomie des réformes est simple mais en réalité il n'est pas toujours aisé de savoir pourquoi réellement une vache a été réformée. On peut considérer une vache boiteuse ou à cellules et finalement l'éleveur décide de la garder car elle produit toujours beaucoup de lait. Ou au contraire une vache réformée pour production insuffisante alors qu'en réalité cette vache n'était pas saine ce qui a entraîné une chute en lait, seul signe visible par l'éleveur. Ou bien l'éleveur souhaite faire entrer plus de génisses au sein du troupeau et pour cela il doit réformer des vaches mais ces critères peuvent varier. C'est un processus décisionnel complexe, qui dépend du profil de l'éleveur ainsi que de la façon dont est géré le troupeau.

Cette étude s'intéresse particulièrement aux mammites qui sont des inflammations d'au moins un quartier de la mamelle d'origine quasi exclusivement bactérienne. Elle a pour objectif principal d'étudier les causes et les conséquences d'une mammite et son modèle épidémiologique : dans un premier temps en étudiant l'impact des mammites sur la décision de réforme. Puis dans un second temps en étudiant l'impact des réformes sur la dynamique des infections intramammaires autour du tarissement.

II. Etude bibliographique

A. Réforme et longévité

La réforme se définit comme le retrait d'un animal vivant de l'élevage pour l'envoi à l'abattoir, dans le but de produire de la viande et des sous-produits. Elle se distingue de la mortalité qui se définit comme la mort de l'animal au sein de l'élevage, que ce soit par l'euthanasie ou la mort naturelle. La mort intervient de manière involontaire, le plus souvent suite à une maladie ou une blessure, et réduit le plus souvent la longévité. Elle peut intervenir à tout moment dans la lactation et entraîne une forte perte économique pour l'éleveur. La réforme elle, peut être volontaire comme involontaire mais elle nécessite le plus souvent une période d'engraissement permettant la valorisation bouchère de l'animal. La réforme possède un impact direct sur la longévité car plus les éleveurs réforment des vaches plus ils diminuent la longévité globale de leur troupeau.

1. Principales causes de réforme

On distingue classiquement deux catégories de réformes. Une réforme volontaire, pour production laitière insuffisante, et une réforme involontaire. Cette dernière est souvent la conséquence d'une maladie ou d'un trouble obligeant à l'éleveur à se séparer de sa vache de manière précoce par rapport à ses attentes de production. La réforme involontaire peut être nécessaire pour éviter de garder un animal en souffrance ou malade trop longtemps mais à l'échelle du troupeau, un taux de réformes involontaire trop élevé souligne un problème de conduite de l'élevage. Des études se penchent sur les principales causes de réforme depuis longtemps. Les causes sont le plus souvent variables selon la zone géographique de l'étude, et dépendantes des considérations économiques et techniques. Elles varient beaucoup selon le type de production et de gestion des troupeaux. De plus souvent les études se concentrent sur une cause en particulier et sur son effet direct alors que les causes peuvent également être indirectes par le biais d'une baisse de production ou de productivité (Beaudeau et al. 1993). Les quatre principales causes qui ressortent le plus souvent sont les troubles de reproduction, les infections intramammaires, les boiteries et les troubles métaboliques (Rilanto et al. 2020). Au Québec, une étude sur les risques à l'échelle de l'individu mais également à l'échelle du troupeau a été menée et a montré qu'il existe une grande variation de l'influence du troupeau sur le risque individuel de réforme (Haine et al., 2017). Cette importance de l'influence du troupeau a déjà été soulevée dans les années 90 (Beaudeau et al., 1993).

Il existe également une différence de l'influence du type de production. Si l'on observe les résultats d'une étude menée en Suède, les principales causes de réforme des élevages biologiques sont les infections intramammaires (26,7%), les troubles de fertilité (23,6%) et viennent ensuite les troubles locomoteurs (5,0%). Alors que pour les élevages conventionnels les principales causes sont les troubles de fertilité en premier (25,9%), les infections intramammaires (20,6%) et ensuite les troubles locomoteurs (5,9%). L'étude a cependant également montré qu'en première lactation la grande majorité des réformes est provoquée par un trouble de la fertilité que ce soit en élevage biologique ou en élevage conventionnel (Ahlman et al., 2011).

En élevage biologique au Canada, (Rozzi, Miglior, and Hand 2007) ont montré que les troubles de fertilité sont la principale cause de réforme, suivis par les mammites et les boiteries. La hiérarchie entre causes est donc relativement variable d'une étude à l'autre, cependant, toutes s'accordent sur les principales causes. En France également, les troubles de reproduction, les mammites et les boiteries ressortent comme étant les principales causes de réforme, surtout les troubles survenant durant les premiers mois de la première lactation.

2. Longévité

a) Définition de longévité dans la bibliographie

Dans la littérature on peut trouver différentes définitions de la longévité en élevage laitier. On distingue habituellement la longévité fonctionnelle ou *functional longevity* de la longévité vraie ou *true longevity* (Rostellato et al. 2021) La première se donne en rang de lactation ou en nombre de lactations (Brotherstone, Veerkamp, and Hill, 1997). Elle se définit classiquement comme l'aptitude d'un individu à repousser le moment de la réforme involontaire. La longévité fonctionnelle est une mesure du temps écoulé entre le premier vêlage et le moment de la réforme ou de la mort de l'animal. La longévité vraie, elle, se définit comme l'aptitude d'un individu à repousser la réforme, involontaire comme volontaire. Certaines publications utilisent la durée de vie productive ou *length of productive life*, elle se donne en jours, et débute au moment du premier vêlage également jusqu'à la mort ou la réforme (Grandl et al. 2019). Elle est semblable à la longévité fonctionnelle. La période dite "improductive" de l'animal, donc de sa naissance jusqu'à son premier vêlage est peu utilisée dans les études de survie car le réel évènement d'intérêt qui est l'âge au premier vêlage est directement déductible des différentes définitions de la longévité, données plus haut. Toutes ces définitions fournies plus haut sont données à l'échelle de l'individu, mais il est également possible de raisonner à l'échelle du troupeau. Certaines publications donnent une définition de longévité moyenne, qui peut se donner en mois ou jours (De Vries 2017) et qui se calcule de la façon suivante :

$$\frac{\hat{\text{Âge au premier vêlage moyen}} + 1}{\text{Taux de réforme annuel}}$$

On peut également donner le nombre de jours de lactation cumulés du troupeau moyenné, en prenant l'ensemble des lactations terminées dans l'année. On n'inclut pas les lactations en cours, donc cette définition n'intègre pas les primipares qui n'ont pas encore terminé leur première lactation. Cela donne un effectif d'individus légèrement inférieur à l'effectif réel.

b) Evolution de la longévité des vaches laitière au cours des années

S'il faut évaluer l'impact des mammites sur la longévité des vaches laitières, il est important d'évaluer l'évolution de cette longévité au cours du temps en élevage laitier, que ce soit par l'étude des taux de réforme ou par l'étude des taux de mortalité. Les études qui s'y intéressent ont montré une augmentation du taux de mortalité dans la plupart des régions du monde (Compton et al., 2017) mais pas forcément de changement dans les taux de réforme. Cette observation pourrait expliquer la baisse de longévité que l'on continue d'observer (Dallago et al., 2021).

En effet le taux de sortie du troupeau n'a pas beaucoup évolué au fil des décennies en France et dans le monde. Une étude sur cinq ans de 1989 à 1994 sur 84 élevages laitiers dans l'ouest de la France (Seegers et al., 1998), annonce un taux de renouvellement annuel de 32,3%. Parmi ce taux de renouvellement, 1,2% correspond à de la mortalité au sein de l'élevage, et le reste correspond au renouvellement des vaches réformées. La longévité productive moyenne des animaux était de 36 mois et sur 4 vaches qui rentraient dans l'élevage, 3 n'arrivaient pas en 5^{ème} lactation. Depuis les années 90, ce taux de mortalité semble avoir augmenté en France, avec un taux moyen rapporté de 3,7% en 2005 et 3,8% en 2006 (Raboisson et al., 2011). Cette augmentation a également été rapportée dans d'autres études réalisées en France, qui en plus montrent cette augmentation du taux de mortalité sur toutes les catégories d'âges (Perrin et al., 2011).

Le taux de mortalité aurait donc doublé à triplé en quasiment deux décennies, ce qui paraît relativement inquiétant si l'on associe cette augmentation du taux de mortalité en élevage à la diminution du bien-être animal. Il est important de nuancer ces résultats et de les rapporter aux

conduites d'élevage. En effet, dans les années 90 il était plus courant que les éleveurs envoient un animal souffrant à l'abattoir. Aujourd'hui il devient plus courant d'euthanasier un animal souffrant afin d'éviter une saisie complète ou des pénalités pour l'envoi de ce même animal à l'abattoir (Raboisson et al., 2011).

Si l'on souhaite comparer ces résultats à un pays voisin, une étude en Espagne sur des données datant de 2006 à 2016 montre un taux de renouvellement variant de 25% à 35% avec une plus grande part de vaches en 2^{ème} et 3^{ème} lactations (avec respectivement 22,9 et 21,7%) (Armengol and Fraile, 2018). Cette même étude a trouvé un taux de mortalité assez élevé de 19,4% parmi les animaux sortis. Taux qui d'après les auteurs est plus élevé par rapport à d'autres publications dans d'autres régions du monde et qui pourrait être attribué à une part plus importante du stress thermique (de mai à octobre).

Au Canada, entre 2001 et 2010, une étude (Haine et al., 2017) a montré un taux de réforme moyen de 32% (dans cette étude la réforme est définie comme le retrait du troupeau de l'animal), ce qui semble similaire aux chiffres donnés en élevage laitier actuellement.

c) Longévité et impact économique

L'élevage possède un fonctionnement cyclique, les vaches sont élevées pour produire puis remplacées dès que leur production est jugée insuffisante (Stott, 1994) ou que pour une raison ou une autre il n'est plus intéressant pour l'éleveur de la garder au sein du troupeau en lactation. L'éleveur doit donc sans cesse évaluer les performances économiques de son troupeau. Pour évaluer l'impact économique de la longévité des vaches laitières il est essentiel de prendre en compte le coût de l'élevage des génisses. C'est une période considérée improductive donc ces animaux ne rapportent pour l'instant rien à l'éleveur, mais occasionnent des coûts d'élevage : nourriture, logement... Les éleveurs, dans le schéma classique, gardent la plupart du temps toutes les génisses nées sur l'exploitation pour le renouvellement, mais toutes ses génisses ne serviront pas au renouvellement. Aux Pays-Bas, le coût total d'élevage d'une seule génisse (en prenant en compte le coût de la main d'œuvre) est d'environ 1567 € pour un âge au premier vêlage de 25 mois en moyenne (Mohd Nor et al., 2012). Ils ont également estimé que ce coût contribue à 13% du coût total de production du lait. Au Royaume-Uni, le coût d'élevage d'une génisse a été estimé à 1819 £ ce qui correspond à 2150 € environ (Boulton, Rushton, and Wathes, 2017). La nourriture ayant la plus grosse contribution à ce coût, suivi de la gestion de la litière et du fumier. Selon cette même étude, cela prendrait environ 1,5 lactation pour rembourser ce coût d'élevage avec un âge au premier vêlage compris entre 23 et 25 mois. Pour s'assurer un âge au premier vêlage le plus précoce possible il faut être certain que la génisse ait atteint un poids suffisant ainsi qu'une morphologie et une maturité sexuelle adéquates avant la mise à la reproduction. En France souvent l'âge au premier vêlage se rapproche plus des 28-30 mois.

Grâce aux technologies tels que l'IA ou la transplantation embryonnaire et aux avancées faites en reproduction ces dernières décennies, les génisses en attente pour entrer dans le troupeau des vaches en lactation, sont supposées être plus performantes génétiquement. Il serait donc aisé de penser que les performances économiques du troupeau seraient meilleures dès qu'une vache est remplacée par une nouvelle génisse. Mais les génisses produisent moins au cours de leurs premières lactations et ne commencent à exprimer leur véritable potentiel qu'à partir de la parité 3 voire 4. Une étude américaine a montré qu'une vache en lactation ne devait être remplacée que quand son revenu net marginal attendu devient inférieur à celui d'une vache de remplacement si et seulement si cette dernière est génétiquement plus performante. Cette décision se base sur la comparaison de revenus anticipés (De Vries, 2017). Cependant les études ont montré que l'amélioration génétique attendue chez les taureaux n'est pas suffisamment rapide pour justifier un taux de réforme élevé. Il est donc

plus avantageux de maintenir les vaches dans le troupeau plus longtemps que de les remplacer de manière prématurée.

C'est également la conclusion d'une étude réalisée en Pologne où l'âge moyen à la réforme est de 6 ans après 2,5 à 3 lactations (Adamczyk et al., 2017). Selon les auteurs, les vaches réformées de manière involontaire sont réformées deux fois plus tôt que les vaches réformées de manière volontaire et dans les grands troupeaux ce sont souvent les plus hautes productrices qui sont réformées le plus tôt. Or l'étude recommande d'essayer de garder les vaches laitières les plus hautes productrices le plus longtemps possible et de ne pas élever toutes les génisses dans le but du renouvellement, mais une des questions qui reste difficile à élucider pour le moment est de savoir quelle proportion de génisses garder dans le but du renouvellement.

d) Longévité et impact environnemental

L'élevage laitier, et plus généralement les productions animales, sont très souvent critiquées en tant que source majeure d'émission de gaz à effet de serre. L'émission de ces gaz passe essentiellement par la production de méthane entérique des animaux eux-mêmes, mais également par toutes les machines utilisées pour produire leur alimentation (tracteurs, intrants, conditionnement...) ainsi que toutes les méthodes de transport qui s'intègrent à la filière (transport des animaux, des intrants, de l'alimentation...) et les autres activités nécessaires au maintien d'une exploitation (Flysjö et al., 2011). Calculer l'empreinte carbone de l'élevage laitier est un processus complexe et souvent les études qui ont cherché à l'estimer ont utilisé des modèles simplifiés. Le résultat obtenu le plus souvent n'est donc pas tout à fait la réalité. Il permet tout de même de comparer différents systèmes de production : par exemple, pour les pays dont le mode d'élevage majoritaire est celui qui maximise le temps de pâturage, l'émission de gaz à effet de serre est principalement liée aux fermentations entériques (>50%). Alors que pour les pays qui ont une majorité d'élevages hors-sol, l'émission de gaz à effet de serre provient principalement de la gestion du lisier, de l'alimentation et de l'utilisation d'intrants pour fertiliser les sols (Mazzetto, Falconer, and Ledgard, 2022).

Le nombre d'études s'intéressant à l'impact environnemental de la longévité des vaches laitières est réduit. Cependant leurs résultats semblent plutôt se mettre d'accord sur l'impact favorable de l'augmentation de la vie productive des vaches laitières sur l'environnement. Par exemple, dans une étude (Grandl et al., 2019), conduite sur trente vaches brunes des alpes, les auteurs ont montré que le fait d'augmenter la vie productive des animaux et réduire le nombre de génisses en phase d'élevage (qui contribuent pour une part non négligeable de l'émission de méthane), pourrait être une solution viable pour réduire l'empreinte carbone des élevages laitiers, particulièrement en évitant de réformer des animaux qui n'ont pas pu effectuer plus d'une lactation.

En Suède, une étude conduite entre 2010 et 2018, a démontré une relation positive entre longévité et performances économiques du troupeau. Ils ont également montré une relation en U entre la durée productive moyenne du troupeau et l'efficacité. Cela signifie que l'efficacité augmente avec la durée de vie productive du troupeau mais seulement jusqu'à un certain point (Adamie et al., 2023). Attention tout de même à l'interprétation car cette étude ne prend en compte qu'une moyenne globale de troupeau et non pas la distribution d'âges au sein du troupeau ni même sa taille.

e) Longévité et impact sociétal

Hors contexte d'élevage, l'espérance de vie d'une vache laitière est supérieure à 20 ans (Schuster et al., 2020). Bien évidemment, aujourd'hui une vache laitière est envoyée à l'abattoir avant cet âge car son vieillissement entraîne rapidement une baisse de production économiquement non désirée.

L'attitude du consommateur envers les productions animales est en train de connaître un revirement depuis plusieurs années. En effet la volonté d'avoir une meilleure transparence et une plus grande visibilité sur les conditions d'élevage et de bien-être des animaux semble s'accroître, encourageant même certains consommateurs à se rediriger vers des régimes avec peu voire pas du tout de produits d'origine animale (Graça, Oliveira, and Calheiros, 2015).

La longévité des vaches laitières devient donc un point crucial pour l'évaluation du bien-être animal. D'une part directement car le consommateur condamne de plus en plus l'envoi à l'abattoir d'un animal jeune qui n'a produit que peu de lait au cours de sa vie, pour être directement remplacé par une autre génisse. D'autre part car la réduction de la longévité, secondaire à un problème de santé ou à un trouble organique, est considérée comme un signe de mauvaises conditions d'élevage et d'atteinte au bien-être (Barkema et al., 2015). Cette constatation a également été soulevée par l'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA) qui conclut que tout trouble de santé, comme les mammites, les troubles de reproduction, les troubles locomoteurs ou même les troubles métaboliques qui entraînent un stress organique sont des éléments responsables d'un problème de bien-être animal (EFSA 2009).

Ces troubles, qui sont le plus souvent responsables des réformes involontaires, sont le plus souvent des maladies qui évoluent à bas bruit au sein des élevages. Ils soulignent donc un réel problème de gestion sanitaire et technique des troupeaux. Il est donc essentiel de prendre conscience de l'impact de ces troubles sur la longévité et de s'assurer que l'attitude du consommateur reste positive vis-à-vis de la filière bovine laitière et plus largement des productions animales (Schuster et al. (2020), (Rushen and de Passillé 2024).

Cette constatation semble avoir été faite en Suède, où l'on constate une réduction des traitements vétérinaires depuis 2009 ainsi qu'un accroissement de la longévité depuis 2015 (Owusu-Sekyere et al., 2023).

B. Mammites

1. Etiologie et épidémiologie

Les mammites sont un problème majeur en élevage laitier. Elles peuvent être causées par de nombreux agents différents comme des virus, des champignons, mais elles sont bien plus fréquemment attribuées à des bactéries. Le premier lien établi entre mammité et micro-organismes date de 1887. Et les agents majeurs ont été identifiés dans les années 40, à cela s'ajoute la découverte d'une possibilité d'étiologie multifactorielle dans les années 60 (Sharun et al., 2021). Dans le cas des mammites on distingue classiquement deux grands types bactériens en cause : les bactéries Gram négatives et les bactéries Gram positives. De plus on distingue aussi deux grands modèles épidémiologiques (Garcia, 2004). Le premier est le modèle contagieux, qui fait intervenir plutôt des bactéries Gram positive, dont les plus courantes sont *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae* ou encore *Streptococcus uberis* (Salat et al., 2023). Ce dernier possède de plus la particularité d'être un agent ubiquiste, c'est-à-dire que l'on trouve partout et qui peut se transmettre de plusieurs manières différentes. La transmission se fait d'une vache infectée à une vache saine, généralement au cours de la traite, par le biais des mains du ou des trayeurs, des lavettes réutilisées pour plusieurs vaches ou mal désinfectées, ou encore par le biais des manchons trayeurs. Ces pathogènes se propagent rapidement au sein du troupeau car ils provoquent généralement une infection subclinique qui passe facilement inaperçue. Une grosse quantité de bactéries passent dans le lait. De plus ils tendent à provoquer des infections qui passent rapidement à la chronicité avec parfois des épisodes cliniques sporadiques. Pour ces raisons, on parle en français d'infections à réservoir mammaire. C'est souvent lors d'épisodes cliniques que les éleveurs remarquent l'infection et décident

de la traiter mais généralement ces infections répondent mal aux traitements. L'autre modèle présenté est le modèle environnemental, avec des germes présents dans l'environnement proche de la vache, comme sa litière. Ce sont le plus souvent des bactéries à Gram négatifs issues de matières fécales comme *Escherichia coli*, *Klebsiella spp.* et *Enterobacter* (Salat et al., 2023). Il ne faut pas oublier *S. uberis* qui peut également suivre ce modèle épidémiologique. Comme il a été dit plus haut, l'infection provient généralement de la litière et au vu du mode de vie des animaux, il est presque illusoire d'espérer une totale élimination de ces germes de l'environnement. Il est cependant possible d'envisager la réduction de la pression d'infection par des bonnes pratiques d'hygiène afin de garder une litière la plus propre et sèche possible. Ces germes provoquent plus souvent des formes cliniques qui peuvent avoir des conséquences graves voire même entraîner la mort de l'animal (Hagner et al., 2024). Ce sont souvent des épisodes cliniques qui interviennent juste avant ou après le vêlage pour *E. coli* ou en début de tarissement pour *Klebsiella spp.*, *Enterobacter* et *S. uberis*.

Les formes subcliniques sont responsables de la majorité des cas de mammites avec une estimation de 59,2% des cas, contre les mammites cliniques, qui elles, ne représentent que 3,4% des cas (Sharun et al., 2021).

2. Définition dans la bibliographie

Une étape importante de ce travail est de donner une définition claire du terme mammite pour l'intégrer dans l'étude. Au sens littéral, une mammite est une inflammation de la mamelle. Cette définition, bien que claire, est insuffisante si on souhaite étudier son impact sur la longévité des vaches laitières, car elle donne trop peu d'informations susceptibles de nous indiquer par quels mécanismes une mammite pourrait avoir une influence sur la fin de vie d'un animal. Si on regarde les définitions de mammites utilisées dans la littérature, on remarque qu'il n'y pas de réelle homogénéité. Certains pays comme le Danemark interdisent aux éleveurs l'utilisation d'antibiotiques en automédication, ce qui fait que chaque traitement est administré et enregistré par le vétérinaire lui-même. Il devient alors plus facile d'avoir accès à l'utilisation réelle des traitements et l'indication pour laquelle le traitement a été effectué. C'est ce qu'ont décidé des auteurs danois (Neerhof et al., 2000) afin de définir la mammite comme un évènement clinique ayant des conséquences visibles reportées par les vétérinaires lors de l'enregistrement des traitements effectués sur un animal (mammite au tarissement, mammite suite à une lésion du traitement, mammite aiguë, etc...). Dans d'autres publications (Archer et al., 2013 ; Sewalem et al., 2006), la mammite a été définie comme une augmentation de la concentration en cellules somatiques (CCS) au-dessus d'un certain seuil, sans faire de distinction entre mammite clinique et subclinique. Il est clair qu'il devient difficile de comparer les études entre elles sachant que les définitions sont différentes et donc se basent sur des données très différentes. Ici, c'est bien toute la difficulté : comment donner une définition de mammite assez pertinente pour répondre pleinement ou au moins en grande partie à notre problématique ? La première chose qui a été faite c'est de prendre le terme "mammite" et de le décomposer au maximum afin d'obtenir une définition la plus juste possible. Pour cela il faut tenir compte de son épidémiologie ainsi que de son étiologie.

3. Mécanisme physiopathologique

Quand le germe pénètre dans la mamelle et provoque une infection, le terme mammite est employé car cette infection provoque l'inflammation. C'est cette inflammation qui est responsable des principaux signes observés, c'est-à-dire un gonflement, une rougeur, de la douleur, de la chaleur et une modification macroscopique du lait avec modification de sa couleur, de sa texture, etc... (Sharun et al., 2021).

La mamelle n'est pas dépourvue de protection, en effet cette dernière possède une barrière de protection composée de la peau, des sphincters permettant la fermeture des trayons, des cellules épithéliales mais également des cellules inflammatoires présentes en tout temps comme les macrophages qui reconnaissent des structures communes à tous les pathogènes appelées *Pathogen-Associated Molecular Pattern (PAMP)*. Et enfin un élément essentiel, la flore commensale normalement présente (Ballou, 2012). Cette flore est un excellent allié pour empêcher l'installation et la multiplication des bactéries pathogènes. Toute dysbiose ou toute blessure du trayon et de la mamelle mettent à mal cette barrière de protection favorisant la survenue d'une mammite.

Quand cet équilibre est rompu et que l'infection est possible, les bactéries se multiplient dans la citerne du trayon et de la glande mammaire et progressent ensuite dorsalement dans le parenchyme, lieu de production du lait. En fonction de la bactérie, l'adhésion aux cellules est plus ou moins efficace. Par exemple *S. aureus* et *S. agalactiae* adhèrent plutôt bien contrairement à *E. coli* qui cependant se multiplie bien plus rapidement. Cette fonction d'adhérence est la raison pour laquelle le flush mécanique de la traite est une arme si importante dans le combat contre l'infection, et qui rend la vache si vulnérable lors de la période de tarissement. Une fois la pénétration faite dans le parenchyme, les bactéries entrent en contact avec les leucocytes présents dans le lait et ce contact initie l'inflammation. Une fois ce contact établi et la reconnaissance faite, des médiateurs de l'inflammation comme des cytokines, des interleukines et du *TNF α* sont produits par les macrophages et permettent le recrutement par chimiotactisme de polynucléaires neutrophiles (PN) et autres leucocytes compétents sur site. Ceci est permis par la vasodilatation, l'augmentation de la perfusion sanguine ainsi que l'augmentation de la perméabilité vasculaire (Akers and Nickerson, 2011).

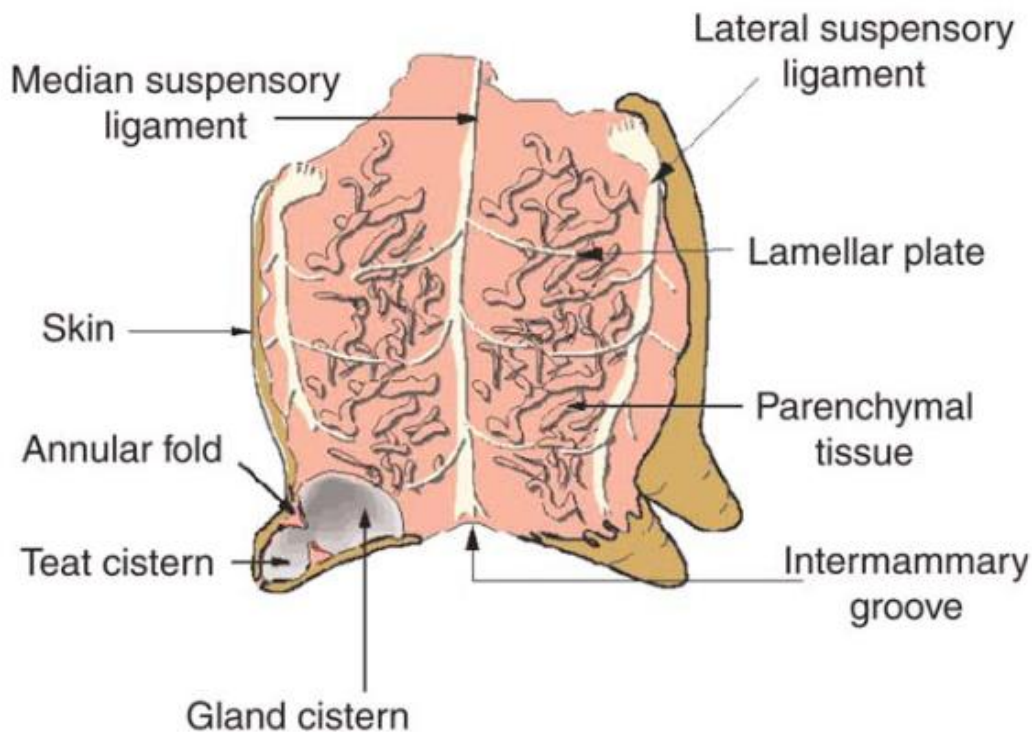


Figure 1 : Diagramme d'une section longitudinale de la mamelle d'une vache laitière d'après Nickerson and Akers (2011)

Les mammites semblent particulièrement préjudiciables autour de la période de parturition, moment où la prolifération et la différenciation des cellules alvéolaires est la plus active. Plus les cellules sont différenciées, plus elles semblent produire du lait en quantité importante. De plus les mammites peuvent avoir comme effet le blocage des canaux mammaires et nuire à l'éjection du lait ce qui induit secondairement une réduction de la production. Enfin par le biais d'effets systémiques comme de l'hyperthermie ou de l'anorexie qui vont également entraîner une baisse de la production (Akers and Nickerson, 2011).

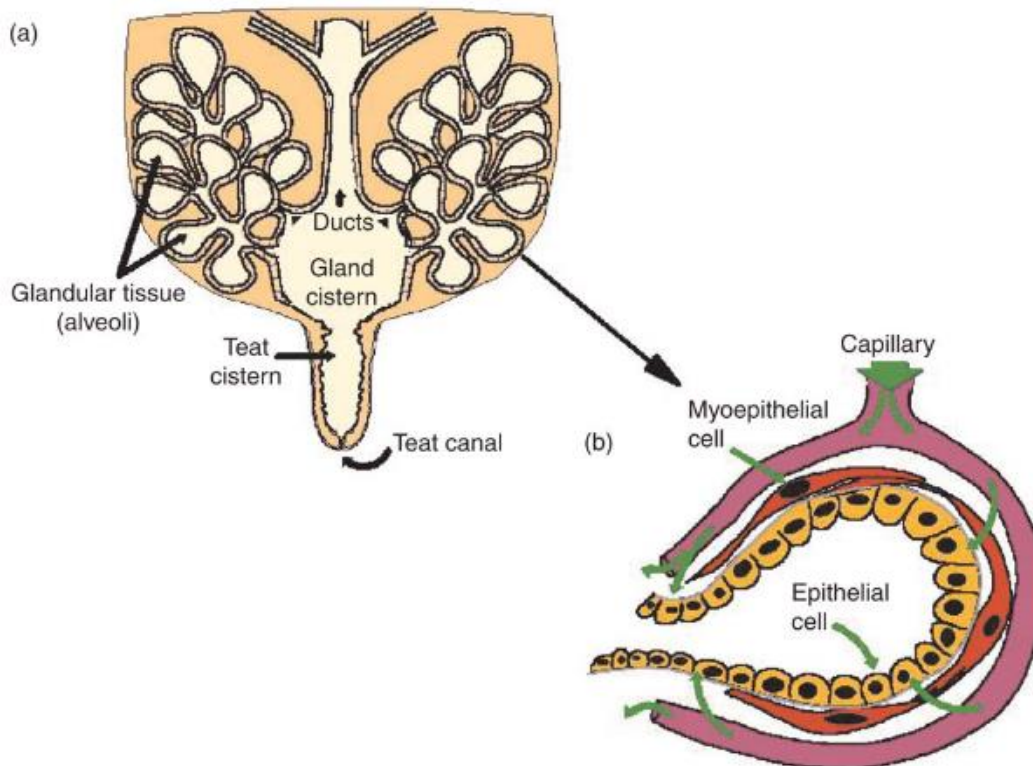


Figure 2: (a) Diagramme d'un quartier illustrant le tissu glandulaire. (b) section d'une alvéole mammaire. D'après Nickerson and Akers (2011)

A l'échelle du tissu, c'est la réponse inflammatoire qui semble être délétère pour la PL. Le tissu infecté semble posséder une surface réduite en tissu alvéolaire et une quantité plus importante de stroma conjonctif. Il y aurait une différence entre le cas d'une inflammation aiguë qui se traduit par des petits et moyens canaux bouchés par de la fibrine, des leucocytes et des bactéries. Se produit également une vacuolisation des cellules épithéliales une lumière alvéolaire distendue par la stase lactée, puis réduite par l'œdème interstitiel. Cela entraîne une multiplication des bactéries, une involution puis une nécrose des tissus. Dans le cas de mammites chroniques l'infection se présente sous la forme de foyers dispersés et localisés grâce aux phagocytes. A terme une fibrose s'installe puis une involution se produit également.

Au fur et à mesure que l'infection progresse, les lumières se remplissent de polynucléaires neutrophiles qui dégènèrent puis laissent place à davantage de macrophages et monocytes. Des lymphocytes apparaissent également et semblent responsables des dégâts cellulaires permettant la

progression des PN. Il semblerait que ce soit cette réaction en chaîne qui soit responsable ou du moins qui ait contribué au détachement ou à la dégénérescence de la couche cellulaire sécrétoire.

Les données suggèrent que l'augmentation du nombre de PN dans l'épithélium des extrémités distales du trayon et dans le lait des citernes pourrait jouer un rôle crucial dans les événements initiaux qui empêchent une infection de la glande mammaire (Akers and Nickerson, 2011).

4. Importance de la période de tarissement dans l'épidémiologie des mammites

La période de tarissement est une période particulièrement à risque pour les infections intramammaires. C'est une période de transition, les vaches produisent encore du lait mais ne sont pas traitées, ce qui entraîne la stagnation du lait, en début et en fin de période tarie, et en fait un excellent milieu de culture pour les bactéries. De plus la pression du lait augmente et entraîne l'ouverture du sphincter qui permet l'ouverture du trayon. Ce dernier devient une porte d'entrée idéale pour les germes de l'environnement, d'autant plus sans l'effet mécanique d'évacuation lors de la traite habituelle (Ballou, 2012). Les germes sont donc essentiellement des germes de l'environnement. *E. coli* entraîne souvent des infections en période péri-partum, juste avant ou après le vêlage. Tandis que *Klebsiella spp.* ou *Enterobacter* ont plutôt tendance à provoquer des infections en début de tarissement (Garcia, 2004). Le tarissement est le moment de choix pour traiter les animaux et tenter de guérir une infection existante. En effet, durant la lactation les animaux passent à la traite au minimum deux fois par jour et les éleveurs ne peuvent pas se permettre de perdre plusieurs jours de traite afin de traiter sa vache. De plus une étude a montré qu'il n'y a pas d'intérêt à traiter une infection subclinique au cours d'une lactation (Van den Borne et al., 2019). Un bouchon de kératine se forme naturellement dans le trayon mais en tout début de période de tarissement les vaches sont particulièrement vulnérables. Même principe en toute fin quand la lactogénèse recommence et que ce bouchon tombe. C'est pour cette raison qu'aujourd'hui la très grande majorité des éleveurs mettent en place un obturateur, à base de bismuth, en association ou non avec des antibiotiques lors du tarissement (Golder, Hodge, and Lean, 2016). Ces mesures sont cependant inutiles si les recommandations en termes d'hygiène de l'environnement et de conduite ne sont pas respectées. Une vache avec un niveau élevé de PL avant tarissement est plus à risque de développer une infection, particulièrement si cette période de tarissement est courte. Durant la période sèche, un maximum d'attention doit être portée à l'hygiène de la litière, et ce tout au long de la période de tarissement. Le risque de développer une nouvelle infection augmente avec la parité. Une étude a estimé que les chances de développer une infection pendant la période tarie pour un quartier sain est de 16,7% (Dingwell et al., 2002).

5. Impact économique

La mammite est la maladie d'élevage d'importance économique la plus élevée en élevage laitier en France et dans le monde, avec l'apparition ces 20 dernières années d'une inversion dans les modèles épidémiologiques avec l'augmentation du modèle environnementale Bar et al. (2008). Une étude réalisée au Danemark a essayé d'estimer le meilleur modèle économique selon les différentes modalités de traitement en fonction de la présence de cas cliniques et de cas subcliniques. Ils ont montré les meilleurs résultats sur les revenus annuels étaient obtenus quand la priorité était portée sur la prise en charge des mammites subcliniques plutôt que clinique. Que ce soit par le biais de traitement mais également de décision de réforme. De plus cela permettait de réduire l'apparition de nouveaux cas. Ce modèle montrait cependant de moins bons résultats si l'épidémiologie était environnementale, il est donc primordial d'adapter la gestion en fonction du troupeau et il faut dans tous les cas être prêt à choisir entre l'usage de traitements médicamenteux ou accepter d'envoyer précocement un animal à l'abattoir. Cette décision est fortement dépendante des caractéristiques de

la vache et surtout de son niveau de production laitière (Gussmann et al., 2019). Les pertes attribuables aux mammites comprennent à la fois les pertes en production laitière, le coût des traitements vétérinaires ainsi que de la mise à l'écart du lait au cours des traitements, mais également le coût des pertes dus à une réforme précoce ainsi qu'au besoin de renouvellement (Sinha, Thombare, and Mondal, 2014). Plusieurs études se sont fixé pour objectif d'estimer le coût de ces pertes. Etant donnée qu'il est difficile d'estimer ces pertes sur le terrain par manque de temps, de moyens et de données. La plupart des études suivantes utilisent la méthode de simulation stochastique, à partir d'hypothèses, qui donne de bonnes estimations mais dont les résultats restent influencés par des éléments aléatoires. De plus s'il n'y a pas de données on peut tirer des conclusions erronées. Sur cinq élevages de l'état de New-York, le coût moyen d'une mammite clinique est estimé à 179\$ par cas donc 115\$ en perte de production et 50\$ en coût des traitements. Ce coût est d'autant plus élevé que le niveau de production des vaches est élevé, mais le traitement semble pleinement justifié car la perte lactée serait d'autant plus préjudiciable (Bar et al., 2008). Une autre étude a préféré séparer ce coût entre primipares et multipares et a estimé le coût d'une mammite à 326\$ pour une primipare et 427\$ pour une multipare, avec plus d'un tiers de ces pertes imputables à la baisse et à la perte de production laitière (Liang et al., 2017).

Ces études sont très utiles pour visualiser l'importance des pertes économiques. D'autres études ont voulu aller encore plus loin en estimant les pertes imputables au cas cliniques et aux cas subcliniques mais également en séparant par bactérie (Halasa et al., 2009). Quatre bactéries composent le modèle : *S. aureus*, *S. uberis*, *S. dysgalactiae* et *E. coli*. Les résultats finaux montrent que les pertes avec *S. dysgalactiae* sont en moyenne de 674€, 790€ pour *S. uberis*, 838€ pour *E. coli* et finalement 2594€ pour *S. aureus*. Les variations entre bactéries s'expliquent par la différence dans le taux de transmission des différents germes. Les différences intra-groupe étaient également importantes du fait des différences entre niveau de production des vaches laitières mais également leur parité et leur state de lactation.

6. Lien entre mammite et longévité

Comme il est dit dans l'introduction, la décision par l'éleveur de réformer une vache peut être soit volontaire, car il considère que la vache ne produit plus suffisamment de lait et qu'il est temps de la remplacer par une génisse. Soit involontaire, le plus souvent lié à un problème de santé ou de reproduction forçant l'éleveur à se séparer de son animal de manière précoce par rapport à ses attentes pour chaque animal.

Un certain nombre d'études se sont intéressées à l'implication des mammites dans la réduction de la longévité des vaches laitières, la mammite étant la maladie la plus représentée en élevage laitier. Une étude de survie au Danemark a cherché à démontrer qu'une vache traitée pour mammite au cours de sa lactation avait une probabilité plus élevée d'être réformée au cours de cette même lactation Neerhof et al. (2000). Dans cette étude, les auteurs montrent également qu'être traité pour une mammite au cours d'une lactation n'a pas d'impact sur la probabilité d'être réformé à la lactation suivante. Aux États-Unis, sur des élevages de Holstein et de Jersiaises (Caraviello et al., 2005) Ils ont montré que les vaches avec une CCS moyenne par lactation très élevée ($SCC > 700\ 000$ cellules/mL) avaient 2 à 4 fois plus de chances d'être réformées de manière générale et 10 à 25 fois plus de chances d'être réformées pour cause de mammites. Cette observation est d'autant plus vraie pour les élevages qui maintiennent une CCS de troupeau faible, ce qui serait donc le reflet d'une politique de réforme plus sévère dans ces élevages. Ils ont également observé que les vaches avec une CCS très faible étaient également plus à risque d'être réformées, particulièrement dans les élevages avec une forte prévalence de germes responsables de mammites, mais aucune conclusion ne peut encore être émise sur la possible existence d'une résistance immunitaire persistante induite par une première inflammation de la mamelle. Au Canada, Sewalem et al. (2006) ont démontré qu'au-delà d'un certain

seuil, la CCS augmente considérablement le risque de réforme, peu importe la race (ici ils ont pris Holstein, Jersiaise, Ayrshire). Selon eux, la recherche d'une amélioration de la santé mammaire des troupeaux serait positivement corrélée à l'amélioration de la longévité des animaux dans ces troupeaux. Sur des élevages biologiques aux Etats-Unis, Fernandes et al. (2021) ont démontré que les vaches qui présentaient une CCS élevées les trois derniers mois de la précédente lactation, avaient plus de chance de présenter une CCS élevée durant le premier mois de la lactation en cours (ainsi qu'une CCS linear score plus élevée au cours de la lactation). Ces mêmes vaches présentaient également une probabilité plus élevée d'être réformées. Il est tout de même important de rappeler qu'aux Etats-Unis, l'utilisation d'antibiotiques en élevage biologique est totalement interdite, les vaches nécessitant des traitements antimicrobiens doivent être retirées du troupeau, et leurs produits devront passer en conventionnel.

Les études qui se sont penchées sur le sujet semblent donc s'accorder sur l'importance de la gestion de la santé mammaire dans la recherche de l'amélioration de la longévité en élevage laitier.

7. Niveau de production laitière

La production laitière est également impactée par la présence d'une mammite. Dans une étude aux Etats-Unis Gröhn et al. (2004) ont voulu estimer l'effet d'une première infection sur la PL au cours de la lactation. Selon leurs observations, les cas de mammites semblaient apparaître plus tôt au cours de la lactation pour les primipares. Pour ces dernières la chute de PL apparaissait quelques semaines avant le diagnostic de mammite clinique et s'étendait jusqu'à quelques semaines après le diagnostic. Pour les multipares, pas de chute était observée en début de lactation mais une nette chute était observée autour de la période du diagnostic avec souvent une remontée quelques semaines après. Ils ont également noté que les multipares atteintes de mammites étaient plus souvent des fortes productrices et qu'elles ne regagnaient jamais réellement leur production d'avant mammite. Cette observation a été sujette à des études qui ont montré une corrélation positive et défavorable entre le niveau de PL et l'incidence des mammites, ce qui signifie que des niveaux plus élevés de PL sont génétiquement associés à une incidence accrue de mammites. Ce qui pose un défi pour la sélection génétique des vaches laitières (Koeck et al., 2014). Pour revenir aux résultats de l'étude précédente (Gröhn et al., 2004), les auteurs ont également observé une différence de la perte de PL en fonction du germe incriminé : par exemple, une primipare qui a contracté un *S. aureus* en début de lactation aurait une perte estimée à 677 kg pour cette lactation et cette estimation pourrait être majorée pour les multipares, surtout si c'est une haute productrice, auquel cas la perte lactée pourrait être d'autant plus importante.

D'autres études se sont penchées sur la perte de PL provoquée par une atteinte subclinique. Au Brésil, Gonçalves et al. (2020) ont voulu observer l'effet d'une atteinte subclinique chronique en s'appuyant sur la production par quartier afin d'éviter un éventuel effet de dilution provoqué par le mélange des quatre quartiers. Ils ont montré une baisse de production laitière, une augmentation en matière grasses et en protéines ainsi qu'une baisse de la concentration en lactose pour les quartiers infectés, significativement importantes dans le cas d'infection par des pathogènes majeurs tels que *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae*, *Streptococcus uberis* et *Escherichia coli*. La composition semble également impactée avec un lait moins qualitatif.

8. Performances de reproduction

La constante décroissance des performances de reproduction en élevage laitier est directement liée à la sélection génétique intense qui se fait sur la capacité à produire plus de lait, au détriment des autres fonctions physiologiques de l'organisme.

La mammite est la maladie la plus commune et la plus répandue qui affecte les vaches laitières en France et dans le monde.

Des études ont montré que la survenue d'un épisode de mammite clinique survenant dans les jours qui suivent l'insémination artificielle (IA) diminue fortement les chances de conception de l'animal inséminé (Hertl et al., 2010).

Rahman et al. (2012) ont démontré que la présence d'une mammite chronique sévère entraînait une baisse significative de la vascularisation corticale de l'ovaire, une réduction du nombre de follicules secondaires ainsi qu'une baisse de la teneur en protéine GDF-9, qui est un facteur de croissance et de différenciation intervenant notamment entre le passage du follicule primaire au follicule secondaire.

Des études (Hertl et al., 2010 ; Hertl et al. 2014 ; Dalanezi et al. 2020) soulèvent également l'hypothèse selon laquelle les mammites à Gram négatif avaient un impact négatif plus important sur la reproduction que les mammites à Gram positif, quand celle-ci survient autour de la période de l'IA. Ce résultat semble contraster avec d'autres études qui n'ont trouvé aucune différence sur la catégorie du germe impliqué dans la mammite, sur la baisse de performance en reproduction, voire même qui ne considèrent pas l'association entre mammites et performances reproductrices comme étant significativement importante (Hudson et al., 2015).

L'effet négatif des mammites subcliniques a également été soulevé par certaines études (Schrick et al., 2001). En effet d'après cette étude, les vaches qui présentent une mammite clinique ou subclinique dans la période avant la première insémination (IA), avaient un intervalle vêlage-première IA augmenté ainsi qu'un nombre d'IA par vache augmenté. Les vaches diagnostiquées d'une mammite clinique après la première IA présentaient un nombre d'IA augmenté contrairement aux animaux diagnostiqués d'une mammite subclinique. Et enfin les animaux diagnostiqués d'une mammite subclinique avant la première IA qui par la suite ont été diagnostiqués d'une mammite clinique présentaient un intervalle vêlage-première IA augmentée ainsi qu'un nombre d'IA augmenté.

9. Lien entre CCS et mammites

a) Dans le cas de mammites subcliniques et cliniques

De nombreuses études se sont intéressées au lien entre CCS individuelles et la survenue d'un épisode clinique, le but étant de se servir des CCS comme d'un outil diagnostique ou prédictif d'un épisode de mammite clinique. Un grand nombre de ces études a émis l'hypothèse d'une réponse différente selon le pathogène (Dohoo and Leslie, 1991 ; Coffey, Vinson, and Pearson, 1986 ; Reneau, 1986 ; Bradley and Green, 2005). Dans ces études, ils distinguent les pathogènes mineurs tels que *Corynebacterium bovis*, Staphylocoques à coagulase négative et microcoques, des pathogènes majeurs, tels que *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae*, *Streptococcus uberis* et *Escherichia coli*. Ces derniers entraîneraient une réponse immunitaire plus importante et donc des hausses de CCS plus élevées. La sensibilité et la spécificité de l'utilisation du comptage cellulaire comme outil prédictif d'une mammite clinique seraient donc plus élevées dans le cas d'un pathogène majeur. Cela voudrait donc dire que dans le cas de pathogènes mineurs l'utilisation du comptage cellulaire entraînerait un nombre important de faux négatifs. Ce qui rend son utilisation peu intéressante dans le cas d'élevages avec un taux fort de pathogènes mineurs. Des études soulignent également l'importance des différentes causes de variations des CCS qui peuvent être indépendantes de la présence ou non d'un germe ou du type de germe comme :

- La parité : une multipare aurait en général une CCS plus élevée qu'une primipare. Les vaches qui auraient déjà connue une infection tendent à avoir une réponse cellulaire plus élevée.

- Le stade de lactation : il y a souvent un pic de cellules qui survient juste après le vêlage et qui redescend dans les jours suivant en absence de toute autre cause d'inflammation.
- Le nombre de quartiers infectés : si un seul quartier est touché par l'inflammation, la CCS sera considéré comme un dilution du résultat réel car l'inflammation se produit à l'échelle du quartier mais le comptage reflète la cellularité de la mamelle.
- Variation diurne : liée à la traite. Selon le moment de la journée, les cellules peuvent être augmentées, surtout dans les heures qui suivent la traite.
- Stress : il y aurait un effet du stress dans la variation du comptage cellulaire, notamment lors de stress thermique. Ces publications suggèrent également que le comptage cellulaire peut ne pas être très performant pour détecter les vaches avec de nouvelles infections, particulièrement dans les élevages avec beaucoup de cas subcliniques à pathogènes mineurs.

Il est important de souligner que la sensibilité et la spécificité dépendent du seuil de cellules utilisé pour qualifier un animal comme sain ou infecté (Reneau, 1986). Le seuil utilisé pour détecter plus d'infections subcliniques à pathogènes majeurs devrait varier selon la race, la parité et la prévalence du troupeau. Selon Madouasse et al. (2010), le seuil de transition semble être plus bas pour les génisses que pour les multipares.

Selon Bradley and Green (2005), en utilisant un seuil de 200 000 cellules/ml on atteint une sensibilité d'environ 70% et une spécificité d'environ 80%. Mais comme précédemment ils soulignent que la parité est un élément important à prendre en compte. Une primipare au-dessus d'un million de cellules sur plus de trois contrôles a plus de chance d'être réellement infectée qu'une vache en cinquième lactation qui possède deux contrôles légèrement au-dessus du seuil de 200 000 cellules/ml. On ajoute à cela également que parfois une simple variation, même en dessous du seuil peut être le signe de l'acquisition d'une infection. De plus, selon cette même étude, le comptage cellulaire serait un meilleur indicateur d'infection chronique que d'infection aiguë.

10. Notions statistiques utilisées dans l'étude

a) Inférence causale

Si l'objectif est de prévenir une partie des réformes, il est important d'identifier les causes. De plus, si l'on s'intéresse aux mammites, la réforme des vaches peut avoir des conséquences sur la dynamique des infections intramammaires et sur la production laitière. Il est donc nécessaire d'aller au-delà des associations et de comprendre les relations causales qui interviennent.

Avant même de commencer toute modélisation ou d'essayer de répondre à un problème par l'analyse de données, il est important de comprendre correctement les relations de cause à effet. Pour cela il faut connaître les bases de l'inférence causale et nous en profiterons pour introduire la notion d'"estimand".

L'inférence causale est le processus par lequel on établit une relation de causalité entre un élément et ses effets. Elle s'attaque à une question fondamentale : Comment déterminer si un évènement est la cause d'un autre ? Nous observons quotidiennement qu'un évènement peut en causer un autre, par exemple on observe qu'un médicament soulage la douleur. Mais en réalité établir une relation de cause à effet est bien plus complexe qu'il n'y paraît. En médecine, elle est essentielle pour identifier les traitements efficaces et comprendre les facteurs de risque des maladies. Elle s'appuie sur des méthodes statistiques et des outils rigoureux en tenant compte de divers facteurs tels que :

- La causalité : une cause est un évènement qui entraîne le changement d'une variable, un effet.

- Les variables : ce sont les éléments que l'on mesure ou que l'on observe et qui peuvent être modifiés par la causalité.

Par exemple, si on considère qu'une vache est atteinte d'une infection intramammaire d'origine bactérienne, comment déterminer si la survenue de cette affection a pu causer la réforme précoce de cette vache par rapport à une vache qui n'a jamais été atteinte d'une infection intramammaire.

Une expérience idéale permettrait de comparer les issues potentielles (en anglais *potential outcomes*), comme la survenue ou non d'une réforme, en fonction d'évènements précis mesurés chez une même vache, comme la présence ou non d'une infection intramammaire. C'est la façon la plus classique de se représenter l'impact d'un évènement (une variable explicative) sur une issue (la variable dépendante) grâce aux différentes données collectées. Mais les données ne sont basées que sur des observations collectées en conditions réelles. Il n'est souvent pas possible de tirer de conclusion sur le scénario qui prend l'issue opposée.

Si nous étions dans un monde idéal, avec un accès à toutes les données réelles comme non réelles, il serait possible d'explorer les "Et si... ?" d'un évènement, autrement appelés les *contrefactuels*. L'approche contrefactuelle est une méthode consistant à modéliser des réalités alternatives, c'est-à-dire des scénarios qui auraient pu se produire si un évènement ou une condition avaient été différents. Le but est de comprendre l'effet causal d'un facteur en analysant ce qui aurait pu se passer si l'évènement n'avait pas été présent. Cette approche a bien entendu des limites, elle repose sur des hypothèses qui peuvent être difficiles à vérifier. On ne connaît jamais ce qui se serait réellement passé. Elle reste cependant intéressante pour essayer de définir les conséquences d'un tel changement.

En principe la méthode la plus rigoureuse pour établir une relation de cause à effet repose sur la comparaison de différents groupes et la randomisation dans l'allocation à ses différents groupes. Ces deux principes sont fondamentaux dans la conception expérimentale, pour garantir l'objectivité et la validité des résultats de l'étude.

La randomisation consiste à attribuer de manière aléatoire les sujets ou les unités expérimentales à différents groupes, dans le but de minimiser les biais. Quand l'échantillon d'essai est randomisé, le groupe choisi pour le traitement n'a pas d'importance car les groupes sont interchangeables.

Par exemple, si on scinde notre population de vaches laitières en deux groupes, *A* et *B*, le risque de réforme pour le groupe *A* est le même que pour le groupe *B* si le groupe *A* reçoit le même traitement que le groupe *B*. Le traitement étant ici la survenue d'une mammitite. Toutefois, dans ce cas, il n'est pas possible d'induire des mammites de manière aléatoire chez des vaches laitières, pour des raisons éthiques notamment. La randomisation n'est donc pas possible. On doit alors utiliser des données observationnelles, en prenant garde d'éviter les biais inhérents à ce type d'études. En effet, il n'est pas garanti que les vaches avec et sans mammites ne soient pas différentes sur d'autres caractéristiques que l'infection. Si de telles différences existent et qu'elles sont associées à la survenue de la réforme, alors l'analyse des associations entre mammites et réformes sera biaisée.

L'enjeu est ici de rendre les groupes étudiés comparables en tout point, à l'exception de la valeur de la variable d'intérêt. Une conséquence de l'égalité de ces risques (conditionnels) dans tous les sous-ensembles définis par le statut de traitement, est qu'ils doivent être égaux au risque marginal sous la valeur de traitement dans l'ensemble de la population. C'est ce qu'on appelle la *randomisation marginale*.

En réalité, il est parfois difficile d'obtenir une interchangeabilité immédiate des groupes. Il est parfois nécessaire d'ajouter une condition spécifique d'interchangeabilité qui suppose que les groupes ne sont comparables qu'après avoir pris en compte une certaine variable de confusion.

Par exemple, les groupes *A* et *B* sont interchangeables que si on considère des animaux mis à la reproduction. On parle alors de *randomisation conditionnelle* (Hernan and Robins, 2024).

b) *Directed Acyclic Graphs (DAGs)*

Les Directed Acyclic Graphs (DAGs) ou graphiques orientés acycliques en français sont des outils puissants en inférence causale pour représenter les relations de cause à effet entre variables. Leur intérêt est de pouvoir identifier les variables à inclure dans un modèle. Ces DAG contiennent des nœuds et des flèches (ou arêtes). Les nœuds représentent les variables. Entre chaque variable, les arêtes indiquant le sens de la causalité. Ce qu'il est important de noter, c'est qu'il n'y a pas de boucles fermées, c'est-à-dire, qu'il n'y a pas de chemin qui revient à un nœud, d'où la qualification d'acyclique. Un DAG de qualité permet de visualiser des relations causales complexes, en les décomposant de manière visuelle, permettant ainsi de faciliter la compréhension des interactions entre les variables. Il permet de formuler des hypothèses sur ces interactions en différenciant les variables observables des variables non observables. Enfin il offre un moyen clair et concis de communiquer les résultats d'une étude avec un public moins technique.

Il existe plusieurs types de relations représentées par les DAGs :

- Les *chaînes* : Par exemple pour illustrer très simplement la relation entre une mammite *M* ayant un impact sur l'IA, qui elle aura un impact sur la réforme *R*.



Figure 3: Graphe orienté acyclique montrant l'exemple d'une chaîne.

- Les *fourches* : Par exemple pour illustrer la relation entre mammite et IA, et entre mammite et PL.

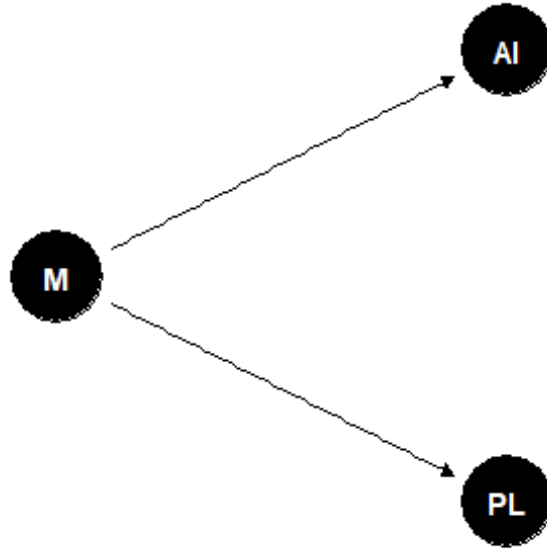


Figure 4 : Graphe orienté acyclique montrant l'exemple d'une fourche.

- Les *collisions* : par exemple pour illustrer l'impact de l'IA sur la réforme et l'impact de la PL sur la réforme.

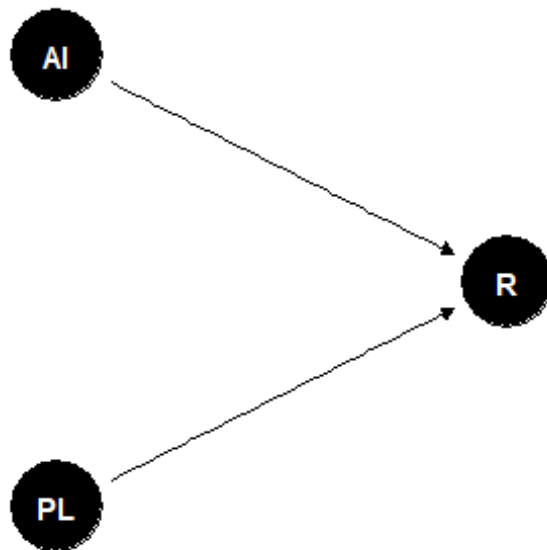


Figure 5 : Graphe orienté acyclique montrant l'exemple d'une collision.

c) Estimands

L'« estimand », c'est le sujet de l'enquête, c'est la quantité que l'on cherche à évaluer qui représente l'effet causal que l'on souhaite mesurer. Il joue un rôle central car il permet de clarifier la question de recherche, choisir la méthodologie adéquate et donner une signification claire et rigoureuse aux résultats obtenus. Il existe plusieurs types d'estimand. L'article de Lundberg, Johnson, and Stewart

(2021), propose d'étudier le problème en utilisant deux estimands. Le premier est l'estimand théorique. C'est l'objectif que l'on cherche réellement à atteindre dans l'étude, en dehors du modèle statistique. Il comporte deux éléments :

- La quantité spécifique à chaque unité (individu, groupe) qui peut être un résultat observé, un résultat potentiel, la différence entre deux résultats potentiels voire même la combinaison de plusieurs interventions.
- La population cible sur pour laquelle on veut estimer cette quantité spécifique.

L'estimand théorique représente donc ce que l'on voudrait vraiment savoir si on avait accès à toutes les données possibles, pour tous les individus et dans tous les scénarios envisageables. Le second est l'estimand empirique, qui se base uniquement sur des quantités observables dans les données.

La première étape est donc de chercher les "estimands" et de réussir à établir des relations de causalité ou d'association. Les DAGs (présentés dans la section précédente) sont un bon moyen d'illustrer le lien entre l'estimand théorique et l'estimand empirique.

Si l'on doit retranscrire cette notion dans le cadre de l'étude, l'estimand théorique serait « Effet de la survenue d'une mammites sur la probabilité de réforme chez les vaches laitières françaises ». Selon la méthode statistique choisit, il peut être un risque relatif, un odds-ratio (OR) ou une différence de risque. Il est très compliqué avec nos données de quantifier formellement cet effet. On peut cependant le diviser en plusieurs petits effets empiriques qui sont plus accessibles avec nos données. Comme l'effet de la survenue d'une mammites sur la probabilité de mise à la reproduction, l'effet de la survenue d'une mammites sur la probabilité de mort ou encore l'effet de la survenue d'une mammites sur la production laitière.

C. Modèles statistiques utilisés

1. Régression linéaire

La régression linéaire est une méthode statistique utilisée pour modéliser la relation entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables explicatives. Elle implique que cette relation soit linéaire et que les variables explicatives soient indépendantes. De plus la variance des erreurs doit rester constante et les erreurs doivent suivre une distribution normale.

Dans le cas d'une régression linéaire multiple, c'est-à-dire composée de plusieurs variables explicatives, le modèle s'exprime par l'équation suivante :

$$y = \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \epsilon$$

2. où y est la variable dépendante, β_i le coefficient associé à la variable explicative x pour l'individu i et ϵ le terme d'erreur qui représente la part de variabilité de y non expliqué par les variables explicatives (Gelman and Hill, 2006). Régression logistique

Ce modèle utilise une fonction de lien *logit*. La régression logistique est utilisée pour modéliser une variable d'intérêt Y binaire. Par exemple, si on s'intéresse à la mise à la reproduction d'une vache, on a $Y = 1$ si la vache est inséminée et $Y = 0$ sinon. Pour une vache i , la variable Y_i suit une distribution de Bernoulli de paramètre p_i où p_i est la probabilité d'être inséminée au moins une fois, avec $p_i \in [0,1]$.

$$Y_i \sim \text{Bernoulli}(p_i)$$

La régression logistique consiste à modéliser le logit de p en fonction de covariables d'intérêt. La transformation logit se définit comme suit :

$$\text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$$

Cette fonction permet de transformer cette probabilité p en une variable pouvant prendre toutes les valeurs réelles, facilitant ainsi la modélisation linéaire. L'équation du modèle est la suivante :

$$\text{logit}(p_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_n x_{in}$$

où β_0 est l'intercept du modèle, x_{i1} à x_{in} sont les valeurs des covariables 1 à n pour la vache i et β_1 à β_n sont les coefficients associés. Ces coefficients β_j sont estimés à partir des données et représentent l'effet des covariables sur le logit de la probabilité p .

On peut montrer que pour une variable donnée, l'exponentielle du coefficient β représente l'odds-ratio, c'est-à-dire le rapport des cotes (ou "odds") de l'évènement d'intérêt par rapport à l'absence de cet évènement, lorsque la covariable change d'une unité. Plus précisément, pour une covariable A binaire (0 ou 1), par exemple la présence d'une mammite (où $A = 1$ signifie que la vache a une mammite et $A = 0$ qu'elle est saine), l'odds-ratio est donné par :

$$OR = \frac{P(Y = 1|A = 1)P(Y = 0|A = 1)}{P(Y = 1|A = 0)P(Y = 0|A = 0)} = e^{\beta_A}$$

Ici, β_A est le coefficient de la covariable A dans le modèle. Si $OR > 1$, cela indique que la probabilité de l'évènement (ici, la mise à la reproduction) est plus élevée lorsque $A = 1$ (présence de mammite) que lorsque $A = 0$. Si $OR < 1$, l'évènement est moins probable avec $A = 1$. (Gelman and Hill, 2006).

La régression logistique est largement utilisée dans les domaines de la médecine, l'épidémiologie et la sociologie car elle se prête particulièrement à la prédiction d'une donnée binaire (comme la survenue d'une maladie, la réussite à un test...). Pour évaluer la qualité du modèle, on utilise généralement des mesures comme le score de vraisemblance, l'**AIC** (Akaike Information Criterion), et des courbes **ROC** (Receiver Operating Characteristic) pour examiner la capacité du modèle à discriminer entre les deux classes.

3. Régression de Poisson

Pour une variable d'entrée de type comptage, une régression de Poisson convient parfaitement. Cette méthode est souvent utilisée pour modéliser le nombre d'évènements survenant dans un intervalle de temps donné. Pour une vache i nous avons le modèle suivant :

$$Y_i \sim \text{Poisson}(\lambda_i)$$

Où Y_i représente le nombre d'évènements observés, tels que le nombre d'inséminations d'une vache laitière sur une lactation par exemple.

Dans ce modèle, Y une variable d'entrée qui suit une loi de poisson $P(\lambda)$ c'est-à-dire que son espérance et sa variance sont égales, $E(Y) = V(Y) = \lambda$. Le but de la régression de Poisson est de réussir à modéliser la loi suivante qui modélise la relation entre les variables explicatives et le paramètre λ qui est la moyenne des évènements comptés :

$$\ln(\lambda_i) = \alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n$$

Avec $(X = x)$ les différentes variables explicatives utilisées dans le modèle et $\alpha, \beta_1, \dots, \beta_n$ les coefficients à estimer. L'équation montre que cette relation est log-linéaire.

L'estimand peut donc être formulé comme le rapport des taux d'incidence IRR qui mesure l'effet des variables explicatives sur le taux d'occurrence de l'évènement.

$$IRR = \frac{\lambda_1}{\lambda_0}$$

Où λ_0 et λ_1 sont les taux d'incidence pour deux niveaux de la variable explicative. Un IRR supérieur à 1 indique une augmentation du taux d'évènement pour λ_1 (Gelman and Hill, 2006).

4. Régression de Cox

La régression de Cox est une méthode statistique utilisée en analyse de survie. Ce modèle est particulièrement intéressant pour étudier le temps jusqu'à la survenue d'un évènement d'intérêt, comme la mort. Elle concerne l'étude du temps écoulé jusqu'à l'évènement considéré et pour certaines observations, l'évènement n'a pas encore eu lieu au moment où l'étude se termine, ce temps est souvent censuré. Les variables principales sont le temps de survie, ainsi que l'évènement d'intérêt, qui peut être par exemple la mort d'un individu. Cette régression repose sur la fonction de risque instantané $h(t)$ qui représente le risque que l'évènement se produise au temps t . C'est un modèle semi-paramétrique car il n'exige pas d'hypothèse sur la courbe de risque de base $h_0(t)$. Le modèle s'exprime sous la forme :

$$h(t|X) = h_0(t) \times \exp(\beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)$$

Où :

- $h(t|X)$ est la fonction de risque pour un individu,
- $h_0(t)$ est la fonction de risque de base qui est une fonction du temps mais indépendante des covariables explicatives
- $\exp(\beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)$ est le facteur d'ajustement qui dépend des covariables $X_1 \dots X_n$ ainsi que les coefficient $\beta_1 \dots \beta_n$ qui mesurent l'effet de ces covariables sur le risque.

Le modèle de Cox repose sur l'hypothèse que le rapport des risques (*hazard ratio*) entre deux individus est constant dans le temps, c'est-à-dire que le risque pour un individu par rapport à un autre reste proportionnel au cours du temps.

L'interprétation du modèle se fait en terme *hazard ratio*, par exemple pour une variable explicative X_i , l'exponentiel du coefficient β_i donne le *hazard ratio* associé à l'augmentation d'une unité de cette variable. Un *hazard ratio* supérieur à 1 indique un risque accru, tandis qu'un *hazard ratio* inférieur à 1 indique un risque réduit Abd ElHafeez et al. (2021).

D. Effets marginaux

Un effet marginal est une mesure pour évaluer l'impact d'une variation d'une variable explicative sur la variable dépendante, en maintenant toutes les autres variables constantes. Dans un modèle linéaire il correspond simplement au coefficient associé à ces variables. Pour des modèles non linéaires, l'effet d'une variable indépendante sur la variable dépendante n'est pas constant mais varie en fonction des valeurs des autres variables.

Ils sont particulièrement utiles pour réaliser des prédictions en traduisant les coefficients en termes d'impact direct sur la variable d'entrée. Par exemple pour une régression logistique sur l'impact des mammites sur la mise à la reproduction, il est plus intuitif de traduire cette impact sous forme de probabilité plutôt que de travailler avec des coefficients log-odds.

Ce qui est également intéressant avec les effets marginaux, c'est qu'ils permettent également d'analyser des scénarios fictifs en modifiant certaines variables et en observant l'impact sur la variable dépendante. Par exemple en étudiant le scénario contrefactuel à celui analysé avec les données récoltées.

III. Etude personnelle

Cette étude s'intègre dans le projet *Alonge*, piloté par l'**Idèle**. Le travail s'est déroulé dans l'unité mixte de recherche BIOEPAR, sous les tutelles d'**Oniris VetAgroBio Nantes** et d'**INRAE**.

Les objectifs de l'étude sont :

- Évaluer l'impact des mammites sur la longévité des vaches en élevage laitier, notamment en décrivant et en modélisant les dynamiques de réforme en fonction du statut vis-à-vis des mammites.
- Évaluer l'impact des réformes de vaches sur la dynamique des infections intramammaires de début de lactation autour du tarissement.

A. Matériels et méthodes

1. Description des données

Quatre sources de données complémentaires recueillies auprès du système national d'information génétique ont été mobilisées pour cette étude :

- Contrôle laitier : consiste en la mesure de la quantité de lait produite pendant 24h et le recueil d'un échantillon de lait pour analyse. Les données sont récoltées au niveau de la vache, sur toutes les vaches en lactation d'un troupeau, à une fréquence le plus souvent mensuelle. On dispose pour chaque contrôle des identifiants de l'élevage et de la vache, de la date du contrôle, de la date du vêlage précédent de vache, de la quantité de lait, des taux butyreux et protéique et de la concentration en cellules somatiques (CCS).
- Insémination artificielle : on dispose dans les élevages pratiquant l'insémination artificielle de l'identifiant de la vache inséminée, de l'identifiant du taureau utilisé pour l'insémination et de la date de l'insémination.
- Mammites cliniques : dans les élevages dans lesquels on a un enregistrement informatique des mammites cliniques, on a l'identifiant de la vache atteinte et la date d'enregistrement par l'éleveur.
- Données démographiques et de mouvements entre élevages : à partir de la base de données nationale d'identification, il a été possible d'obtenir pour tous les bovins de l'étude leur date de naissance et de mort, les identifiants de leurs parents, les dates de mouvements entre exploitations avec les causes de ces mouvements (naissance, mort, élevage, prêt...).

L'étude comprend un échantillon national de 308 élevages pour lesquels ces 4 sources de données étaient disponibles : élevages au contrôle laitier, pratiquant l'insémination artificielle dans lesquels les mammites cliniques étaient enregistrées informatiquement. Le nombre total de vaches était de 252 977. L'étude prend en compte des données de contrôle laitier collectées entre janvier 1989 et mars 2024, pour un total de 3 818 887 contrôles élémentaires. Les différentes données fournies sont disponibles en annexe 1.

L'objectif de l'étude était d'évaluer l'impact de la survenue d'une infection intramammaire en début de lactation sur la probabilité de réforme et la dynamique des infections intramammaires entre la fin de la lactation et le début de la lactation suivante. Les 90 premiers jours après vêlage ont été utilisés pour caractériser le début d'une lactation. Afin d'avoir suffisamment de données pour qualifier les débuts de lactations à partir des données de contrôle laitier, une première étape de sélection a consisté à extraire les élevages-années pour lesquels on avait au moins 11 contrôles dans l'année.

Dans les données de contrôle laitier fournies, on a un total de 144 311 vaches en lactation et 10 066 dates de contrôles allant d'octobre 1989 à mars 2024. En filtrant pour n'obtenir que les animaux dont les dates de contrôles sont comprises entre la date d'entrée dans le cheptel et la date de sortie si elle est indiquée, on obtient un total de 143 311 animaux pour 4769 troupeaux. La sélection suivante a été ensuite réalisée :

- Il fallait s'assurer que tous les cheptels sélectionnés comportaient suffisamment de données. Les dates de contrôles avec minimum 10 vaches étaient conservées.
- Il fallait un minimum de 11 contrôles et un maximum de 12 contrôles pour chaque combinaison de troupeau/année, afin de s'assurer de la comparabilité des troupeaux et d'écarter les effectifs jugés insuffisants. Il ne reste alors plus que 282 troupeaux, pour 84 006 vaches allant de la parité 1 à la parité 14, et 6 202 dates de contrôle allant de janvier 2000 à décembre 2023.

Un nouveau tableau a permis ensuite de combiner les données obtenues en les regroupant par lactation. Un premier tri retire tous les animaux dont les données de PL et de CCS ne sont pas exhaustives, c'est-à-dire pour lesquelles il manque des dates de contrôles. Cette première transformation donne un total de 217 577 lactations qui regroupent 83 991 animaux. Ensuite une dernière étape permet de ne sélectionner que les élevages avec une proportion suffisante de vêlages, c'est-à-dire au moins 70% de vêlages parmi les vaches inséminées dont au moins 15 à 50% de primipares. Il reste au total 127 541 lactations dont 58 579 animaux appartenant à 231 élevages.

2. Description de la stratégie d'analyse

La Figure 6 décrit les éléments majeurs pris en compte dans la stratégie d'analyse. L'évènement d'intérêt était la réforme (incluant la mort de la vache), ou son absence matérialisée par un revêlage. On a considéré que le revêlage était la résultante d'un ensemble de décisions prises par l'éleveur et de la fertilité de la vache. La première décision est la mise à la reproduction de la vache, qui se traduit par la survenue d'une première insémination artificielle dans la lactation. En cas d'échec aux inséminations successives, l'éleveur peut choisir de faire ou non une insémination supplémentaire, selon les informations à sa disposition. Nous avons considéré que les informations pouvant influencer ses décisions étaient celles disponibles à l'issue des 90 premiers jours de lactation. Le choix de conserver une vache dans le troupeau pour une nouvelle lactation ou de la réformer peut se traduire par diverses conséquences, notamment en termes de dynamique des infections intramammaires et de production laitière. Pour les vaches qui revèlent, les CCS collectées lors du dernier contrôle laitier d'une lactation et du premier contrôle de la lactation suivante permettent d'évaluer la dynamique des infections pendant la période tarie et le péripartum. L'impact des réformes sur la production laitière de début de lactation peut être évalué en analysant les données de production laitière du premier contrôle de la lactation suivante.

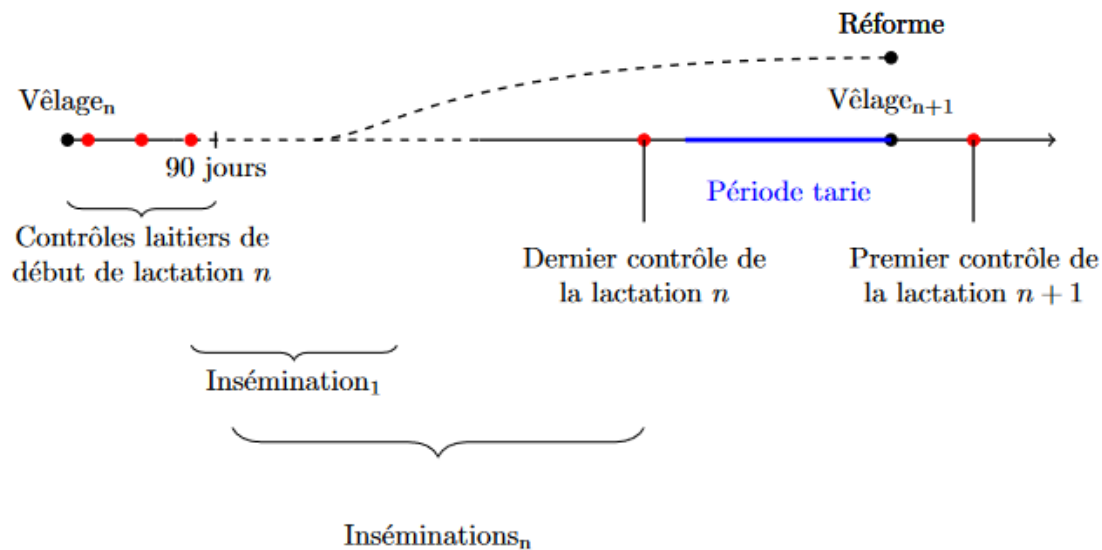


Figure 6 : vue d'ensemble de la stratégie d'étude.

La stratégie d'analyse suivante a été mise en œuvre.

Les données récoltées au cours des 90 premiers jours de lactation permettent de caractériser chaque lactation en termes de statut vis-à-vis des mammites, production laitière, âge de la vache... Cela nous permet tout d'abord de modéliser l'impact des mammites du début de lactation sur la décision de mise à la reproduction, ainsi que sur la fertilité des animaux. Grâce à ces données il a également été possible de modéliser les dynamiques de CCS au cours de la période de tarissement afin de voir si la survenue d'une mammite en début de lactation peut avoir un impact sur la lactation suivante. Ces données nous ont ensuite permis de modéliser des données contrefactuelles en transformant une variable ou en transformant l'issue elle-même.

La première question qui se pose est combien de voies différentes peuvent être impactées par la survenue d'une mammite et entraîner une réforme précoce ? La schématisation de cela par le biais d'un DAG aide à y voir plus clair et à comprendre ces différentes voies (Figure 7). En effet, lors de la survenue d'une mammite, celle-ci peut entraîner un épisode clinique que l'organisme ne saura pas combattre et ainsi entraîner la mort. Bien évidemment les cas de mammites cliniques entraînant des conséquences sur l'état général de l'animal sont rares mais il est important de les prendre en considération. Cette mammite peut également entraîner une baisse de production laitière. Qu'elle soit définitive par la perte d'un ou plusieurs quartiers, ou temporaire à cause de la forte inflammation ou même indirecte lorsque l'éleveur écarte le lait du tank pour respecter les temps d'attente d'un éventuel traitement. Si cette baisse de production laitière entraîne un manque de rentabilité de la vache, l'éleveur peut estimer que le remplacement de cette vache est nécessaire. Finalement, la persistance d'une CCS élevée chez une vache peut entraîner la décision ou non de mise à la reproduction par l'éleveur qui ne veut pas garder cet animal à cause des pénalités financières appliquées sur un lait de tank haut en cellules. S'il décide tout de même de mettre cette vache à la reproduction il va l'inséminer une ou plusieurs fois. Si la vache n'est pas gestante suite à une insémination, l'éleveur a le choix d'effectuer ou non une insémination supplémentaire, en utilisant les informations dont il dispose sur la vache. L'absence d'insémination conduira in fine à la réforme.

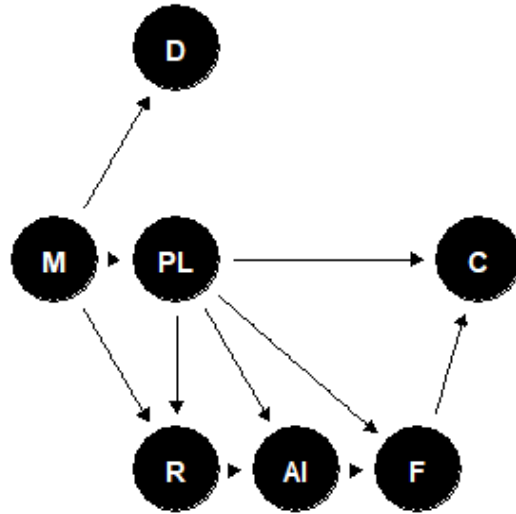


Figure 7 : Graphe orienté acyclique représentant les causes de réforme en lien avec les mammites. Les différents nœuds représentent les mammites (M), la PL (PL), la mort (M), la mise à la reproduction (R), la réussite à la première insémination (AI), la fertilité (F) et la réforme (C).

Ce DAG nous permet ainsi de différencier les voies conduisant à la réforme, qui vont chacune faire l'objet de modélisations distinctes. Il nous permet également d'identifier les variables à inclure dans les différents modèles. Ce DAG n'est toutefois pas tout à fait complet. Il ne prend pas en compte les autres facteurs, observables ou non, qui peuvent influencer ces relations. Or il est important de les mentionner et de les prendre en considération car ils peuvent influencer le résultat de l'étude.

La démarche de cette première partie de l'étude a été de décomposer ce graphe par voies et d'identifier tous les facteurs pouvant expliquer la réforme d'une vache. Nous avons par la suite construit des modèles pour chacune de ces voies afin d'observer l'influence de ces facteurs sur la réforme des animaux.

Toutes les modélisations ont été réalisées sur R version 4.3.0.

3. Choix des données et création du tableau de données utilisé pour l'étude statistique

Les données nous ont été fournies sous forme de plusieurs tableaux par l'IDELE. La première étape a donc été d'ordonner les données d'intérêt. Comme l'unité statistique de l'étude est la lactation un nouveau tableau a été créé pour l'étude. Ce tableau est créé à partir de données du contrôle laitier. Chaque lactation est traitée individuellement.

A chaque lactation sont associées les données récoltées utiles suivantes :

- Le numéro du troupeau détenteur
- Le numéro d'identification de l'animal
- La parité
- La date de vêlage sous le format suivant (année-mois-jour)

- La date de sortie du troupeau
- La cause de sortie
- Le nombre de contrôles durant cette lactation
- Le nombre de contrôles avant 90 jours
- Le nombre de contrôles > 200 000 cellules/mL avant 90 jours
- La PL maximale durant les 90 premiers jours
- Le stade de lactation au premier contrôle
- Le stade de lactation au dernier contrôle
- La date de vêlage de la lactation précédente si c'est une multipare
- La valeur du dernier contrôle avant tarissement lors de la lactation précédente
- Le code de race
- La date d'une mammite clinique s'il y en a eu au cours de la lactation
- Le nombre d'inséminations
- La date de la première insémination ainsi que le stade de lactation
- La date de la dernière insémination ainsi que le stade de lactation

A partir de ces données il a été possible de construire d'autres variables informatives utilisées pour les modélisations.

a) *Le statut mammite*

Il a été décidé de décomposer les mammites par modèle épidémiologique selon les contrôles effectués dans les 90 premiers jours de lactation. En lactation, un statut sain et 2 statuts mammites ont été définis. Un statut *mammite à réservoir environnemental*, nommé "*env*", a été défini par un unique pic de cellules supérieur à 200 000 cellules/mL et/ou un épisode de mammite clinique dans les 90 jours suivant le vêlage. Un statut *mammite à réservoir mammaire*, nommée "*cont*", a été défini par au moins deux contrôles supérieurs à 200 000 cellules/mL dans les 90 jours suivant le vêlage, quel que soit le nombre de mammites cliniques. Les vaches sans CCS supérieures à 200 000 cellules/mL et sans mammites cliniques dans les 90 premiers jours de lactation ont été considérées saines et nommées "*healthy*". Pour les multipares, le statut avant tarissement a également été pris en compte. Le statut avant tarissement a été considéré comme défavorable ("*dp_high*"), si la vache avait une CCS supérieure à 200 000 cellules/mL lors du dernier contrôle de sa lactation précédente, et favorable dans le cas contraire ("*dp_low*"). Les vaches qui n'avaient pas au moins deux contrôles dans les 90 premiers jours de lactation et les multipares dont on ne connaissait pas le statut avant tarissement, ont été retirées de l'étude.

Tableau 1 : Description des différentes catégories de mammites utilisées pour l'étude

Parité	Lactation n-1	Lactation n		Catégorie
	CCS dernier contrôle	Vêlage - 90 jours de lactation		
		CCS > 200 cellules/L	Mammites cliniques	
1	-	0	0	primi_healthy
		< 2	≥ 1	primi_env
		≥ 2	≥ 0	primi_cont
> 1	< 200	0	0	dp_low_healthy
		< 2	≥ 1	dp_low_env
		≥ 2	≥ 0	dp_low_cont
	≥ 200	0	0	dp_high_healthy
		< 2	≥ 1	dp_high_env
		≥ 2	≥ 0	dp_high_cont

b) La parité

Pour simplifier l'étude des données il a été décidé de catégoriser les vaches selon quatre parités en attribuant la parité 4 à tous les animaux de parité 4 et plus. Pour l'étude statistique la variable a été convertie en facteur à quatre niveaux différents dont la référence est la parité 3. Cette parité a été choisie car elle est souvent décrite comme la parité où la vache devient rentable pour l'éleveur.

c) La race

L'étude comporte des vaches de nombreuses races dont des Prim'holsteins (PH) en majorité, des vaches de race Montbéliarde, de race Normande, des Croisées ainsi que des Simmentales et des Jersiaises en minorité. Pour diminuer le nombre de catégories et simplifier le nombre de niveaux de facteurs pour les modélisations statistiques, cinq catégories ont été créées pour les attribuer aux vaches : les catégories PH, Normande, Montbéliarde, Croisées et Autres ont été créées. La dernière catégorie regroupe à la fois les Jersiaises et les simmentales.

d) La production laitière

La valeur du maximum de production enregistrée au cours d'un contrôle les 90 premiers jours de lactation a été prise pour chaque lactation. Cette valeur a ensuite été centrée puis réduite afin d'en faire une variable comparable pour chaque lactation.

2. Facteurs associés à la décision de mise à la reproduction

Dans cette partie on a considéré la survenue d'une première insémination en lactation matérialisait la décision de mise à la reproduction par un éleveur. La démarche a été de partir du principe que la mise à la reproduction est une décision propre de l'éleveur. Il prend cette décision sur la base des informations disponibles au début de la lactation actuelle pour permettre à la lactation suivante d'exister. Il a donc fallu modéliser cette décision en fonction de la présence ou non d'une mammité. D'autres facteurs influencent cette décision.

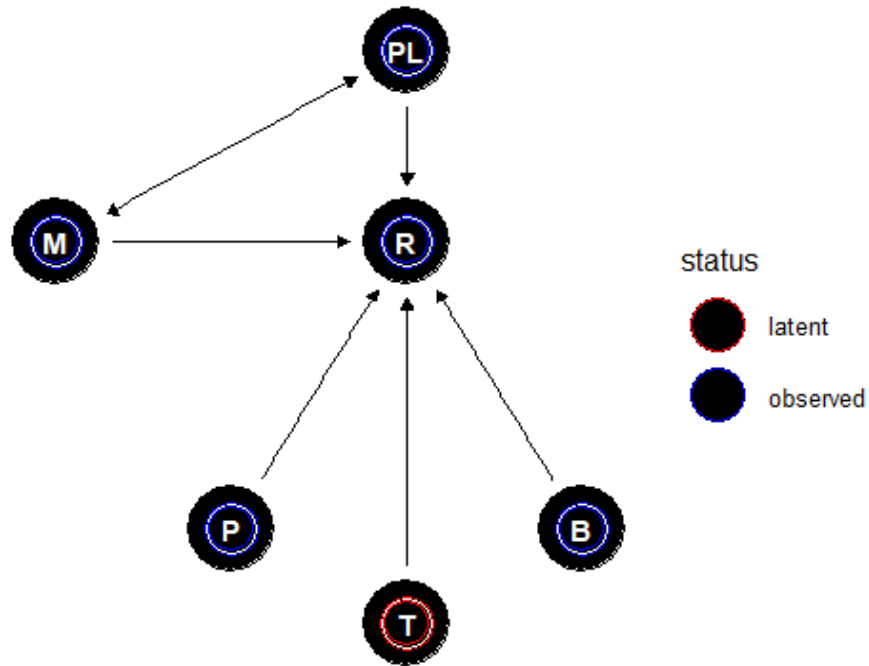


Figure 8 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur les performances de reproduction. Les nœuds représentent les mammites (M), la mise à la reproduction (R), la PL (PL), la parité (P), la race (B), et les facteurs communs à toutes les vaches d'un troupeau (T).

La Figure 8 montre le DAG qui schématise cette décision et les variables qui interviennent potentiellement dans cette décision. La décision de mise à la reproduction est prise en fonction de plusieurs facteurs. Notre objectif était d'évaluer dans quelle mesure le statut mammite en début de lactation avait un impact sur cette décision. Mais cette décision dépend également d'autres facteurs comme : la parité, la production laitière, la race, ainsi que de facteurs propres à chaque élevage et éleveur non observés.

La variable d'intérêt pour répondre à cette question était la variable « Survenue d'une première insémination artificielle en lactation ». Cette variable a 2 modalités possibles : oui ou non. Le modèle statistique qui convient est un modèle de **régression logistique binomiale** car la variable dépendante est de type binaire. Un effet aléatoire troupeau a été inclus pour prendre en compte les facteurs communs (non mesurés) à toutes les vaches d'un troupeau . L'estimand empirique utilisé est l'OR pour chaque catégorie de variables afin d'estimer le poids de l'impact de chacune.

Les paramètres des modèles ont été estimés avec la fonction *glmer* du package lme4 de R.

3. Facteurs associés à la fertilité

Une fois que l'éleveur a décidé de mettre son animal à la reproduction, l'objectif est d'obtenir une insémination fécondante le plus rapidement possible. Cela dépend principalement de la fertilité de la vache. De nombreux facteurs sont connus comme ayant un impact direct sur la fertilité d'une vache laitière, comme la parité, la race ou le niveau de production comme le montre la Figure 9. On pourrait évaluer la fertilité en évaluant le taux de succès pour chacune des inséminations artificielles réalisées. Cependant des facteurs intervenant dans le choix de refaire une nouvelle insémination suite à l'échec de la précédente biaiserait l'estimation. En effet, en faisant cela on mêle facteurs expliquant la fertilité et facteurs expliquant la décision de l'éleveur de réinséminer. En pratique, on modélise donc le succès à la première insémination de la lactation.

Dans cette partie, on s'est donc intéressé à la première insémination d'une lactation. Lorsque cette insémination était la dernière de la lactation et qu'elle était suivie d'un vêlage, on a considéré qu'il s'agissait d'un succès à l'insémination. Dans le cas contraire, on a considéré qu'il y avait échec.

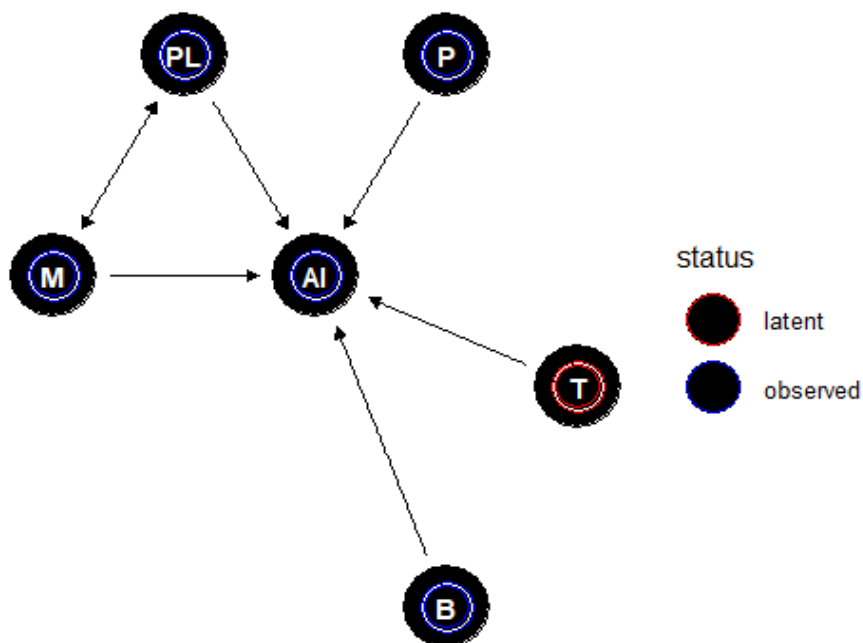


Figure 9 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur la réussite à la première IA. Les nœuds représentent les mammites (M), la première insémination (IA), la PL (PL), la parité (P), la race (B), et les facteurs communs à toutes les vaches d'un troupeau (T).

Là encore, on a estimé des OR grâce à une **régression logistique binomiale** avec effet aléatoire élevage. Une nouvelle variable « Succès à la première insémination » prenait la valeur 1 si la vache n'a été inséminée qu'une seule fois et qu'une date de vêlage suivante était donnée. Les variables statut mammite, production laitière maximale et dans les 90 jours suivant le vêlage, parité et race ont été incluses dans le modèle.

Là encore, on a estimé des OR grâce à une **régression logistique binomiale** avec effet aléatoire élevage. Une nouvelle variable « Succès à la première insémination » prenait la valeur 1 si la vache n'a été inséminée qu'une seule fois et qu'une date de vêlage suivante était donnée. Les variables statut

mammite, production laitière maximale et dans les 90 jours suivant le vêlage, parité et race ont été incluses dans le modèle.

3. Facteurs associés au nombre d'inséminations par lactation

Lorsqu'une vache ne devient pas gestante à l'issue d'une insémination, elle peut être réinséminée. Le nombre d'inséminations est fonction de la fertilité et des décisions de l'éleveur car c'est au final lui qui décide quelles vaches il insémine et combien d'inséminations il tente peut effectuer sur chaque vache. Il faut donc considérer que ces effets sont mixtes et que la survenue d'une mammite peut à la fois avoir un impact sur la décision de l'éleveur et à la fois sur la fertilité (évaluée plus haut) mais il est difficile à séparer ces effets.

Pour chaque vache avec au moins une insémination, on s'est intéressé au nombre total d'inséminations par lactation. Il s'agit d'une variable qui ne prend que des valeurs entières, supérieures à 0.

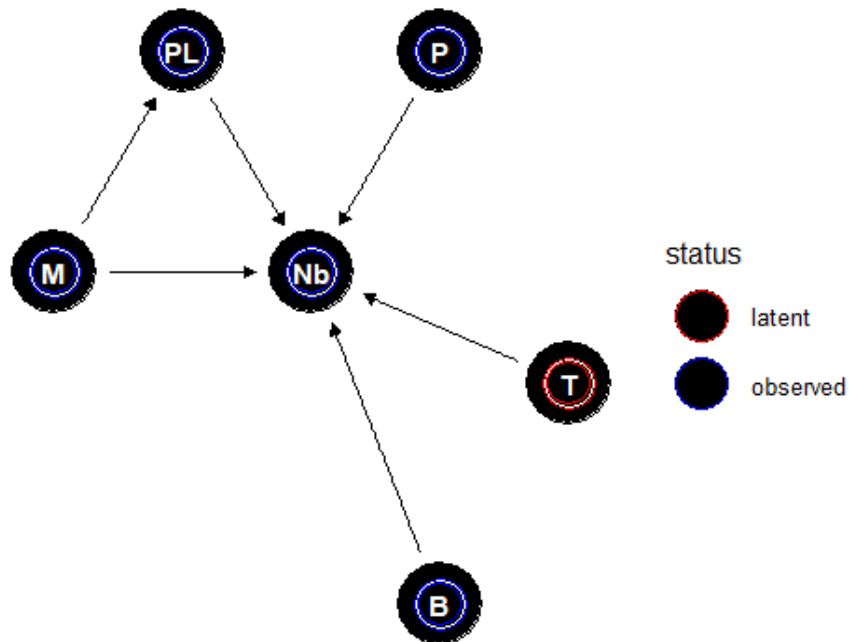


Figure 10 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur le nombre d'inséminations tentées. Les nœuds représentent les mammites (M), le nombre d'IA (Nb), la PL (PL), la parité (P), la race (B), et les facteurs communs à toutes les vaches d'un troupeau (T).

Contrairement aux questions précédentes, nous avons ici une variable de comptage et non une variable binaire. Il n'est plus possible d'utiliser la loi binomiale. Le modèle de Poisson est plus adapté, il permet d'obtenir l'IRR. La fonction *glmer* est encore une fois utilisée mais cette fois-ci il lui est précisé d'utiliser un modèle de Poisson.

4. Facteurs associés à la probabilité de revêlage

Pour une vache mise à la reproduction, la probabilité de revêlage est donc la résultante de sa fertilité et de la décision de l'éleveur de tenter une nouvelle insémination en cas d'échec de la précédente.

Dans cette partie, on s'intéresse à l'impact de divers facteurs sur la probabilité de revêler. Pour chaque vache inséminée au moins une fois, on a construit une variable binaire prenant la valeur 1 si une date de vêlage ultérieure était enregistrée, 0 sinon.

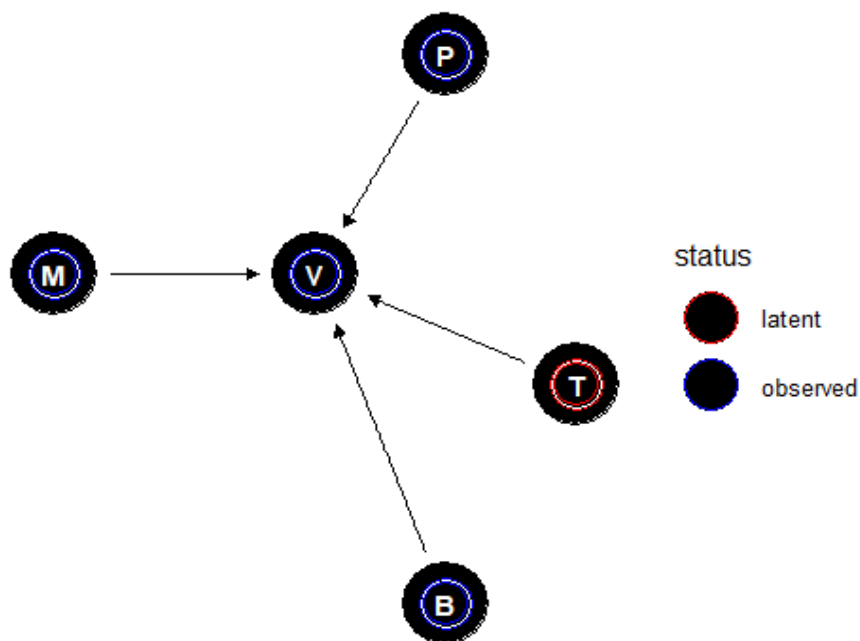


Figure 11 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur les chances de vêler à nouveau. Les nœuds représentent les mammites (**M**), le vêlage (**V**), la PL (**PL**), la parité (**P**), la race (**B**), et les facteurs communs à toutes les vaches d'un troupeau (**T**).

Comme c'est également une régression logistique avec la fonction *glmer* qui est utilisée ici.

5. Modélisation de l'impact des mammites sur le niveau de production laitière

Comme représenté sur la Figure 7, une autre voie qui pourrait conduire à une réforme suite à la survenue d'une mammite serait que la mammite en question entraîne une baisse de production laitière. Ce qui conduirait l'éleveur à décider de remplacer sa vache par une génisse. On a cherché à évaluer l'impact des mammites en début de lactation sur le niveau de production de la lactation suivante.

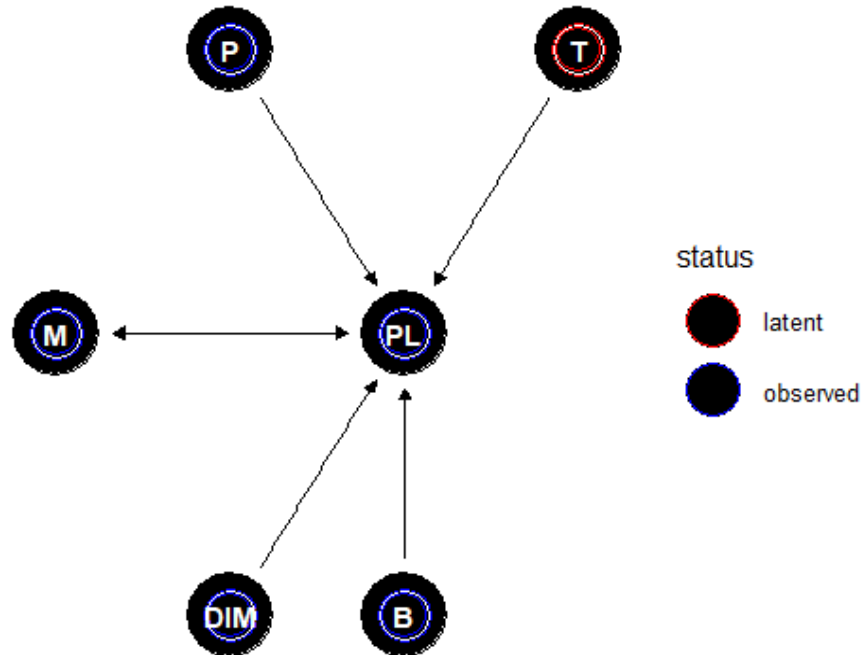


Figure 12 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur le niveau de production laitière. Les nœuds représentent les mammites (M), la PL (PL), la parité (P), la race (B), le jour en lait (DIM), et les facteurs communs à toutes les vaches d'un troupeau (T).

La première étape a été de se demander comment représenter la production laitière avec les données fournies. Pour chaque contrôle laitier, une production laitière sur 24h est mesurée. Il existe de nombreux modèles pour représenter une courbe de lactation. Les courbes de lactation ont été modélisées avec la fonction de Wilmink (présentée en annexe 1).

On voit que le pic de lactation intervient généralement avant 40 jours de lactation et que la première phase de la courbe peut être assimilée à une droite passant par une ordonnée à l'origine.

Pour simplifier l'étude, comme la phase d'intérêt est la première phase de lactation, il a été décidé d'assimiler les courbes de lactation à des droites. Il devient ainsi possible de comparer l'écart entre les droites de la lactation en cours et de la lactation précédente en fonction de la survenue ou non d'une mammite.

Le modèle le plus adapté est donc le modèle de régression linéaire mixte, réalisé grâce à la fonction *lmer* du package *lme4* de R. Ce modèle permet d'obtenir directement l'estimand qui est représenté par le coefficient associé à chaque variable.

6. Facteurs associés à la mort

Imaginons maintenant que la survenue d'un épisode de mammite ayant des conséquences cliniques puisse entraîner la mort de la vache. Cette hypothèse ne conduit pas littéralement à la réforme de l'animal, mais elle entraîne sa sortie involontaire du troupeau et une perte économique non négligeable pour l'éleveur.

Afin de modéliser au mieux cette relation, une analyse de survie grâce à une régression de Cox a été conduite. Il est intéressant de se demander quels autres facteurs interviennent dans cette relation. La Figure 13, représente l'intervention de ces différents facteurs.

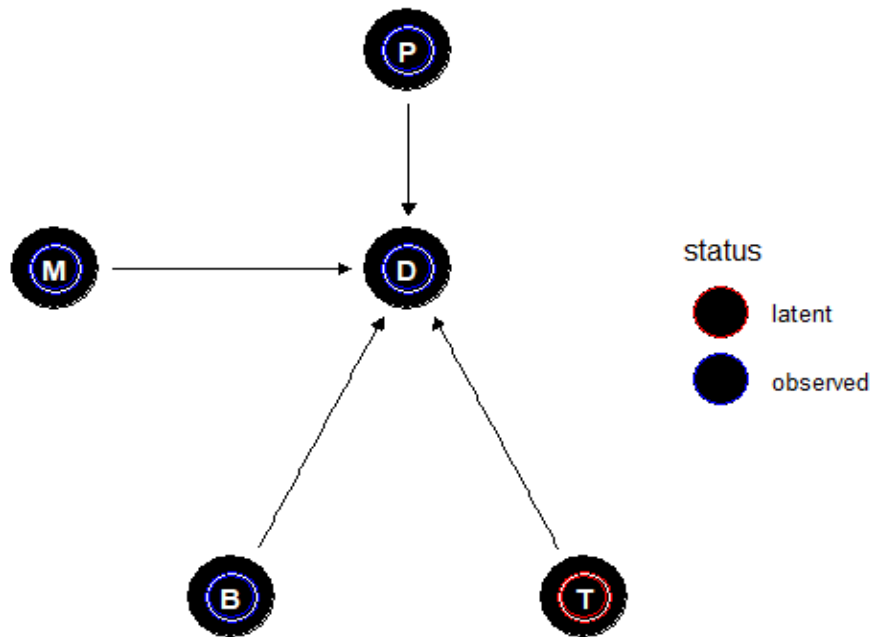


Figure 13 : Graphe orienté acyclique représentant l'impact des mammites sur la probabilité de mort instantanée. Les nœuds représentent les mammites (M), la mort (D), la parité (P), la race (B).

La régression de Cox réalisée avec la fonction *coxph* du package *survival* de R. Elle permet d'obtenir les HR associés à chaque variable, qui traduisent le risque de mort dans le temps. Un évènement "mort" est créé, qui prend la valeur 1 lors de la mort de la vache. Au-delà de 300 jours de lactation, les vaches sont censurées.

7. Etude de la dynamique des infections intramammaires entre la fin de lactation et le début de lactation suivante

Pour les vaches qui ont revêlé, les dynamiques de CCS au niveau troupeau ont été étudiées. Cette étude s'intéresse tout particulièrement au statut de chaque vache avant tarissement et après vêlage. Toute la période entre ces deux évènements est une zone d'ombre car aucune donnée du contrôle laitier ne permet avec certitude de connaître le statut des vaches à chaque instant.

Trois sous-questions ont été soulevées :

- Quelle est la probabilité d'avoir un comptage cellulaire $> 200\ 000$ *cellules/mL* au dernier contrôle avant tarissement ?
- Quelle est la probabilité d'une guérison pendant le tarissement ? c'est-à-dire passer d'une CCS supérieure au seuil de $200\ 000$ *cellules/mL* au dernier contrôle avant tarissement à une CCS inférieure à ce seuil au premier contrôle de la lactation suivante.

- Quelle est la probabilité d'une nouvelle infection pendant le tarissement ? c'est-à-dire passer d'une CCS inférieure au seuil de 200 000 cellules/mL au dernier contrôle avant tarissement à une CCS supérieure à ce seuil au premier contrôle de la lactation suivante.

Pour répondre à ces questions trois régressions logistiques ont été réalisées avec la fonction *glmer* avec les variables dépendantes suivantes :

a) Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement

La première chose que l'on a souhaité savoir c'est si, avec nos données, il était possible d'estimer la probabilité d'avoir un comptage cellulaire $> 200000 \text{ cell/mL}$ au dernier contrôle avant tarissement. Nous voulions également savoir si les différentes catégories de mammites ont un impact sur cette probabilité.

Pour les vaches ayant révélé une variable binaire qui prend la valeur 1 si le dernier comptage de la lactation est élevé et 0 sinon a été créée. Ensuite une modélisation à partir d'une régression logistique binomiale mixte a été faite.

b) Probabilité d'une guérison pendant le tarissement

On s'intéresse ici à la probabilité de guérison des infections intramammaires entre le dernier contrôle laitier d'une lactation et le premier contrôle laitier de la lactation suivante. Ont été prises en compte les vaches avec une CCS supérieure au seuil de 200 000 cellules/mL au dernier contrôle de leur lactation. Pour ces vaches, une **variable guérison** a été codée 0 si la CCS du premier contrôle de la lactation suivante était supérieure à 200 000 cellules/mL, 1 si cette CCS était inférieure au seuil. Les associations entre différentes variables d'intérêt et cette probabilité de guérison ont été estimées avec une régression logistique mixte incluant un effet aléatoire troupeau.

c) Probabilité d'une nouvelle infection acquise pendant le tarissement

On s'intéresse ici à la probabilité d'acquisition d'une nouvelle infection intramammaire entre le dernier contrôle laitier d'une lactation et le premier contrôle laitier de la lactation suivante. Ont été prises en compte les vaches avec une CCS inférieure au seuil de 200 000 cellules/mL au dernier contrôle de leur lactation. Pour ces vaches, une **variable nouvelle infection** a été codée 0 si la CCS du premier contrôle de la lactation suivante était inférieure à 200 000 cellules/mL, 1 si cette CCS était supérieure au seuil. Les associations entre différentes variables d'intérêt et cette probabilité de guérison ont été estimées avec une régression logistique mixte incluant un effet aléatoire troupeau.

8. Utilisation des effets marginaux pour réaliser les prédictions

Pour chaque modélisation statistique, on a réalisé des prédictions à partir des effets marginaux. Ces effets sont une mesure permettant d'évaluer l'impact d'une variation d'une variable explicative sur la variable dépendante. Pour réaliser ces prédictions il a fallu créer de nouveaux tableaux dont la seule variable qui changeait était celle dont on voulait connaître l'effet. Ces tableaux étaient ensuite utilisés avec le modèle entraîné avec les données d'origine afin de créer des prédictions marginales. Ces tableaux sont présentés en annexe.

9. Etude des contrefactuels

Afin de compléter cette étude, il a été décidé d'étudier trois scénarios contrefactuels afin de quantifier les changements dans les dynamiques de CCS et les niveaux de productions laitières moyennes de

troupeau en début de lactation résultants soit de l'amélioration de la situation vis-à-vis des mammites soit de décisions différentes dans les décisions de réforme. L'approche contrefactuelle consiste à réaliser des prédictions à partir de certains des modèles décrits plus haut, dont les paramètres ont été estimés à partir des données. Pour cela on va changer l'une des variables explicatives en lui donnant une valeur différente de celle qui a été observée pour pouvoir évaluer un éventuel changement sur la variable dépendante.

Le but final est de lancer une piste de réflexion sur les choix les plus pertinents dans la lutte contre les mammites contagieuses et les pertes qu'elles induisent.

Les scénarios ont été générés à partir des données fournies et utilisées pour entraîner les différents modèles statistiques. Seules certaines caractéristiques ou variables ont été modifiées afin de correspondre aux changements contrefactuels.

a) *Présentation des scénarios*

Afin d'évaluer l'impact d'une meilleure prévention des mammites ou celui de baser les décisions de réforme sur le statut mammites, trois scénarios ont été testés. Pour cela, le tableau de données initial a été modifié pour changer la valeur de certaines variables. Par exemple, pour évaluer l'effet de la prévention des mammites, on a changé le statut mammites de certaines vaches dans les données. Puis les résultats de différents modèles décrits plus haut ont été utilisés de façon séquentielle pour générer des prédictions à partir des jeux de données modifiés, en partant de la décision de réforme, jusqu'au statut cellule du début de lactation suivante.

Trois scénarios ont été testés :

- Le premier scénario appelé « **Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire** », modélise le cas où l'éleveur réussit à prévenir toutes les mammites contagieuses. Le statut des vaches avec des mammites à réservoir mammaire (modalités *cont*) a été modifié en saines (modalités *healthy*). Il ne reste plus que des vaches saines ou a mammite environnementale dans le troupeau.
- Le second scénario appelé « **Réforme uniquement des vaches en mammite à réservoir mammaire** », modélise le cas où l'éleveur ne réforme que les vaches à mammite contagieuse sans tenir cas du reste des réformes. C'est le changement le plus simple et qui s'éloigne le plus de la réalité. En effet, dans la réalité un éleveur est amené à réformer des animaux pour diverses raisons qui ne sont pas toujours prévisibles ou évitables. Il semblait cependant intéressant de tester ce scénario sur la base de données afin de pouvoir le comparer aux deux autres scénarios.
- Le troisième scénario appelé « **Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées** », modélise le cas où l'éleveur réforme toutes les vaches contagieuses en plus des vaches initialement envoyées à la réforme. C'est le scénario qui semblait le plus réalisable sur le terrain. Cependant il a été important de vérifier que cela n'entraîne pas une trop grosse diminution d'effectif au niveau des troupeaux, ce qui aurait rendrait ce type de décision inapplicable.

Pour ces trois scénarios des variables étaient recrées grâce aux prédictions générées par les modèles entraînés. Il était ainsi souhaité de pouvoir évaluer la différence d'impact en présentant cette différence comme une différence de probabilité de guérison et une différence de probabilité de nouvelle infection. Un impact sur le niveau de production moyen du troupeau a également été évalué.

B. Résultats

1. Résultats des modélisations

a) Modélisation des facteurs associés à la décision de mise à la reproduction

Tableau 2 : Facteurs associés à la survenue d'une première insémination artificielle. Parkat représente la parité, mast_cat1 représente le statut mammite et milk_early_max_scaled représente la PL centrée réduite donnée selon la parité.

Characteristic	OR ¹	95% CI ¹	p-value
parKat			
3	—	—	
1	6.46	5.89, 7.08	<0.001
2	1.69	1.59, 1.79	<0.001
4	0.53	0.50, 0.56	<0.001
race			
PH	—	—	
Autre	1.37	1.08, 1.74	0.009
Croisée	1.14	1.02, 1.28	0.018
Montbéliarde	1.61	1.43, 1.81	<0.001
Normande	1.38	1.26, 1.51	<0.001
milk_early_max_scaled_p1	3.85	3.63, 4.09	<0.001
milk_early_max_scaled_p2	1.93	1.84, 2.01	<0.001
milk_early_max_scaled_p3	1.72	1.64, 1.80	<0.001
milk_early_max_scaled_p4	1.67	1.61, 1.72	<0.001
mast_cat1			
primi_healthy	—	—	
dpHigh_cont	0.28	0.26, 0.30	<0.001
dpHigh_env	0.38	0.36, 0.41	<0.001
dpHigh_healthy	0.75	0.71, 0.79	<0.001
dpLow_cont	0.45	0.41, 0.49	<0.001
dpLow_env	0.58	0.54, 0.62	<0.001
primi_cont	0.52	0.46, 0.58	<0.001
primi_env	0.62	0.57, 0.68	<0.001

¹OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval

Pour la variable d'intérêt de cette étude, c'est-à-dire le statut mammité, le modèle représenté par le tableau 2 semble mettre en évidence que les vaches avec une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement ont une probabilité moins élevée d'être mises à la reproduction que les primipares saines (primi_healthy). C'est d'autant plus marqué pour les vaches dans les catégories mammites à réservoir mammaire et mammites à réservoir environnemental (dpHigh_cont & dpHigh_env) par rapport aux multipares saines (dpHigh_healthy). Même constatation pour les multipares avec une CCS inférieure à 200 000 cellules/mL au dernier contrôle avant tarissement (dpLow) mais qui ont des mammites à réservoir mammaire ou environnemental en début de lactation (dpLow_env & dpLow_cont) et pour les primipares non saines également (primi_cont & primi_env).

Pour les autres covariables, les OR sont visibles dans le tableau 2. Les prédictions réalisées à l'aide du modèle et du package *marginalEffects* sont visibles grâce aux Figures 14, 15, 16 et 17. On peut voir que par exemple une primipare saine possède environ 98% de chance d'être mise à la reproduction, alors qu'une multipare qui possède une CCS élevée avant tarissement et en début de lactation a environ 77% de chance d'être mise à la reproduction.

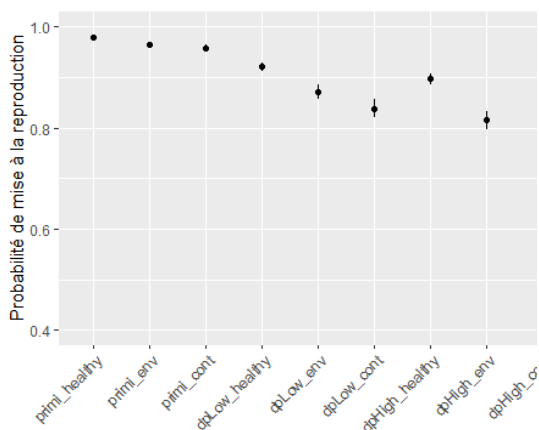


Figure 14 : Probabilité qu'une vache ait une première insémination artificielle en fonction du statut mammité déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 2 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

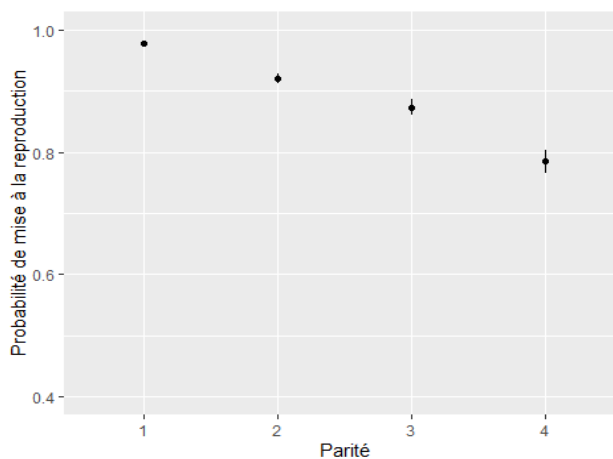


Figure 15 : Probabilité qu'une vache ait une première insémination artificielle en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 2 pour une vache de statut mammité primi_healthy pour les primipares ou dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

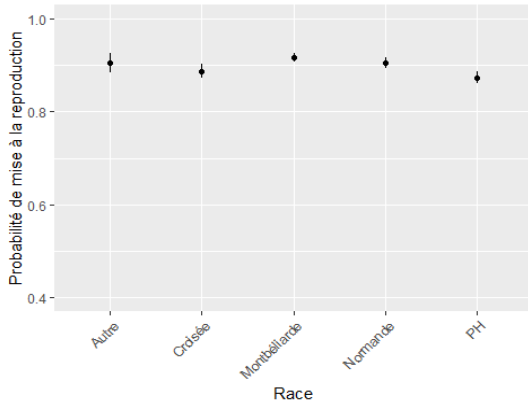


Figure 16 : Probabilité qu'une vache ait une première insémination artificielle en fonction de sa race Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 2 pour une vache de statut mammite `primi_healthy` pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.

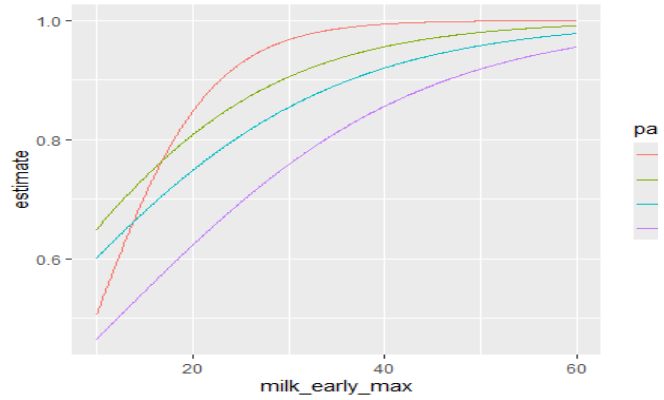


Figure 17 : Probabilité qu'une vache ait une première insémination artificielle en fonction de sa PL moyenne. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 2 pour une vache de statut mammite `primi_healthy` de parité 1 de race Prim'Holstein.

b) Facteurs associés à la réussite à la première insémination artificielle d'une lactation

Tableau 3 : Facteurs associés à la réussite d'une insémination artificielle. ParKat représente la parité, mast_cat1 représente le statut mammite et milk_early_max_scaled représente la PL donnée selon la parité.

Characteristic	OR ¹	95% CI ¹	p-value
parKat			
3	—	—	
1	1.17	1.11, 1.23	<0.001
2	1.06	1.01, 1.10	0.014
4	0.80	0.77, 0.84	<0.001
milk_early_max_scaled_p1	1.04	1.01, 1.08	0.017
milk_early_max_scaled_p2	0.93	0.90, 0.96	<0.001
milk_early_max_scaled_p3	0.90	0.87, 0.94	<0.001
milk_early_max_scaled_p4	0.99	0.96, 1.02	0.5
mast_cat1			
primi_healthy	—	—	
dpHigh_cont	0.80	0.74, 0.86	<0.001
dpHigh_env	0.88	0.82, 0.94	<0.001
dpHigh_healthy	0.96	0.92, 1.00	0.045
dpLow_cont	0.88	0.81, 0.95	<0.001
dpLow_env	0.92	0.86, 0.97	0.002
primi_cont	0.93	0.86, 1.00	0.045
primi_env	1.00	0.95, 1.06	>0.9
race			
PH	—	—	
Autre	0.87	0.70, 1.07	0.2
Croisée	1.33	1.22, 1.45	<0.001
Montbéliarde	1.48	1.35, 1.62	<0.001
Normande	1.37	1.27, 1.47	<0.001

¹OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval

En ce qui concerne la réussite à la première IA, le statut mammite semble avoir un effet significatif, surtout pour les multipares atteintes de mammites dites contagieuses. Aucun effet significatif n'est mis en évidence pour les vaches multipares saines ou les primipares à mammites environnementales. Pour les primipares contagieuses, il semblerait qu'elles aient une probabilité de réussite à la première IA légèrement réduite par rapport aux primipares saines.

Pour les autres covariables, les OR sont visibles dans le Tableau 3 et les prédictions réalisées à partir de ce modèle sont visibles sur les Figures 18, 19, 20 et 21. Il est possible de voir qu'étant donné que les marges d'erreur se recoupent il n'y a pas vraiment de différences statistique significatives à la réussite à la première insémination d'après notre modèle mais on peut tout de même observer que le fait d'avoir une mammite à réservoir mammaire semble diminuer la réussite à la première IA.

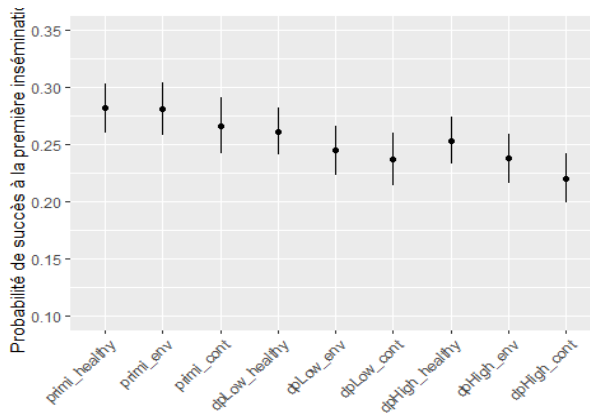


Figure 18: Probabilité qu'une vache ait un succès à la première insémination artificielle en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 3 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

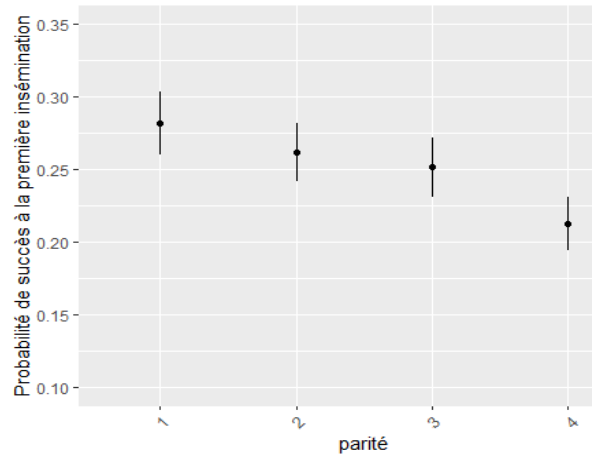


Figure 19: Probabilité qu'une vache ait un succès à la première insémination artificielle en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 3 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou dp_low_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

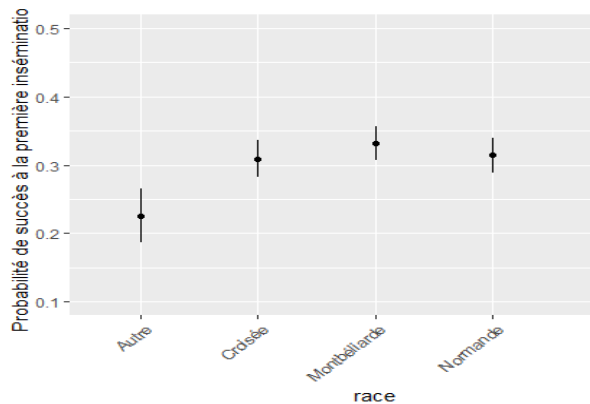


Figure 20 : Probabilité qu'une vache ait un succès à la première insémination artificielle en fonction de sa race. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 3 pour une vache de statut mammite primi healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.

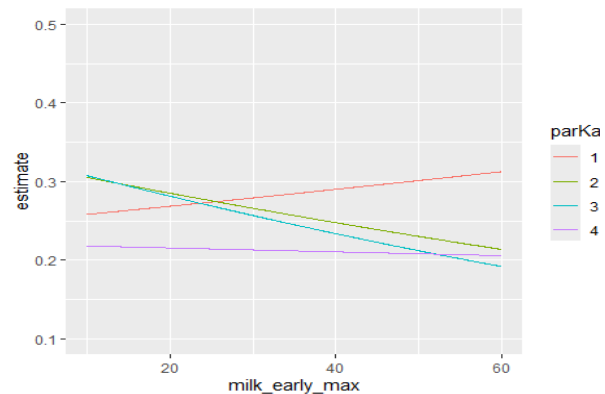


Figure 21: Probabilité qu'une vache ait un succès à la première insémination artificielle en fonction de sa PL moyenne. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 3 pour une vache PH de statut mammite primi healthy pour la parité 1 et de statut mammite dpLow_healthy pour les autres parités.

c) *Modélisation des facteurs associés au nombre d'inséminations tentées*

Tableau 4 : Facteurs associés au nombre d'inséminations. *parKat* représente la parité, *mast_cat1* représente le statut mammaire et *milk_early_max_scaled* représente la PL donnée selon la parité.

Characteristic	IRR ¹	95% CI ¹	p-value
<i>parKat</i>			
3	—	—	
1	1.09	1.07, 1.11	<0.001
2	1.03	1.02, 1.05	<0.001
4	1.00	0.99, 1.02	0.7
<i>milk_early_max_scaled_p1</i>	1.05	1.04, 1.06	<0.001
<i>milk_early_max_scaled_p2</i>	1.05	1.04, 1.06	<0.001
<i>milk_early_max_scaled_p3</i>	1.05	1.04, 1.07	<0.001
<i>milk_early_max_scaled_p4</i>	1.04	1.03, 1.05	<0.001
<i>mast_cat1</i>			
<i>primi_healthy</i>	—	—	
<i>dpHigh_cont</i>	0.94	0.92, 0.96	<0.001
<i>dpHigh_env</i>	0.97	0.95, 0.99	<0.001
<i>dpHigh_healthy</i>	1.01	1.00, 1.02	0.2
<i>dpLow_cont</i>	0.94	0.92, 0.96	<0.001
<i>dpLow_env</i>	0.97	0.95, 0.99	<0.001
<i>primi_cont</i>	0.98	0.96, 1.01	0.2
<i>primi_env</i>	0.99	0.97, 1.00	0.13
<i>race</i>			
PH	—	—	
Autre	1.10	1.04, 1.17	0.002
Croisée	0.92	0.90, 0.95	<0.001
Montbéliarde	0.91	0.88, 0.94	<0.001
Normande	0.90	0.88, 0.92	<0.001

¹IRR = Incidence Rate Ratio, CI = Confidence Interval

Ces résultats montrent un impact significatif de certains statuts mammaires sur le nombre d'inséminations réalisées, notamment le fait d'avoir une mammite à réservoir mammaire qui réduit l'incidence des inséminations tentées de 6%, et le fait d'avoir une mammite environnementale qui réduit l'incidence plus modestement de 3%. Ce résultat n'est cependant pas observé dans le cas des primipares, quel que soit le statut. Cela semble suggérer que dans le cas de mammites contagieuses, réputées difficiles à guérir, l'éleveur tend à moins tenter d'inséminations, sauf s'il s'agit d'une primipare.

D'après les prédictions réalisées grâce aux effets marginaux, aucune réelle différence n'a pu être démontrée sur le nombre moyen d'inséminations. Pour les autres covariables, les OR sont visibles dans le Tableau 4 et les prédictions réalisées à partir de ce modèle sont visibles sur les Figures 22, 23, 24 et 25.

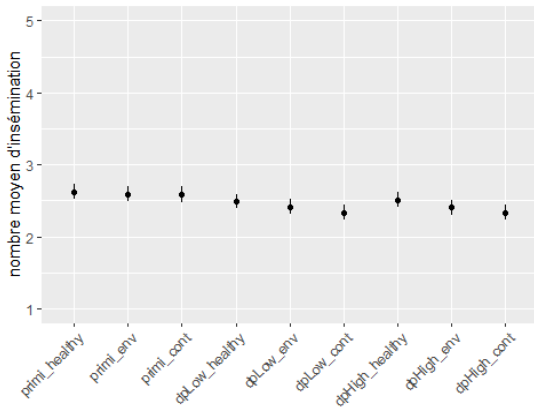


Figure 22 : Nombre moyen d'inséminations par vache en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 4 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

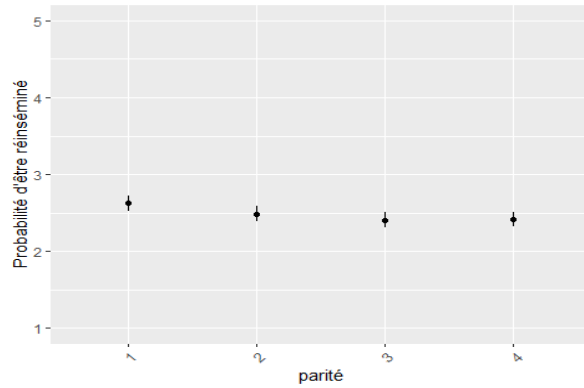


Figure 23: Nombre moyen d'inséminations en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 4 pour une vache de statut mammite primil_healthy pour les primipares ou dp_low_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

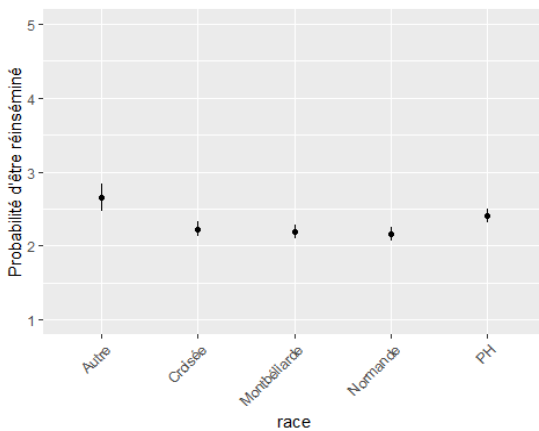


Figure 24: Nombre moyen d'inséminations en fonction de sa race. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 4 pour une vache de statut mammite primil_healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.

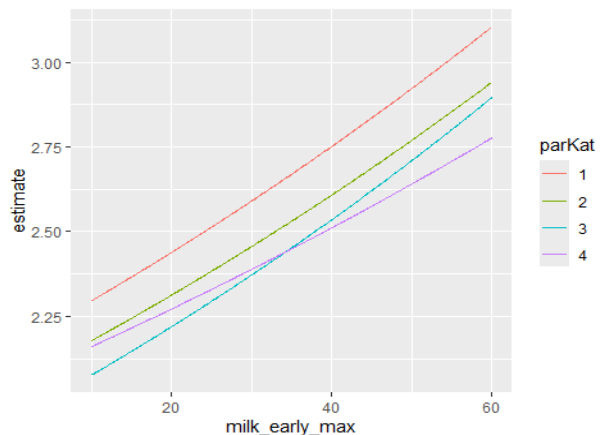


Figure 25 : Nombre moyen d'inséminations en fonction de sa PL moyenne. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 4 pour une vache de statut mammite primil_healthy de parité 1 de race Prim Holstein.

d) *Modélisation des facteurs associés à la probabilité de revêlage*

Tableau 5 : Facteurs associés à la probabilité de revêler Parkat représente la parité, mast_cat1 représente le statut mammite et milk_early_max_scaled représente la PL donnée selon la parité.

Characteristic	OR ¹	95% CI ¹	p-value
parKat			
3	—	—	
1	1.60	1.51, 1.69	<0.001
2	1.15	1.10, 1.20	<0.001
4	0.74	0.71, 0.78	<0.001
milk_early_max_scaled_p1	1.32	1.27, 1.37	<0.001
milk_early_max_scaled_p2	1.11	1.08, 1.15	<0.001
milk_early_max_scaled_p3	1.03	1.00, 1.07	0.075
milk_early_max_scaled_p4	1.13	1.09, 1.16	<0.001
mast_cat1			
primi_healthy	—	—	
dpHigh_cont	0.67	0.63, 0.72	<0.001
dpHigh_env	0.82	0.77, 0.88	<0.001
dpHigh_healthy	0.95	0.91, 0.99	0.008
dpLow_cont	0.72	0.67, 0.78	<0.001
dpLow_env	0.86	0.82, 0.91	<0.001
primi_cont	0.89	0.82, 0.96	0.004
primi_env	1.02	0.96, 1.09	0.4
race			
PH	—	—	
Autre	1.00	0.81, 1.23	>0.9
Croisée	1.21	1.11, 1.32	<0.001
Montbéliarde	1.42	1.28, 1.58	<0.001
Normande	1.32	1.23, 1.43	<0.001

¹OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval

La probabilité de revêlage est plus faible chez les vaches qui, avant le tarissement, présentaient un statut élevé ou qui ont été diagnostiquées avec une mammite d'origine mammaire ou environnementale au cours de la lactation. En revanche, aucun effet significatif n'a été observé pour les primipares saines ou celles atteintes de mammite d'origine environnementale.

Pour les autres covariables, les OR sont visibles dans le **Tableau 5** et les prédictions réalisées à partir de ce modèle sont visibles sur les Figures 26, 27, 28 et 29. La Figure 26 montre qu'on peut tout de même voir une diminution de près de 15% environ dans pour la probabilité de revêlage, entre une multipare en mammite à réservoir mammaire et une primipare saine.

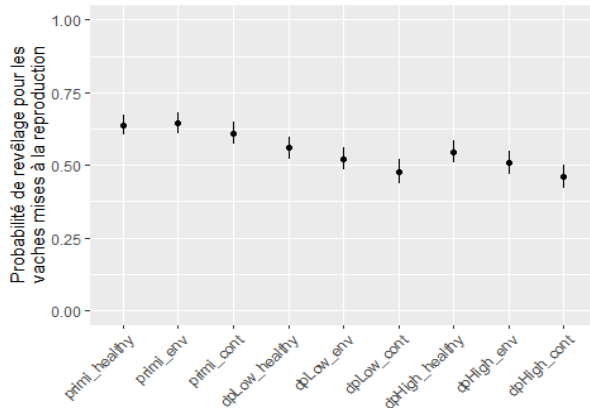


Figure 26 : Probabilité qu’une vache vêle à nouveau en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 5 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim’Holstein

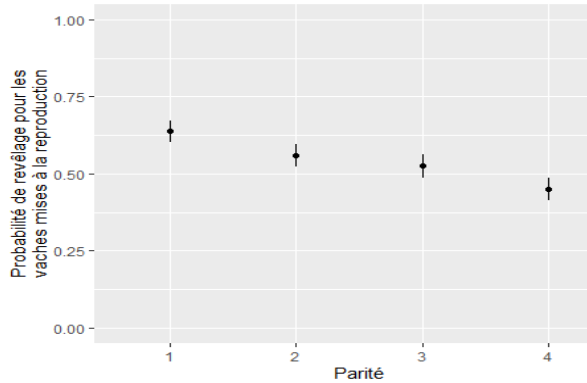


Figure 27: Probabilité qu’une vache vêle à nouveau en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 5 pour une vache de statut mammite primiparous ou dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim’Holstein.

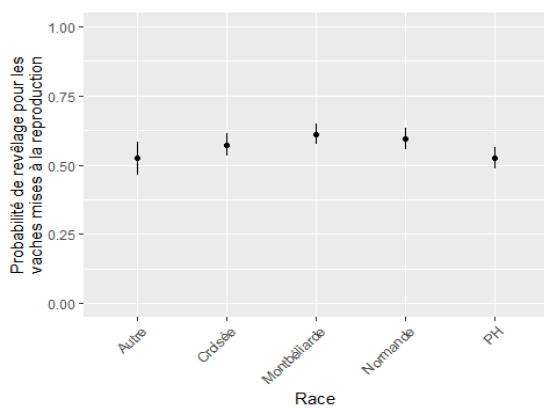


Figure 28: Probabilité qu’une vache vêle à nouveau en fonction de sa race. Les prédictions ont été générées à partir d’un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 5 pour une vache de statut mammite primiparous pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.

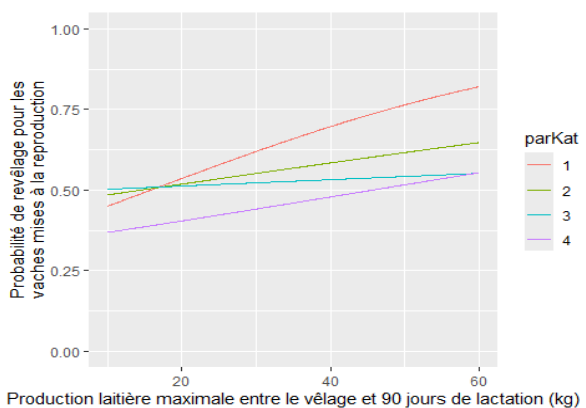


Figure 29 : Probabilité qu’une vache vêle à nouveau en fonction de sa PL moyenne. Les prédictions ont été générées à partir d’un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 5 pour une vache de statut mammite primiparous de parité 1 de race Prim Holstein.

e) *Modélisation des facteurs associés à la production laitière*

Tableau 6 : Facteurs associés à la PL Parkat représente la parité, mast_cat1 représente le statut mammite et milk_early_max_scaled représente la PL selon une parité donnée.

Characteristic	Beta	95% CI ¹	p-value
dim	0.09	0.08, 0.11	<0.001
mast_cat1			
dpHigh_cont	—	—	
dpHigh_env	-0.15	-0.62, 0.31	0.5
dpHigh_healthy	1.3	0.90, 1.7	<0.001
dpLow_cont	0.48	-0.04, 1.0	0.073
dpLow_env	0.15	-0.30, 0.60	0.5
dpLow_healthy	1.3	0.92, 1.7	<0.001
primi_cont	-8.2	-8.8, -7.7	<0.001
primi_env	-9.0	-9.5, -8.6	<0.001
primi_healthy	-8.1	-8.5, -7.7	<0.001
parKat			
3	—	—	
2	-2.4	-2.5, -2.3	<0.001
4	0.34	0.24, 0.43	<0.001
race			
PH	—	—	
Autre	-6.3	-6.8, -5.8	<0.001
Croisée	-1.5	-1.7, -1.3	<0.001
Montbéliarde	-3.5	-3.8, -3.3	<0.001
Normande	-6.1	-6.3, -5.9	<0.001
dim * mast_cat1			
dim * dpHigh_env	0.04	0.02, 0.06	<0.001
dim * dpHigh_healthy	0.01	0.00, 0.03	0.11
dim * dpLow_cont	0.00	-0.02, 0.02	0.8
dim * dpLow_env	0.04	0.02, 0.05	<0.001
dim * dpLow_healthy	0.02	0.00, 0.03	0.027
dim * primi_cont	0.01	-0.01, 0.03	0.4
dim * primi_env	0.03	0.02, 0.05	<0.001
dim * primi_healthy	0.01	0.00, 0.03	0.068

¹CI = Confidence Interval

Les résultats sont moins nets concernant la PL. Selon le tableau 6, seules les multipares saines ainsi que les primipares ont montré un effet significatif. Concernant les multipares, quel que soit leur statut avant tarissement, le fait d'être exempt de toute mammite au cours de cette lactation semble montrer une augmentation de la production laitière suivante de 1,3 unité par rapport aux primipares saines. Et concernant les primipares, le fait d'avoir une mammite semble tout de même entraîner une baisse de production mais qui n'apparaît pas significative.

Les prédictions réalisées à partir de ce modèle sont visibles sur les Figures 30, 31, 32, 33 et 34.

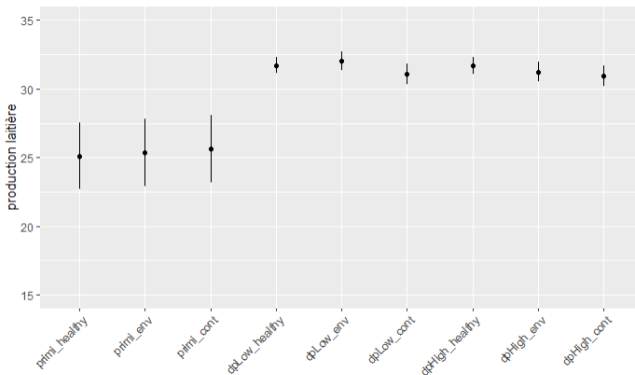


Figure 30 : Production laitière moyenne à 7 jours en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

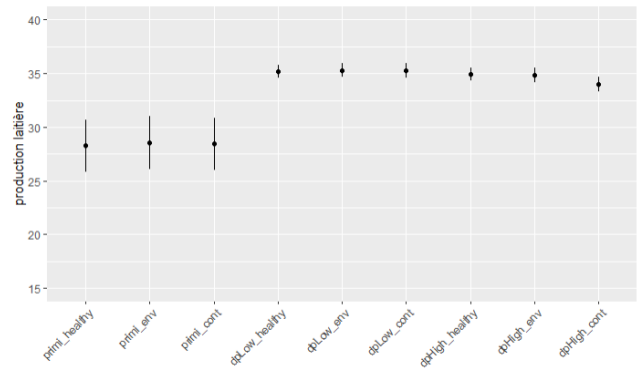


Figure 31 : Production laitière moyenne à 15 jours en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

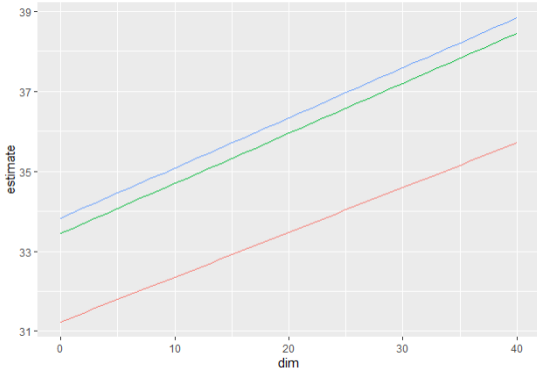


Figure 32 : Production laitière moyenne d'une vache en fonction du jour en lait. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6 pour une vache de statut mammitaire *primi_healthy* pour les primipares ou *dpLow_healthy* pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

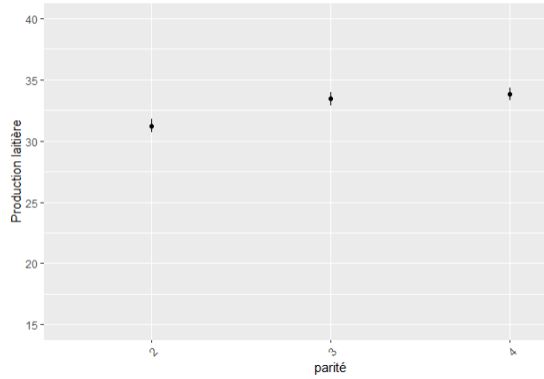


Figure 33 : Production laitière moyenne d'une vache en fonction de la parité. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6 pour une vache de statut mammitaire *primi_healthy* pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.

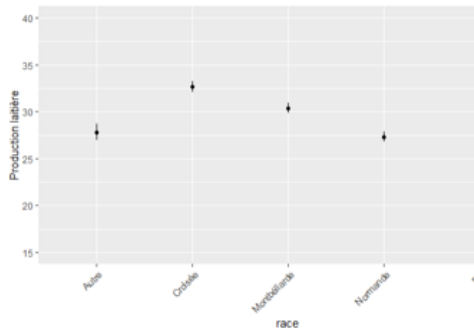


Figure 34 : Production laitière moyenne d'une vache en fonction de sa race. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 6 pour une vache de statut mammitaire *primi_healthy* pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.

f) *Modélisation de l'impact des mammites sur le risque de mort*

Tableau 7 : Résultat de la régression de Cox visant à montrer l'impact des mammites sur le risque de mort.

Characteristic	log(HR) ¹	95% CI ¹	p-value
parKat			
1	—	—	
2	-0.03	-0.23, 0.18	0.8
3	0.15	-0.06, 0.36	0.2
4	0.35	0.16, 0.54	<0.001
mast_cat1			
dpHigh_cont	—	—	
dpHigh_env	0.40	0.19, 0.62	<0.001
dpHigh_healthy	0.09	-0.11, 0.28	0.4
dpLow_cont	-0.20	-0.49, 0.08	0.2
dpLow_env	0.13	-0.10, 0.35	0.3
dpLow_healthy	-0.01	-0.19, 0.18	>0.9
primi_cont	-0.20	-0.47, 0.08	0.2
primi_env	0.13	-0.05, 0.30	0.2
primi_healthy			

¹HR = Hazard Ratio, CI = Confidence Interval

Les résultats sont assez peu significatifs si l'on regarde le Tableau 7, ils montrent que seules les catégories de multipares hautes en cellules avant tarissement, en mammites à réservoir mammaire à la lactation en cours, ainsi que la parité 4 et plus présentent une augmentation significative du risque de mort avec des valeurs de p-value < 0,001.

Lorsque l'on observe le score prédit avec les effets marginaux on observe cependant que le risque de mort est légèrement plus élevé lors de mammites à réservoir environnemental ce qui paraît cohérent car ce sont souvent les mammites à réservoir environnemental qui provoquent les signes cliniques les plus graves.

Les prédictions sont visibles dans les Figures 35 et 36.

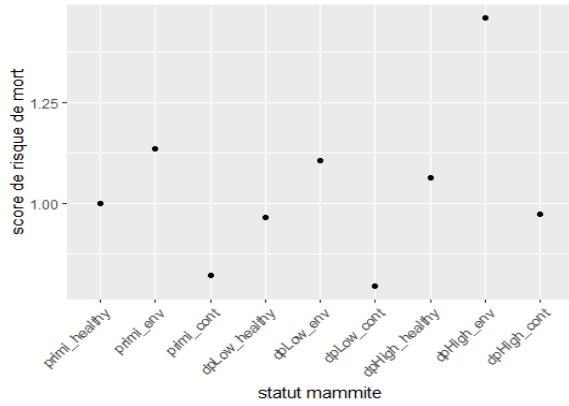


Figure 34 : Risque qu'une vache meure de manière momentanée en fonction du statut mammite déterminé 90 jours après vêlage. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 7 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

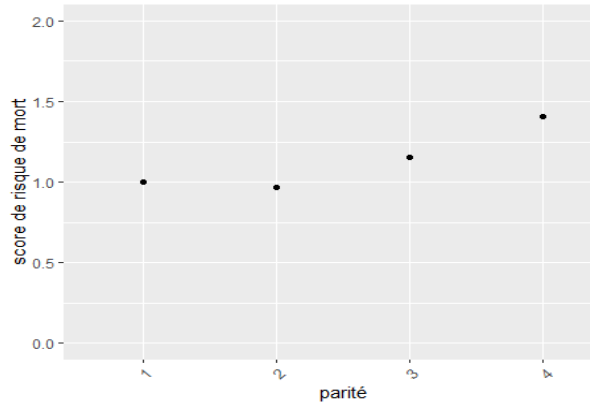


Figure 35: Risque qu'une vache meure de manière momentanée en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau XX pour une vache de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

g) Modélisation de l'impact des mammites sur les dynamiques de cellules

Tableau 8 : Résultat de la régression logistique visant à montrer l'impact des mammites sur la probabilité d'avoir une CCS élevé au dernier contrôle avant tarissement.

Characteristic	OR¹	95% CI¹	p-value
parKat			
3	—	—	
1	0.47	0.44, 0.51	<0.001
2	0.66	0.62, 0.70	<0.001
4	1.44	1.35, 1.53	<0.001
milk_early_max_scaled_p1	1.07	1.02, 1.12	0.005
milk_early_max_scaled_p2	1.14	1.09, 1.19	<0.001
milk_early_max_scaled_p3	1.14	1.09, 1.19	<0.001
milk_early_max_scaled_p4	1.03	0.99, 1.08	0.12
mast_cat1			
primi_healthy	—	—	
dpHigh_cont	10.6	9.41, 11.9	<0.001
dpHigh_env	4.76	4.37, 5.19	<0.001
dpHigh_healthy	2.56	2.43, 2.69	<0.001
dpLow_cont	4.26	3.86, 4.71	<0.001
dpLow_env	1.86	1.74, 2.00	<0.001
primi_cont	7.60	6.92, 8.34	<0.001
primi_env	2.50	2.33, 2.68	<0.001
race			
PH	—	—	
Autre	0.75	0.58, 0.99	0.040
Croisée	1.04	0.94, 1.17	0.4
Montbéliarde	0.79	0.71, 0.87	<0.001
Normande	1.40	1.28, 1.52	<0.001

¹OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval

Par rapport aux primipares saines prises comme référence, toutes les autres catégories ont une probabilité augmentée d'avoir une CCS supérieur à 200 000 cell/mL au dernier contrôle avant tarissement. Notamment les multipares qui avaient déjà un taux cellulaire élevé au dernier contrôle avant tarissement de la précédente lactation, car les animaux de cette catégorie ont environ 10,6 plus de chances d'avoir un contrôle élevé avant tarissement comparativement à la catégorie de référence. Les probabilités sont d'autant plus élevées que l'animal appartient à une catégorie dite de mammites

à réservoir mammaire. On peut nettement voir sur la Figure 37 qu'une vache multipare à mammitte contagieuse et qui était déjà haute en cellule avant le dernier tarissement, possède une probabilité d'environ 75% d'avoir une CCS élevée en début de lactation. Contrairement à une primipare saine qui possède une probabilité d'environ 15% d'avoir une CCS élevée avant tarissement.

Les autres prédictions sont visibles sur les Figures 38, 39 et 40.

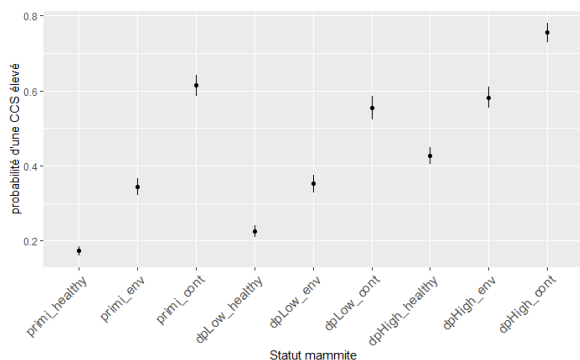


Figure 36 : Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement en fonction du statut mammitte. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 8 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein

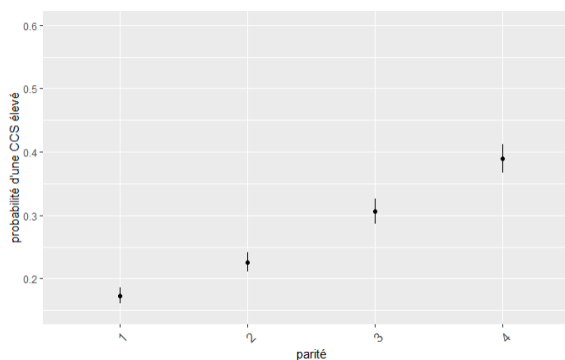


Figure 37 : Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement en fonction de la parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 8 pour une vache de statut mammitte primi_healthy pour les primipares ou dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

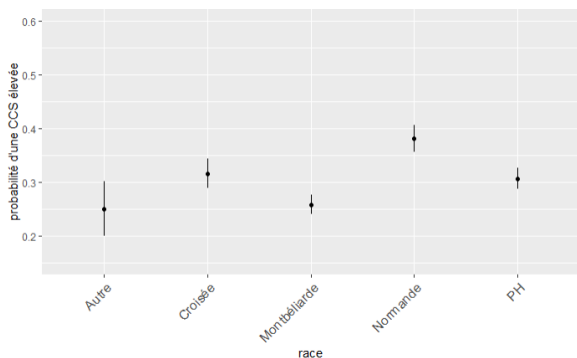


Figure 38 : Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement en fonction de la race. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 8 pour une vache de statut mammitte primi_healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.

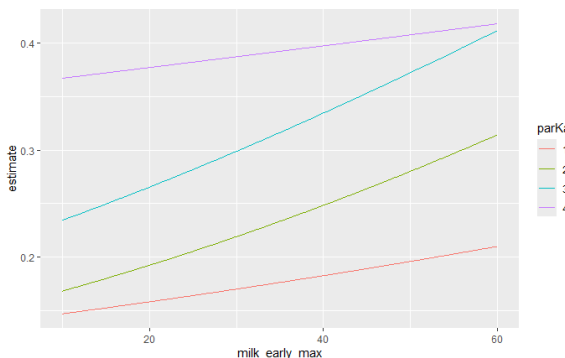


Figure 39 : Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement en fonction de sa production laitière. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 8 pour une vache PH de statut mammitte primi_healthy pour la parité 1 et de statut mammitte dpLow_healthy pour les autres parités.

Tableau 9 : Résultat de la régression logistique évaluant l'impact des mammites sur la probabilité de guérir au cours du tarissement.

Characteristic	OR ¹	95% CI ¹	p-value
parKat			
3	—	—	
1	1.12	0.97, 1.28	0.12
2	1.10	1.00, 1.21	0.041
4	0.87	0.80, 0.96	0.004
milk_early_max_scaled_p1	0.96	0.88, 1.05	0.4
milk_early_max_scaled_p2	0.94	0.87, 1.01	0.071
milk_early_max_scaled_p3	0.89	0.83, 0.95	<0.001
milk_early_max_scaled_p4	0.93	0.87, 0.98	0.009
mast_cat1			
primi_healthy	—	—	
dpHigh_cont	0.26	0.24, 0.29	<0.001
dpHigh_env	0.51	0.45, 0.56	<0.001
dpHigh_healthy	0.82	0.75, 0.89	<0.001
dpLow_cont	0.36	0.32, 0.41	<0.001
dpLow_env	0.65	0.58, 0.74	<0.001
primi_cont	0.59	0.51, 0.69	<0.001
primi_env	0.91	0.79, 1.06	0.2
race			
PH	—	—	
Autre	0.76	0.51, 1.14	0.2
Croisée	0.81	0.68, 0.96	0.018
Montbéliarde	1.17	1.03, 1.32	0.013
Normande	0.89	0.78, 1.01	0.066

¹OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval

Le Tableau 9 montre que concernant la probabilité de guérison au cours du tarissement, le fait d'avoir une mammite à réservoir mammaire réduit significativement la probabilité d'une guérison au tarissement. C'est également le cas pour les mammites environnementales mais de manière moins marquée. Les prédictions visibles sur la Figure 41 semblent concorder avec les résultats de la Figure 9. On voit qu'une multipare dont la CCS avant le dernier tarissement était élevée et qui a toujours une CCS élevée en début de la lactation suivante a près de 30% moins de probabilité de guérir au cours

du tarissement en comparaison d'une primipare saine. La différence est également observable pour une multipare qui était saine avant le dernier tarissement mais qui possède une CCS élevée au début de la lactation en cours. Cette différence est cependant réduite puisque qu'elle est plutôt de l'ordre de 20%. Les autres prédictions sont visibles sur les Figures 42, 43 et 44.

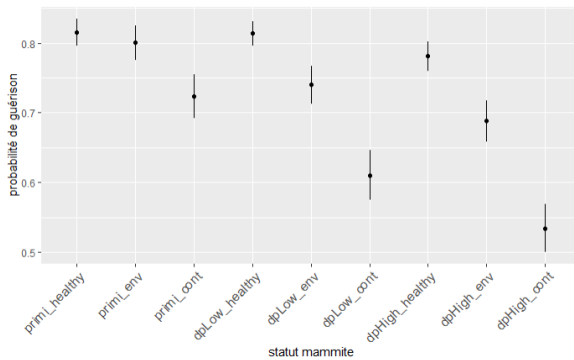


Figure 40 : Probabilité pour une vache de guérir au cours du tarissement en fonction de son statut mammite. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 9 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein

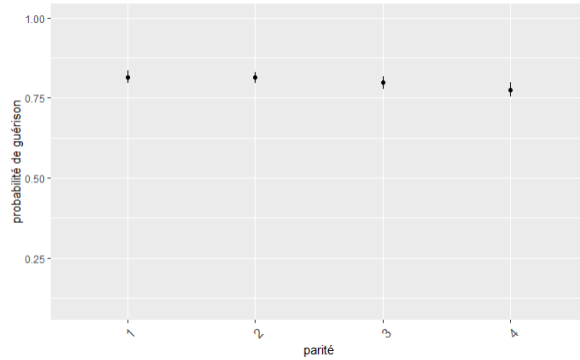


Figure 41 : Probabilité pour une vache de guérir au cours du tarissement en fonction de sa parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 9 pour une vache de statut mammite *primi_healthy* pour les primipares ou *dpLow_healthy* pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

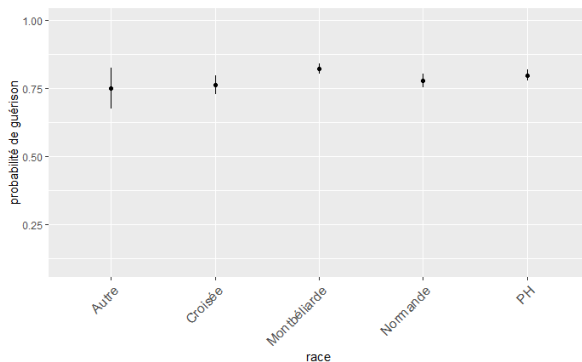


Figure 42 : Probabilité pour une vache de guérir au cours du tarissement en fonction de sa race. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 9 pour une vache de statut mammite *primi_healthy* pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.

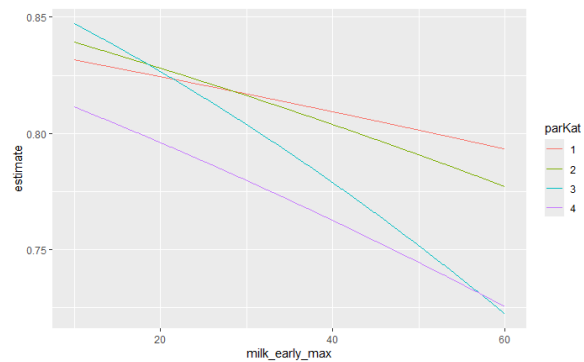


Figure 43 : Probabilité d'avoir une CCS élevée au dernier contrôle avant tarissement en fonction de sa production laitière. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 9 pour une vache PH de statut mammite *primi_healthy* pour la parité 1 et de statut mammite *dpLow_healthy* pour les autres parités.

Tableau 10 : Résultat de la régression logistique visant à montrer l'impact des mammites sur la probabilité d'une nouvelle infection au cours du tarissement.

Characteristic	OR ¹	95% CI ¹	p-value
parKat			
3	—	—	
1	0.72	0.65, 0.81	<0.001
2	0.87	0.80, 0.96	0.005
4	1.33	1.19, 1.48	<0.001
milk_early_max_scaled_p1	1.02	0.95, 1.09	0.6
milk_early_max_scaled_p2	1.04	0.98, 1.11	0.2
milk_early_max_scaled_p3	1.07	0.99, 1.16	0.079
milk_early_max_scaled_p4	1.00	0.93, 1.07	>0.9
mast_cat1			
primi_healthy	—	—	
dpHigh_cont	3.18	2.55, 3.96	<0.001
dpHigh_env	2.21	1.89, 2.58	<0.001
dpHigh_healthy	1.32	1.20, 1.44	<0.001
dpLow_cont	2.46	2.08, 2.90	<0.001
dpLow_env	1.62	1.45, 1.81	<0.001
primi_cont	2.57	2.18, 3.02	<0.001
primi_env	1.60	1.43, 1.78	<0.001
race			
PH	—	—	
Autre	0.94	0.62, 1.42	0.8
Croisée	1.08	0.91, 1.27	0.4
Montbéliarde	0.83	0.74, 0.94	0.002
Normande	1.05	0.92, 1.19	0.5

¹OR = Odds Ratio, CI = Confidence Interval

Selon le Tableau 10, toute mammite quel soit environnementale ou à réservoir mammaire, chez une primipare ou une multipare augmente le risque de nouvelle infection acquise au cours du tarissement. Le risque est d'autant plus élevé que la mammite appartient à la catégorie de réservoir mammaire. En se basant sur les prédictions faites grâce aux effets marginaux visibles sur la Figure 45, on observe la tendance inverse par rapport à précédemment, avec une probabilité de nouvelle infection environ 15% plus élevée pour une primipare à cellules avant le dernier tarissement et en mammite à réservoir mammaire en début de lactation en comparaison avec une primipare saine.

Les autres prédictions sont visibles sur les Figures 46, 47 et 48.

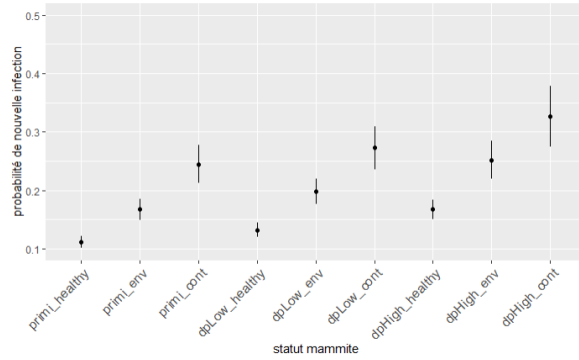


Figure 44 : Probabilité d'une nouvelle infection acquise au cours du tarissement selon le statut mammite en début de lactation. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 10 pour une vache de parité 1 pour les primipares et de parité 3 pour les autres, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein

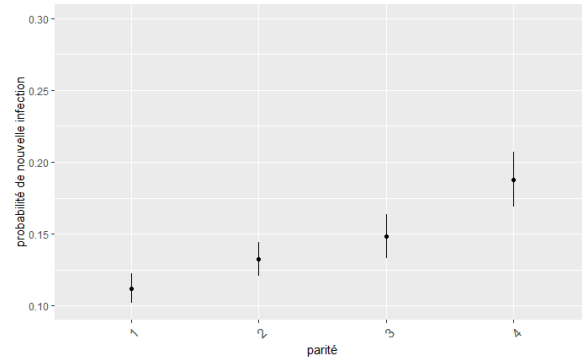


Figure 45 : Probabilité d'une nouvelle infection acquise au cours du tarissement selon la parité. Les prédictions ont été générées à partir du modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 10 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour les primipares ou dpLow_healthy pour les multipares, avec une production laitière moyenne et de race Prim'Holstein.

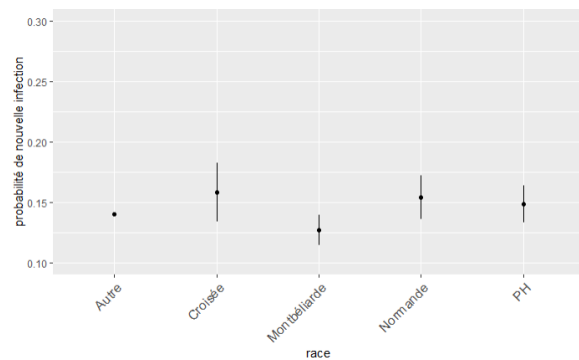


Figure 46 : Probabilité d'une nouvelle infection acquise au cours du tarissement selon la race. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 10 pour une vache de statut mammite primi_healthy pour une parité 1 avec une production laitière moyenne.

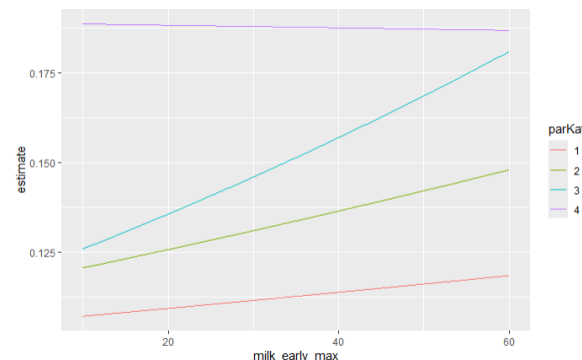


Figure 47 : Probabilité d'une nouvelle infection acquise au cours du tarissement selon la PL. Les prédictions ont été générées à partir d'un modèle dont les résultats sont présents dans le Tableau 8 pour une vache PH de statut mammite primi_healthy pour la parité 1 et de statut mammite dpLow_healthy pour les autres parités.

h) Contrefactuels

(1) Scénario « Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ».

- Taux de nouvelles infections

Les résultats du scénario 1 montrent qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative pour le taux moyen de nouvelles infections au tarissement ni pour la PL moyenne a 15 jours en lait. Cependant le taux moyen de guérison au tarissement est plus élevé (77% pour le contrefactuel contre 74% pour le factuel) et la différence est statistiquement significative.

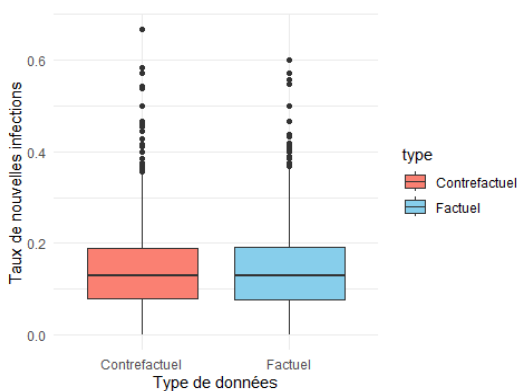


Figure 48 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ».

Tableau 11 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour évaluer si les moyennes sont significativement différentes ou non.

Test	Statistique	Valeur_p	Moyennes
Test de Student factuel	0.945	4.00e-21	0.14
Test de Student counterfactual	0.949	1.79e-25	0.14
Test de Wilcoxon	1198066.00	0.988	

- Taux de guérison

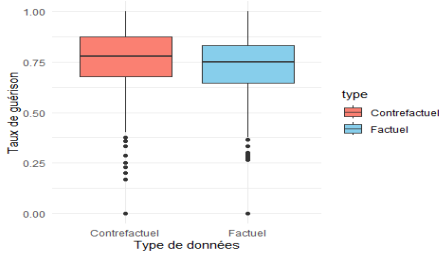


Figure 49 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ».

Tableau 12 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.

Test	Statistique	Valeur_p	Moyennes
Test de Student factuel	0.980	6.807e-12	0.738
Test de Student counterfactual	0.950	3.754e-25	0.771
Test de Wilcoxon	1354074.00	9.611e-11	

- Production laitière moyenne

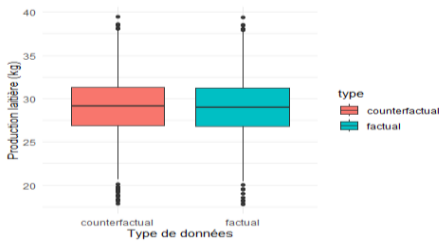


Figure 50 : Boxplot montrant la différence de Production laitières moyennes entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire »

Tableau 13 : test statistiques montrant la significativité de différence entre les moyennes des productions laitières factuelles et contrefactuelles au cours du scénario «Prévention de toutes les mammites à réservoir mammaire ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.

Test	Statistique	Valeur_p	Moyennes
Test de Student factuel	0.996	0.000037	28.92
Test de Student counterfactual	0.996	0.000069	29.05
Test de Wilcoxon	1916618.00	0.243	

(2) Scénario 2 : « Réforme uniquement des vaches en mammite à réservoir mammaire »

Concernant le scénario 2, il n'y a pas de différence statistiquement significative pour le taux moyen de nouvelles infections au tarissement ni pour la PL moyenne a 15 jours en lait non plus. Cependant, là aussi, le taux moyen de guérison au tarissement est plus élevé (77% pour le contrefactuel contre 74% pour le factuel) et la différence est statistiquement significative.

- Taux de nouvelles infections

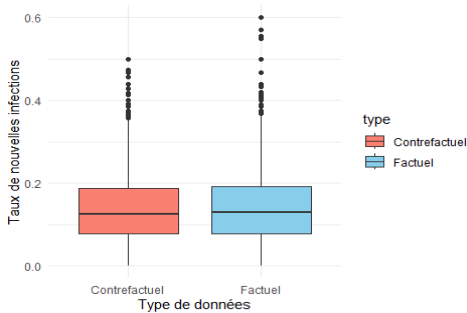


Figure 51 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire ».

Tableau 14 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire ».Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.

Test	Statistique	Valeur_p	Moyennes
Test de Student factuel	0.945	4.000e-21	0.14
Test de Student counterfactual	0.965	1.660e-19	0.14
Test de Wilcoxon	997291.00	0.583	

- *Taux de guérison*

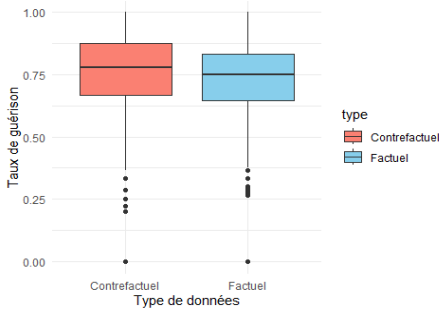


Figure 52 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire».

Tableau 15 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire ».Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.

Test	Statistique	Valeur_p	Moyennes
Test de Student factuel	0.980	6.807e-12	0.738
Test de Student counterfactual	0.955	7.620e-22	0.775
Test de Wilcoxon	1152490.50	3.138e-12	

- *Production laitière moyenne*

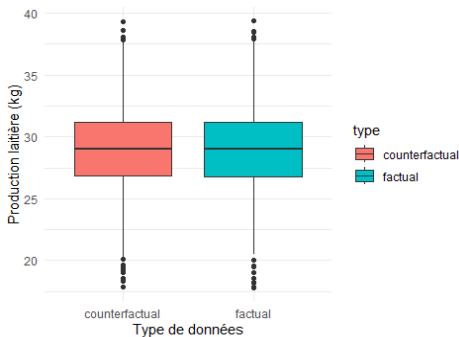


Figure 53 : Boxplot montrant la différence de Production laitières moyennes entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire».

Tableau 16 : test statistiques montrant la significativité de différence entre les moyennes des productions laitières factuelles et contrefactuelles au cours du scénario «Réforme uniquement des vaches à mammite à réservoir mammaire ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.

Test	Statistique	Valeur_p	Moyennes
Test de Student factuel	0.996	0.000037	28.92
Test de Student counterfactual	0.996	0.000016	28.90
Test de Wilcoxon	1870702.00	0.879	

(3) Scénario 3 : « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées »

Pour ce dernier scénario, la même constatation est faite, il n'y pas de réelle différence significative entre le taux moyen de nouvelles infections au tarissement, ainsi que pour la PL

moyenne à 15 jours entre le contrefactuel et le factuel mais il existe cependant toujours une différence entre le taux moyen de guérison au tarissement (77% contre 74% pour le factuel)

- Taux de nouvelles infections

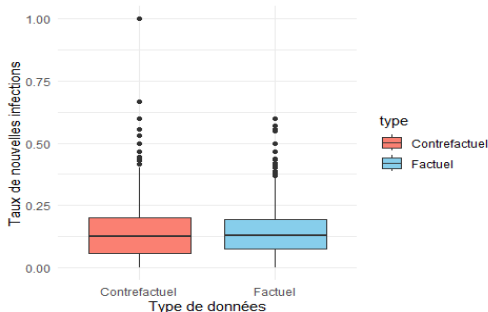


Figure 54 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ».

Tableau 17 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de nouvelles infections au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wolcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.

Test	Statistique	Valeur_p	Moyennes
Test de Student factuel	0.945	4.000e-21	0.14
Test de Student counterfactual	0.837	8.522e-40	0.14
Test de Wilcoxon	1063369.00	0.002	

- *Taux de guérison*

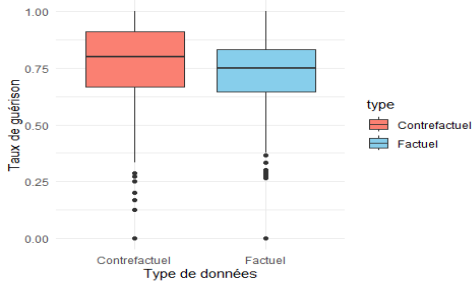


Figure 55 : Boxplot montrant la différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ».

Tableau 18 : tests statistiques montrant la significativité de différence entre les probabilités moyennes de guérison au tarissement entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.

Test	Statistique	Valeur_p	Moyennes
Test de Student factuel	0.980	6.807e-12	0.738
Test de Student counterfactual	0.886	2.429e-34	0.766
Test de Wilcoxon	1274732.50	4.835e-13	

- *Production laitière moyenne*

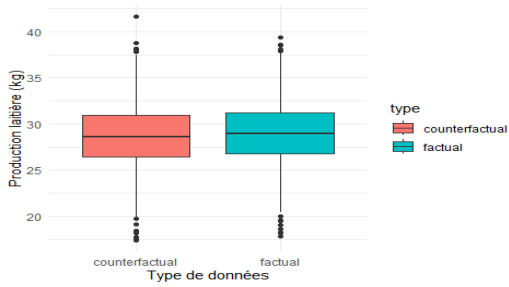


Figure 56 : Boxplot montrant la différence de Production laitières moyennes entre le factuel et le contrefactuel au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ».

Tableau 19 : test statistiques montrant la significativité de différence entre les moyennes des productions laitières factuelles et contrefactuelles au cours du scénario « Réforme de toutes les vaches à mammites à réservoir mammaire en plus des réformes déjà planifiées ». Le test de Student sert à tester l'hypothèse de normalité et le test de Wilcoxon est utilisé pour montrer si les moyennes sont significativement différentes ou non.

Test	Statistique	Valeur_p	Moyennes
Test de Student factuel	0.996	0.000037	28.92
Test de Student counterfactual	0.997	0.000624	28.61
Test de Wilcoxon	1734018.00	0.002	

Pour ces trois scénarios, on observe une grande dispersion des données contrefactuelles avec quelques valeurs extrêmes aberrantes. De plus il semble logique que le taux de guérison au tarissement soit plus élevé pour ces trois scénarios car toutes les vaches dites "incurables" ont été retirées des troupeaux.

C. Discussion

1. Pertinence de la méthode

La manière d'aborder le problème en essayant de définir clairement chaque sous-question en utilisant l'inférence causale et chercher les estimands théoriques avant de s'attaquer à des modélisations statistiques permet de clarifier le problème et de réellement visualiser la démarche de résolution. Le temps court consacré à poser le problème clairement et le gain en simplification justifient pleinement l'utilisation de cette démarche dans le cas de cette étude. Chaque modélisation statistique a été ensuite choisie en fonction de chaque sous-question. Il semble que poser le problème de cette façon permettra par la suite aux autres personnes voulant continuer ou améliorer l'étude de mieux intégrer et comprendre ce qui a déjà été réalisé.

Les modèles peuvent sûrement être améliorés de manière à intégrer plus de données pertinentes mais chaque modèle a été réalisé au mieux avec pour chaque sous-partie plusieurs tentatives de modélisations qui permettaient de comparer plusieurs modèles et de sélectionner celui qui convergait avec succès et qui avait les meilleures performances (plus petit AIC).

2. Interprétation des résultats

On se posait les questions des conséquences des mammites sur la réforme ainsi que de l'impact des réformes pour mammites sur la dynamique ultérieure des infections intramammaires. Les différents résultats nous ont permis de montrer la complexité de la gestion des mammites qui sont à la fois

causes et conséquences des choix de réforme. On a tout d'abord cherché à montrer l'intervention des mammites dans les différentes voies de réformes des vaches laitières en s'intéressant à la reproduction puis ensuite la PL et au risque de mortalité. On a ensuite utilisé ces résultats pour essayer de changer la dynamique de gestion des troupeaux et voir si cela pouvait entraîner des changements dans les guérisons et les nouvelles infections.

a) Reproduction

Les résultats obtenus à partir des différentes modélisations statistiques appliquées au jeu de données fourni indiquent que le statut de mammite a un impact statistiquement significatif sur les décisions de mise à la reproduction, où une différence notable de probabilité a été observée entre les différents statuts. Concernant la réussite à la première insémination et le nombre d'inséminations tentées, l'effet est moins marqué. Toutefois, une légère diminution de la probabilité de réussite à la première insémination a été constatée chez les multipares atteintes de mammite, en particulier pour les mammites qualifiées de "contagieuses". Une légère différence a également été observée pour le nombre d'inséminations, bien qu'il soit difficile d'interpréter ce résultat, étant donné que le nombre d'inséminations est une décision prise par l'éleveur. On peut émettre l'hypothèse qu'un éleveur, face à une vache atteinte de mammite "contagieuse", pourrait choisir de limiter le nombre d'inséminations pour ne pas gaspiller de semence. Concernant la probabilité de revêlage, le statut de mammite semble également exercer une influence, indépendamment de la parité. La présence d'une mammite "environnementale" diminue les chances de revêlage, une diminution encore plus prononcée en cas de mammites "contagieuses" est montrée.

Cette étude ne se base que sur le statut durant les 90 premiers jours de lactation et ne se concentre pas sur le délai entre la mammite et l'insémination artificielle, il est donc difficile de rapprocher les résultats observés à ceux de Hertl et al. (2010). Cependant s'il est considéré qu'une mammite contagieuse est plus à même de devenir subclinique et chronique qu'une mammite environnementale, alors les résultats semblent aller dans le sens de ceux établis par Schrick et al. (2001). Il n'était pas possible d'identifier les différents germes en cause à partir des données fournies. Il pourrait être envisagé d'approfondir l'étude en effectuant les mêmes modélisations, mais cette fois-ci en tenant compte des différentes catégories de germes impliqués.

Les résultats restent également interprétés selon des hypothèses sur le comportement des éleveurs, mais cela implique que les décisions prises par ces derniers se basent de manière constante sur les mêmes éléments et que ce schéma de décision soit répété par tous les éleveurs ce qui est peu probable. Cependant du fait qu'une majorité des élevages français soient assez comparables dans leur schéma de mise à la reproduction et dans leurs objectifs il n'est pas aberrant d'interpréter les résultats en admettant que ces décisions soient proches de la réalité pour cette majorité.

Un autre facteur important qui n'a pas été pris en compte est la présence d'un troupeau de génisses de renouvellement qui aurait une influence sur la décision de mise à la reproduction de l'éleveur. Cependant il a été supposé que cela s'appliquait à tous les élevages et que les tendances observées dans les modélisations restaient valides sans prendre en compte ce facteur.

Dans un système d'élevage dont la rentabilité dépend de la capacité à produire du lait et donc à se reproduire, le fait d'avoir un effet négatif visible des mammites sur la mise à la reproduction et sur la probabilité de revêlage entraîne donc indirectement une sortie de l'élevage anticipée par rapport aux attentes de production.

b) Production laitière

Pour la production laitière les résultats concernant le statut mammitique ne sont pas statistiquement significatifs. La réelle différence est perçue en comparant primipares et multipares ce qui est cohérent par rapports aux observations des différentes études sur le sujet car une primipare produit moins de lait qu'une multipare (de Vries, 2017). Les prédictions marginales semblent tout de même montrer une tendance à la baisse de production pour les cas de mammitique "contagieuses" et "environnementales" à J7 et à J15 de la lactation.

Ce résultat reste peu significatif, sachant que de plus la modélisation est linéaire. En effet la réelle courbe de lactation réalisée selon un modèle de Wilmlink (visible en annexe) montre une courbe en 3 phases. Il a été décidé d'assimiler la première phase à une droite afin de permettre de modéliser le début de lactation comme un modèle linéaire. Cela semble se rapprocher de la réalité de manière satisfaisante.

Pour réellement modéliser l'impact du statut des mammites sur le niveau de PL, il faudrait pouvoir mesurer la PL individuelle sur tout le début de lactation jusqu'au pic de lactation avéré avec des contrôles périodiques voire journaliers. Cela n'était pas possible pour cette étude.

c) Mortalité

Concernant le risque de mort, l'utilisation d'une régression de Cox semble tout à fait adaptée pour rechercher l'effet du statut mammitique sur le risque de mort au cours de la lactation. Les courbes de Kaplan-Meier (annexe) révèlent une tendance, les multipares à mammitique "environnementales" sont les plus à risque mais la probabilité de mort semble tout de même très faible toute catégories confondues. La régression à révéler des résultats peu significatifs mais les prédictions marginales vont dans le sens des tendances observées par les courbes de Kaplan-Meier.

Malgré les précautions prises lors du formatage des données, un biais du survivant subsiste car l'unité statistique est la lactation. Donc, si une vache a plus de lactations (ce qui pourrait être le cas si elle a survécu à plusieurs mammites), elle aura un poids statistique plus important dans le modèle. Ce dernier pourrait sous-estimer le risque de mammitique pour les vaches ayant moins de lactations (parce qu'elles ont quitté l'étude prématurément) et surestimer le risque pour celles qui ont plus de lactations (parce qu'elles ont survécu plus longtemps). Des solutions pourraient peut-être permettre de résoudre ce problème comme par exemple appliquer une pondération ou confronter le modèle à d'autres analyses afin d'évaluer plus justement sa robustesse. Il n'en a pas été question ici car l'analyse du risque de mort n'est qu'une petite partie de la question globale il n'a donc pas été possible d'y accorder plus de temps.

d) Dynamiques de cellules

L'analyse des dynamiques de CCS des troupeaux des données de troupeau a révélé que comparé aux primipares saines toutes les autres catégories ont un plus haut risque de terminer leur lactation avec un comptage cellulaire élevé. Tout comme la probabilité de guérison pendant le tarissement pour toutes ces catégories en comparaisons aux primipares saines. Concernant la probabilité de développer une nouvelle infection au tarissement, c'est surtout le statut de la lactation en cours qui semble jouer un rôle et non le statut avant tarissement de la lactation précédente, comme le montre la comparaison des différents OR du modèle du Tableau 10.

e) Contrefactuels

- **Scénario 1**

Ce scénario semble être le plus éloigné de la situation réelle. Il suppose qu'il serait envisageable de prévenir absolument toutes les mammites "contagieuses". Il n'y aurait donc plus que des vaches mammites environnementales et des vaches saines. En pratique il serait extrêmement difficile voire impossible de prévenir 100% des cas de mammites contagieuses. Cela demanderait la mise en place de mesures drastiques voire extrêmes, difficilement applicables en élevage laitier. Cependant ce scénario contrefactuel semble pertinent pour essayer de mesurer le poids des mammites contagieuses dans les dynamiques de cellules du troupeau. Il est important de noter que ce modèle est une simplification extrême et que les conclusions tirées doivent être interprétés avec prudence.

- **Scénario 2**

Ce scénario simplifie la situation en ne prenant pas en compte les vaches réformées pour d'autres raisons (comme la faible production de lait, d'autres problèmes de santé, etc.) et de ne réformer que les vaches en mammite « contagieuse ». Ces vaches sont soit saines soit en mammite "environnementale". Là encore, cela simplifie la situation en retirant la difficulté que représente les vaches réformées pour d'autres raisons. Mais son utilité était de pouvoir le confronter au premier scénario face aux données factuelles. En effet le scénario 1 est un scénario qui envisage des mesures préventives, alors que ce scénario envisage des mesures curatives (en supposant que la réforme est une mesure curative). Là encore les conclusions ne doivent pas être tirées à la hâte. Son utilité sert surtout à mettre en lumière l'implication de certains types de mammites dans la dynamique générale des comptages cellulaires des troupeaux.

- **Scénario 3**

Le but de ce scénario contrefactuel était de se rapprocher un peu plus d'une situation réalisable. Toutes les vaches en mammite "contagieuses" étaient réformées mais les animaux déjà prévus à la réforme dans les données factuelles le restent également ici. C'est un scénario un peu plus compliqué à interpréter de par cette mixité mais il permet de nuancer un peu plus la situation. En intégrant des mesures curatives spécifiques à la réalité de la gestion habituelle du troupeau il permet un meilleur rapprochement avec le factuel tout en conservant une structure permettant des comparaisons analytiques.

Pour ces trois scénarios, le taux de guérison moyen au tarissement est meilleur pour les données contrefactuelles. Cela semble logique car on extrait les animaux dits "incurables". Cependant malgré les attentes de départ, il n'y a pas eu de réelles évolutions en termes de taux moyen de nouvelles infections acquises durant le tarissement ni en termes de niveau de production laitière. Concernant le premier, cela est un peu décevant car il aurait été espéré une amélioration. Cependant cela ne semble pas non plus étonnant étant donné que les nouvelles infections ont été définies comme ayant un premier contrôle > 200 000 cellules/mL au début de la prochaine lactation. Or souvent ce premier contrôle dans nos données peut avoir lieu dans les premiers 15 jours de lactation. Période à laquelle il n'est pas rare d'avoir une augmentation des cellules à cause de l'inflammation causée par le vêlage ce qui est tout à fait normal Bradley and Green (2005). De plus comme le modèle se base sur les résultats d'un contrôle unique, il n'est pas possible de différencier le contagieux de l'environnemental.

IV. Conclusion

En conclusion, cette étude a permis de mettre en lumière l'importance des mammites dans la gestion des troupeaux laitiers et son impact sur la gestion des réformes notamment en montrant les associations entre la survenue d'une mammite, qu'elle soit à réservoir environnementale ou à réservoir mammaire, sur la reproduction et la production laitière des vaches.

À travers l'analyse de divers scénarios contrefactuels, il a été possible d'évaluer comment la prévention et la gestion des mammites influencent la longévité des vaches et leurs performances de production laitière. Les résultats ont montré que les mammites, en particulier celles à réservoir mammaire, augmentent significativement la probabilité de réforme, réduisant ainsi la rentabilité à long terme des élevages.

Toutefois, des mesures préventives bien ciblées et une gestion appropriée des réformes pourraient améliorer non seulement la santé des troupeaux, mais également leur performance économique. Ces résultats ouvrent la voie à de futures recherches visant à optimiser la prise de décision en élevage laitier, notamment en ce qui concerne la prévention des maladies et la gestion du renouvellement des troupeaux, avec des implications positives sur la durabilité des systèmes de production.

V. Bibliographie

Abd ElHafeez, Samar, Graziella D'Arrigo, Daniela Leonardis, Maria Fusaro, Giovanni Tripepi, and Stefanos Roumeliotis. 2021. "Methods to Analyze Time-to-Event Data: The Cox Regression Analysis." *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* 2021 (1): 1302811. <https://doi.org/10.1155/2021/1302811>.

Adamczyk, K., J. Makulska, W. Jagusiak, and A. Węglarz. 2017. "Associations Between Strain, Herd Size, Age at First Calving, Culling Reason and Lifetime Performance Characteristics in Holstein-Friesian Cows." *Animal* 11 (2): 327–34. <https://doi.org/10.1017/S1751731116001348>.

Adamie, B. A., E. Owusu-Sekyere, M. Lindberg, S. Agenäs, A. -K. Nyman, and H. Hansson. 2023. "Dairy Cow Longevity and Farm Economic Performance: Evidence from Swedish Dairy Farms." *Journal of Dairy Science* 106 (12): 8926–41. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23436>.

Ahlman, T., B. Berglund, L. Rydhmer, and E. Strandberg. 2011. "Culling Reasons in Organic and Conventional Dairy Herds and Genotype by Environment Interaction for Longevity." *Journal of Dairy Science* 94 (3): 1568–75. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3483>.

Akers, R. Michael, and Stephen C. Nickerson. 2011. "Mastitis and Its Impact on Structure and Function in the Ruminant Mammary Gland." *Journal of Mammary Gland Biology and Neoplasia* 16 (4): 275–89. <https://doi.org/10.1007/s10911-011-9231-3>.

Archer, S. C., F. Mc Coy, W. Wapenaar, and M. J. Green. 2013. "Association Between Somatic Cell Count Early in the First Lactation and the Longevity of Irish Dairy Cows." *Journal of Dairy Science* 96 (5): 2939–50. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6115>.

Armengol, Ramon, and Lorenzo Fraile. 2018. "Descriptive Study for Culling and Mortality in Five High-Producing Spanish Dairy Cattle Farms (20062016)." *Acta Veterinaria Scandinavica* 60 (1): 45. <https://doi.org/10.1186/s13028-018-0399-z>.

Ballou, M. 2012. "Growth and Development Symposium: Inflammation: Role in the Etiology and Pathophysiology of Clinical Mastitis in Dairy Cows." *Journal of Animal Science* 90 5: 1466–78. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4663>.

Bar, D., L. W. Tauer, G. Bennett, R. N. González, J. A. Hertl, Y. H. Schukken, H. F. Schulte, F. L. Welcome, and Y. T. Gröhn. 2008. "The Cost of Generic Clinical Mastitis in Dairy Cows as Estimated by Using Dynamic Programming." *Journal of Dairy Science* 91 (6): 2205–14. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0573>.

Barkema, H. W., M. A. G. von Keyserlingk, J. P. Kastelic, T. J. G. M. Lam, C. Luby, J. -P. Roy, S. J. LeBlanc, G. P. Keefe, and D. F. Kelton. 2015. "Invited Review: Changes in the Dairy Industry Affecting Dairy Cattle Health and Welfare." *Journal of Dairy Science* 98 (11): 7426–45. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9377>.

Baudeau, F, A Henken, C Fourichon, K Frankena, and H Seegers. 1993. "Associations Between Health Disorders and Culling of Dairy Cows: A Review." *Livestock Production Science* 35 (3): 213–36. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(93\)90094-X](https://doi.org/10.1016/0301-6226(93)90094-X).

- Borne, Bart H. P. van den, Gerdien van Schaik, Theo J. G. M. Lam, Mirjam Nielen, and Klaas Frankena. 2019. "Intramammary Antimicrobial Treatment of Subclinical Mastitis and Cow Performance Later in Lactation." *Journal of Dairy Science* 102 (5): 4441–51. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16254>.
- Boulton, A. C., J. Rushton, and D. C. Wathes. 2017. "An Empirical Analysis of the Cost of Rearing Dairy Heifers from Birth to First Calving and the Time Taken to Repay These Costs." *Animal* 11 (8): 1372–80. <https://doi.org/10.1017/S1751731117000064>.
- Bradley, Andrew, and Martin Green. 2005. "Use and Interpretation of Somatic Cell Counts in the Dairy Cow." *In Practice* 27 (June). <https://doi.org/10.1136/inpract.27.6.310>.
- Brotherstone, S., Roel Veerkamp, and W. Hill. 1997. "Genetic Parameters for a Simple Predictor of the Lifespan of Holstein-Friesian Dairy Cattle and Its Relationship to Production." *Animal Science* 65 (August): 31–37. <https://doi.org/10.1017/S135772980001626X>.
- Caraviello, D. Z., K. A. Weigel, G. E. Shook, and P. L. Ruegg. 2005. "Assessment of the Impact of Somatic Cell Count on Functional Longevity in Holstein and Jersey Cattle Using Survival Analysis Methodology." *Journal of Dairy Science* 88 (2): 804–11. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72745-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72745-4).
- Coffey, E. M., W. E. Vinson, and R. E. Pearson. 1986. "Somatic Cell Counts and Infection Rates for Cows of Varying Somatic Cell Count in Initial Test of First Lactation." *Journal of Dairy Science* 69 (2): 552–55. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(86\)80437-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(86)80437-4).
- Compton, C. W. R., C. Heuer, P. T. Thomsen, T. E. Carpenter, C. V. C. Phyn, and S. McDougall. 2017. "Invited Review: A Systematic Literature Review and Meta-Analysis of Mortality and Culling in Dairy Cattle." *Journal of Dairy Science* 100 (1): 1–16. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11302>.
- Dalanezi, F. M., S. F. Joaquim, F. F. Guimarães, S. T. Guerra, B. C. Lopes, E. M. S. Schmidt, R. L. A. Cerri, and H. Langoni. 2020. "Influence of Pathogens Causing Clinical Mastitis on Reproductive Variables of Dairy Cows." *Journal of Dairy Science* 103 (4): 3648–55. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16841>.
- Dallago, Gabriel M., Kevin M. Wade, Roger I. Cue, J. T. McClure, René Lacroix, Doris Pellerin, and Elsa Vasseur. 2021. "Keeping Dairy Cows for Longer: A Critical Literature Review on Dairy Cow Longevity in High Milk-Producing Countries." *Animals* 11 (3): 808. <https://doi.org/10.3390/ani11030808>.
- Dingwell, R. T., T. F. Duffield, K. E. Leslie, G. P. Keefe, L. DesCoteaux, D. F. Kelton, K. D. Lissemore, Y. H. Schukken, P. Dick, and R. Bagg. 2002. "The Efficacy of Intramammary Tilmicosin at Drying-Off, and Other Risk Factors for the Prevention of New Intramammary Infections During the Dry Period." *Journal of Dairy Science* 85 (12): 3250–59. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74413-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74413-5).
- Dohoo, I. R., and K. E. Leslie. 1991. "Evaluation of Changes in Somatic Cell Counts as Indicators of New Intramammary Infections." *Preventive Veterinary Medicine* 10 (3): 225–37. [https://doi.org/10.1016/0167-5877\(91\)90006-N](https://doi.org/10.1016/0167-5877(91)90006-N).
- Ducrocq, V. 1994. "Statistical Analysis of Length of Productive Life for Dairy Cows of the Normande Breed." *Journal of Dairy Science* 77 (3): 855–66. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77020-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77020-X).
- EFSA (European Food Safety Society), 2009, « Scientific report on the effects of farming systems on dairy cow welfare and disease », EFSA Journal, <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.1143r>

Fernandes, L., I. Guimaraes, N. R. Noyes, L. S. Caixeta, and V. S. Machado. 2021. "Effect of Subclinical Mastitis Detected in the First Month of Lactation on Somatic Cell Count Linear Scores, Milk Yield, Fertility, and Culling of Dairy Cows in Certified Organic Herds." *Journal of Dairy Science* 104 (2): 2140–50. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19153>.

Flysjö, Anna, Maria Henriksson, Christel Cederberg, Stewart Ledgard, and Jan-Eric Englund. 2011. "The Impact of Various Parameters on the Carbon Footprint of Milk Production in New Zealand and Sweden." *Agricultural Systems* 104 (6): 459–69. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.03.003>.

Garcia, Alvaro. 2004. "Contagious Vs. Environmental Mastitis," January.

Gelman, Andrew, and Jennifer Hill. 2006. *Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Models*. <https://www.cambridge.org/highereducation/books/data-analysis-using-regression-and-multilevel-hierarchical-models/32A29531C7FD730C3A68951A17C9D983>.

Golder, H. M., A. Hodge, and I. J. Lean. 2016. "Effects of Antibiotic Dry-Cow Therapy and Internal Teat Sealant on Milk Somatic Cell Counts and Clinical and Subclinical Mastitis in Early Lactation." *Journal of Dairy Science* 99 (9): 7370–80. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11114>.

Gonçalves, J. L., C. Kamphuis, H. Vernooij, J. P. Araújo, R. C. Grenfell, L. Juliano, K. L. Anderson, H. Hogeveen, and M. V. dos Santos. 2020. "Pathogen Effects on Milk Yield and Composition in Chronic Subclinical Mastitis in Dairy Cows." *The Veterinary Journal* 262 (August): 105473. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2020.105473>.

Graça, João, Abílio Oliveira, and Maria Manuela Calheiros. 2015. "Meat, Beyond the Plate. Data-Driven Hypotheses for Understanding Consumer Willingness to Adopt a More Plant-Based Diet." *Appetite* 90 (July): 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.02.037>.

Grandl, F., M. Furger, M. Kreuzer, and M. Zehetmeier. 2019. "Impact of Longevity on Greenhouse Gas Emissions and Profitability of Individual Dairy Cows Analysed with Different System Boundaries." *Animal* 13 (1): 198–208. <https://doi.org/10.1017/S175173111800112X>.

Gröhn, Y. T., D. J. Wilson, R. N. González, J. A. Hertl, H. Schulte, G. Bennett, and Y. H. Schukken. 2004. "Effect of Pathogen-Specific Clinical Mastitis on Milk Yield in Dairy Cows." *Journal of Dairy Science* 87 (10): 3358–74. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73472-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73472-4).

Gussmann, Maya, Wilma Steeneveld, Carsten Kirkeby, Henk Hogeveen, Michael Farre, and Tariq Halasa. 2019. "Economic and Epidemiological Impact of Different Intervention Strategies for Subclinical and Clinical Mastitis." *Preventive Veterinary Medicine* 166 (May): 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2019.03.001>.

Haine, Denis, Hector Delgado, Roger Cue, Asheber Sewalem, Kevin Wade, René Lacroix, Daniel Lefebvre, Julie Arsenault, Émile Bouchard, and Jocelyn Dubuc. 2017. "Contextual Herd Factors Associated with Cow Culling Risk in Québec Dairy Herds: A Multilevel Analysis." *Preventive Veterinary Medicine* 144 (September): 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.05.014>.

Halasa, T., M. Nielen, R. B. M. Huirne, and H. Hogeveen. 2009. "Stochastic Bio-Economic Model of Bovine Intramammary Infection." *Livestock Science* 124 (1): 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.02.019>.

Hernan, Miguel A, and James M Robins. 2024. *Causal Inference: What If*. First edition. Boca Raton: CRC Press. <https://www.hsph.harvard.edu/miguel-hernan/causal-inference-book/>.

Hertl, J. A., Y. T. Gröhn, J. D. G. Leach, D. Bar, G. J. Bennett, R. N. González, B. J. Rauch, F. L. Welcome, L. W. Tauer, and Y. H. Schukken. 2010. "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." *Journal of Dairy Science* 93 (4): 1551–60. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2599>.

Hertl, J. A., Y. H. Schukken, F. L. Welcome, L. W. Tauer, and Y. T. Gröhn. 2014. "Effects of Pathogen-Specific Clinical Mastitis on Probability of Conception in Holstein Dairy Cows." *Journal of Dairy Science* 97 (11): 6942–54. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8203>.

Hudson, Christopher D., Andrew J. Bradley, James E. Breen, and Martin J. Green. 2015. "Dairy Herd Mastitis and Reproduction: Using Simulation to Aid Interpretation of Results from Discrete Time Survival Analysis." *The Veterinary Journal* 204 (1): 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2015.01.024>.

Koeck, A., S. Loker, F. Miglior, D. F. Kelton, J. Jamrozik, and F. S. Schenkel. 2014. "Genetic relationships of clinical mastitis, cystic ovaries, and lameness with milk yield and somatic cell score in first-lactation Canadian Holsteins." *Journal of Dairy Science* 97 (9): 5806–13. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7785>.

Liang, D., L. M. Arnold, C. J. Stowe, R. J. Harmon, and J. M. Bewley. 2017. "Estimating US Dairy Clinical Disease Costs with a Stochastic Simulation Model." *Journal of Dairy Science* 100 (2): 1472–86. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11565>.

Lundberg, I, Johnson, R, and Stewart, B.M. 2021. "What Is Your Estimand? Defining the Target Quantity Connects Statistical Evidence to Theory." *American Sociological Review*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/00031224211004187>.

Madouasse, A., J. N. Huxley, W. J. Browne, A. J. Bradley, and M. J. Green. 2010. "Somatic Cell Count Dynamics in a Large Sample of Dairy Herds in England and Wales." *Preventive Veterinary Medicine* 96 (1): 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2010.05.005>.

Mazzetto, Andre M., Shelley Falconer, and Stewart Ledgard. 2022. "Mapping the carbon footprint of milk production from cattle: A systematic review." *Journal of Dairy Science* 105 (12): 9713–25. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22117>.

Mohd Nor, N., W. Steeneveld, M. C. M. Mourits, and H. Hogeveen. 2012. "Estimating the Costs of Rearing Young Dairy Cattle in the Netherlands Using a Simulation Model That Accounts for Uncertainty Related to Diseases." *Preventive Veterinary Medicine* 106 (3): 214–24. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2012.03.004>.

Neerhof, H. J., P. Madsen, V. P. Ducrocq, A. R. Vollema, J. Jensen, and I. R. Korsgaard. 2000. "Relationships Between Mastitis and Functional Longevity in Danish Black and White Dairy Cattle Estimated Using Survival Analysis." *Journal of Dairy Science* 83 (5): 1064–71. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74970-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74970-8).

Nickerson, Stephen, and Robert Akers. 2011. "MAMMARY GLAND | Anatomy." In, 328–37.

Owusu-Sekyere, Enoch, Ann-Kristin Nyman, Mikaela Lindberg, Birhanu Addisu Adamie, Sigrid Agenäs, and Helena Hansson. 2023. "Dairy Cow Longevity: Impact of Animal Health and Farmers' Investment Decisions." *Journal of Dairy Science* 106 (5): 3509–24. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22808>.

Perrin, J. B., C. Ducrot, J. L. Vinard, P. Hendrikx, and D. Calavas. 2011. "Analyse de la mortalité bovine en France de 2003 à 2009." *INRAE Productions Animales* 24 (3): 235–44. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2011.24.3.3258>.

Raboisson, D., E. Cahuzac, P. Sans, and G. Allaire. 2011. "Herd-Level and Contextual Factors Influencing Dairy Cow Mortality in France in 2005 and 2006." *Journal of Dairy Science* 94 (4): 1790–1803. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3634>.

Rahman, M. M., M. Mazzilli, G. Pennarossa, T. a. L. Brevini, A. Zecconi, and F. Gandolfi. 2012. "Chronic Mastitis Is Associated with Altered Ovarian Follicle Development in Dairy Cattle." *Journal of Dairy Science* 95 (4): 1885–93. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4815>.

Reneau, Jeffrey K. 1986. "Effective Use of Dairy Herd Improvement Somatic Cell Counts in Mastitis Control." *Journal of Dairy Science* 69 (6): 1708–20. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(86\)80590-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(86)80590-2).

Rilanto, Triin, Kaari Reimus, Toomas Orro, Ulf Emanuelson, Arvo Viltrop, and Kerli Mõtus. 2020. "Culling Reasons and Risk Factors in Estonian Dairy Cows." *BMC Veterinary Research* 16 (1): 173. <https://doi.org/10.1186/s12917-020-02384-6>.

Rostellato, R., J. Promp, H. Leclerc, S. Mattalia, N. C. Friggens, D. Boichard, and V. Ducrocq. 2021. "Influence of Production, Reproduction, Morphology, and Health Traits on True and Functional Longevity in French Holstein Cows." *Journal of Dairy Science* 104 (12): 12664–78. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19974>.

Rozzi, P., F. Miglior, and K. J. Hand. 2007. "A Total Merit Selection Index for Ontario Organic Dairy Farmers." *Journal of Dairy Science* 90 (3): 1584–93. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(07\)71644-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)71644-2).

Rushen, J, and A M de Passillé. n.d. "I) The Importance of Improving Cow Longevity."

Salat, Olivier, Guillaume Lemaire, Luc Durel, and Florent Perrot. 2023. "Etiology of Severe Mastitis in French Dairy Herds." *PLOS ONE* 18 (12): e0295614. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295614>.

Schrack, F. N., M. E. Hockett, A. M. Saxton, M. J. Lewis, H. H. Dowlen, and S. P. Oliver. 2001. "Influence of Subclinical Mastitis During Early Lactation on Reproductive Parameters." *Journal of Dairy Science* 84 (6): 1407–12. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)70172-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)70172-5).

Schuster, Jesse C., Herman W. Barkema, Albert De Vries, David F. Kelton, and Karin Orsel. 2020. "Invited Review: Academic and Applied Approach to Evaluating Longevity in Dairy Cows." *Journal of Dairy Science* 103 (12): 11008–24. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19043>.

Seegers, H, F Beaudeau, C Fourichon, and N Bareille. 1998. "Reasons for Culling in French Holstein Cows." *Preventive Veterinary Medicine* 36 (4): 257–71. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(98\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(98)00093-2).

Sewalem, A., F. Miglior, G. J. Kistemaker, and B. J. Van Doormaal. 2006. "Analysis of the Relationship Between Somatic Cell Score and Functional Longevity in Canadian Dairy Cattle." *Journal of Dairy Science* 89 (9): 3609–14.

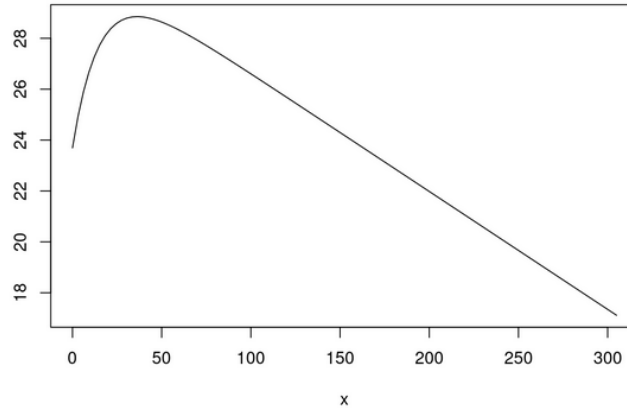
Sharun, Khan, Kuldeep Dhama, Ruchi Tiwari, Mudasir Bashir Gugjoo, Mohd. Iqbal Yattoo, Shailesh Kumar Patel, Mamta Pathak, et al. 2021. "Advances in Therapeutic and Managemental Approaches of Bovine Mastitis: A Comprehensive Review." *Veterinary Quarterly* 41 (1): 107–36. <https://doi.org/10.1080/01652176.2021.1882713>.

Sinha, Mukesh Kr., N. N. Thombare, and Biswajit Mondal. 2014. "Subclinical Mastitis in Dairy Animals: Incidence, Economics, and Predisposing Factors." *The Scientific World Journal* 2014: 523984. <https://doi.org/10.1155/2014/523984>.

Stott, A. W. 1994. "The Economic Advantage of Longevity in the Dairy Cow." *Journal of Agricultural Economics* 45 (1): 113–22. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.1994.tb00382.x>.

Vries, A. De. 2017. "Economic Trade-Offs Between Genetic Improvement and Longevity in Dairy Cattle." *Journal of Dairy Science* 100 (5): 4184–92. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11847>.

VI. Annexes



Annexe 1 : Courbe de Wilmink

```
## Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace
## Approximation) [glmerMod]
## Family: binomial ( logit )
## Formula:
## repro ~ parKat + race + milk_early_max_scaled_p1 + milk_early_max_scaled_p2 +
##   milk_early_max_scaled_p3 + milk_early_max_scaled_p4 + mast_cat1 +
##   (1 | herd_id)
## Data: lac
## Control: glmerControl(optimizer = "bobyqa", optCtrl = list(maxfun = 2e+05))
## Subset: n_ctrl_early > 0 & dp_mis == 0
##
##      AIC      BIC logLik deviance df.resid
## 81251.5 81446.3 -40605.8 81211.5 125482
##
## Scaled residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -37.335   0.172   0.267   0.386   2.183
##
## Random effects:
## Groups Name      Variance Std.Dev.
## herd_id (Intercept) 0.4172  0.6459
## Number of obs: 125502, groups: herd_id, 231
##
## Fixed effects:
##              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
## (Intercept)    1.95915    0.00065  32.304 < 2e-16 ***
## parKat1        2.00323    0.04962  40.374 < 2e-16 ***
## parKat2        0.54660    0.03007  18.175 < 2e-16 ***
## parKat4       -0.66943    0.02726 -24.562 < 2e-16 ***
## racecroisée    0.17727    0.05939   2.985 0.00284 **
## raceNontbeliarde 0.56799    0.06355   8.938 < 2e-16 ***
## raceNormande   0.37419    0.04731   7.910 2.58e-15 ***
## raceother      0.96529    0.20948   4.608 4.06e-06 ***
## milk_early_max_scaled_p1 1.42528    0.03216  44.319 < 2e-16 ***
## milk_early_max_scaled_p2 0.70176    0.02367  29.645 < 2e-16 ***
## milk_early_max_scaled_p3 0.57855    0.02314  25.006 < 2e-16 ***
## milk_early_max_scaled_p4 0.54079    0.01695  31.910 < 2e-16 ***
## mast_catidpHigh_cont -1.31550    0.03443 -38.208 < 2e-16 ***
## mast_catidpHigh_env -1.00106    0.03470 -28.850 < 2e-16 ***
## mast_catidpHigh_healthy -0.29422    0.02905 -10.127 < 2e-16 ***
## mast_catidpLow_cont -0.04229    0.04278 -19.690 < 2e-16 ***
## mast_catidpLow_env -0.56444    0.03615 -15.615 < 2e-16 ***
## mast_catidprimi_cont -0.70548    0.05954 -11.850 < 2e-16 ***
## mast_catidprimi_env -0.51940    0.04714 -11.019 < 2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Annexe 2 : Résumé de la régression Logistique pour la décision de mise à la reproduction

```

## Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace
## Approximation) [glmerMod]
## Family: binomial ( logit )
## Formula:
## success_ai1 ~ parKat + milk_early_max_scaled_p1 + milk_early_max_scaled_p2 +
##   milk_early_max_scaled_p3 + milk_early_max_scaled_p4 + mast_cat1 +
##   race + (1 | herd_id)
## Data: lac
## Subset: n_ctrl_early > 0 & repro == 1 & dp_mis == 0
##
##      AIC      BIC logLik deviance df.resid
## 136822.7 137014.7 -68391.3 136782.7   109236
##
## Scaled residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -1.3291 -0.7528 -0.5996  1.1518  3.5175
##
## Random effects:
## Groups Name          Variance Std.Dev.
## herd_id (Intercept) 0.4483   0.6696
## Number of obs: 109256, groups: herd_id, 231
##
## Fixed effects:
##              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
## (Intercept)    -1.088522   0.055533 -19.601 < 2e-16 ***
## parKat1         0.156360   0.026634  5.871 4.34e-09 ***
## parKat2         0.054547   0.022079  2.471 0.013489 *
## parKat4        -0.214663   0.024246 -8.854 < 2e-16 ***
## milk_early_max_scaled_p1 0.042881   0.017801  2.409 0.016000 *
## milk_early_max_scaled_p2 -0.076550   0.015703 -4.875 1.09e-06 ***
## milk_early_max_scaled_p3 -0.099593   0.018195 -5.474 4.41e-08 ***
## milk_early_max_scaled_p4 -0.014781   0.016713 -0.884 0.376492
## mast_cat1dpHigh_cont -0.219934   0.036669 -5.998 2.00e-09 ***
## mast_cat1dpHigh_env  -0.126512   0.033490 -3.778 0.000158 ***
## mast_cat1dpHigh_healthy -0.042215   0.021347 -1.978 0.047983 *
## mast_cat1dpLow_cont  -0.130331   0.039117 -3.332 0.000863 ***
## mast_cat1dpLow_env   -0.087497   0.029111 -3.006 0.002650 **
## mast_cat1primi_cont  -0.076375   0.038300 -1.994 0.046137 *
## mast_cat1primi_env    0.000111   0.028000  0.004 0.996836
## racecroisée         0.282596   0.043638  6.476 9.42e-11 ***
## raceNontbeliarde    0.381790   0.047172  8.093 5.80e-16 ***
## raceNormande        0.309099   0.037549  8.232 < 2e-16 ***
## raceother           0.035064   0.121119  0.290 0.772196
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Annexe 3 : Résumé de la régression logistique pour la réussite à la première IA


```

## Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace
## Approximation) [glmerMod]
## Family: poisson ( log )
## Formula: n_ai ~ parkat + milk_early_max_scaled_p1 + milk_early_max_scaled_p2 +
##   milk_early_max_scaled_p3 + milk_early_max_scaled_p4 + mast_cat1 +
##   race + (1 | herd_id)
## Data: lac
## Subset: !is.na(n_ai) & n_ai > 0 & dp_mis == 0
##
##      AIC      BIC    logLik deviance df.resid
## 378281.1 378473.1 -189120.5 378241.1  109236
##
## Scaled residuals:
##   Min      1Q  Median      3Q      Max
## -2.1910 -0.7133 -0.3737  0.3876 18.6096
##
## Random effects:
## Groups Name          Variance Std.Dev.
## herd_id (Intercept) 0.06973  0.2641
## Number of obs: 109256, groups: herd_id, 231
##
## Fixed effects:
##              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
## (Intercept)      0.877424   0.020338  43.142 < 2e-16 ***
## parkat1          0.086330   0.008415  10.259 < 2e-16 ***
## parkat2          0.033185   0.007132   4.653 3.27e-06 ***
## parkat4          0.002565   0.007806   0.329 0.742460
## milk_early_max_scaled_p1 0.048037   0.005513   8.713 < 2e-16 ***
## milk_early_max_scaled_p2 0.047876   0.004826   9.920 < 2e-16 ***
## milk_early_max_scaled_p3 0.052990   0.005569   9.515 < 2e-16 ***
## milk_early_max_scaled_p4 0.040758   0.005117   7.966 1.64e-15 ***
## mast_cat1dpHigh_cont -0.065316   0.011582  -5.640 1.70e-08 ***
## mast_cat1dpHigh_env -0.034867   0.010436  -3.341 0.000834 ***
## mast_cat1dpHigh_healthy 0.009390   0.006633   1.416 0.156902
## mast_cat1dpLow_cont -0.063298   0.012558  -5.040 4.64e-07 ***
## mast_cat1dpLow_env -0.030442   0.009084  -3.351 0.000805 ***
## mast_cat1primi_cont -0.015511   0.012205  -1.271 0.203772
## mast_cat1primi_env -0.013498   0.008832  -1.528 0.126422
## racecroisée      -0.078050   0.013799  -5.656 1.55e-08 ***
## raceMontbeliarde -0.089191   0.016471  -5.415 6.13e-08 ***
## raceNormande     -0.110321   0.011320  -9.745 < 2e-16 ***
## raceother        0.081705   0.037726   2.166 0.030330 *
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Annexe 4 : Résumé de la régression de poisson pour le nombre d'inséminations

```

## Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace
## Approximation) [glmerMod]
## Family: binomial ( logit )
## Formula:
## repro_revel ~ parkat + milk_early_max_scaled_p1 + milk_early_max_scaled_p2 +
##   milk_early_max_scaled_p3 + milk_early_max_scaled_p4 + mast_cat1 +
##   n_ai + (1 | herd_id)
## Data: lac
## Subset: n_ctrl_early > 0 & repro == 1 & dp_mis == 0
##
##      AIC      BIC   logLik deviance df.resid
## 127710.6 127873.8 -63838.3 127676.6   109393
##
## Scaled residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -4.5723 -0.9673  0.5066  0.6719 25.7026
##
## Random effects:
## Groups Name          Variance Std.Dev.
## herd_id (Intercept) 0.805    0.8972
## Number of obs: 109410, groups: herd_id, 231
##
## Fixed effects:
##              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
## (Intercept)      1.132957    0.064606  17.536 < 2e-16 ***
## parkat1           0.550561    0.028553  19.282 < 2e-16 ***
## parkat2           0.166536    0.023107   7.207 5.71e-13 ***
## parkat4          -0.309494    0.024454 -12.656 < 2e-16 ***
## milk_early_max_scaled_p1 0.321148    0.019443  16.517 < 2e-16 ***
## milk_early_max_scaled_p2 0.138027    0.016189   8.526 < 2e-16 ***
## milk_early_max_scaled_p3 0.059953    0.018145   3.304 0.000953 ***
## milk_early_max_scaled_p4 0.144737    0.016007   8.997 < 2e-16 ***
## mast_cat1dpHigh_cont -0.469353    0.034961 -13.425 < 2e-16 ***
## mast_cat1dpHigh_env -0.235397    0.032912  -7.152 8.54e-13 ***
## mast_cat1dpHigh_healthy -0.051686    0.021820  -2.369 0.017850 *
## mast_cat1dpLow_cont -0.388654    0.038359 -10.132 < 2e-16 ***
## mast_cat1dpLow_env -0.184467    0.029296  -6.297 3.04e-10 ***
## mast_cat1primi_cont -0.126676    0.041804  -3.030 0.002443 **
## mast_cat1primi_env  0.015218    0.031325   0.486 0.627096
## n_ai             -0.347391    0.004551 -76.326 < 2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Annexe 5 : Résumé de la régression logistique pour la probabilité de vèler à nouveau

```

## Linear mixed model fit by REML ['lmerMod']
## Formula: milk ~ dim + mast_cat1 + dim * mast_cat1 + parKat + race + (1 |
##   herd_id)
##   Data: rec_lac
##   Subset: dp_mis == 0
##
## REML criterion at convergence: 833814
##
## Scaled residuals:
##   Min      1Q  Median      3Q      Max
## -5.2934 -0.6041  0.0189  0.6297  5.7862
##
## Random effects:
##   Groups Name          Variance Std.Dev.
##   herd_id (Intercept)  8.718   2.953
##   Residual              32.742   5.722
## Number of obs: 131611, groups: herd_id, 231
##
## Fixed effects:
##
##              Estimate Std. Error t value
## (Intercept)      32.355104   0.269391 120.104
## dim                0.094249   0.006915  13.630
## mast_cat1dpHigh_env -0.154957   0.239660  -0.647
## mast_cat1dpHigh_healthy 1.301004   0.202567   6.423
## mast_cat1dpLow_cont  0.478998   0.267100   1.793
## mast_cat1dpLow_env  0.152785   0.229090   0.667
## mast_cat1dpLow_healthy 1.289202   0.187407   6.879
## mast_cat1primi_cont -8.231007   0.273447 -30.101
## mast_cat1primi_env -9.011767   0.228165 -39.497
## mast_cat1primi_healthy -8.072522   0.195783 -41.232
## parKat2           -2.374157   0.049531 -47.933
## parKat4            0.335128   0.050347   6.656
## raceAutre         -6.318724   0.242463 -26.061
## raceCroisée       -1.527844   0.105754 -14.447
## raceMontbéliarde -3.547469   0.126687 -28.002
## raceNormande      -6.107310   0.087149 -70.079
## dim:mast_cat1dpHigh_env  0.038049   0.009595   3.966
## dim:mast_cat1dpHigh_healthy 0.012819   0.008098   1.583
## dim:mast_cat1dpLow_cont  0.002842   0.010810   0.263
## dim:mast_cat1dpLow_env  0.036676   0.009188   3.992
## dim:mast_cat1dpLow_healthy 0.016550   0.007492   2.209
## dim:mast_cat1primi_cont  0.009835   0.010963   0.897
## dim:mast_cat1primi_env  0.034366   0.009126   3.766
## dim:mast_cat1primi_healthy 0.014046   0.007703   1.824

```

Annexe 6 : Résumé de la régression linéaire pour la PL

```

Call:
coxph(formula = Surv(time, death) ~ parKat + mast_cat1, data = lac,
      subset = n_ctrl_early > 0 & dp_mis == 0)

n= 125482, number of events= 2543
(258 observations effacées parce que manquantes)

              coef exp(coef) se(coef)      z Pr(>|z|)
parKat2      -0.025482  0.974840  0.106234 -0.240 0.810434
parKat3       0.151395  1.163456  0.105401  1.436 0.150898
parKat4       0.350711  1.420077  0.097769  3.587 0.000334 ***
mast_cat1dpHigh_env  0.403945  1.497722  0.109249  3.697 0.000218 ***
mast_cat1dpHigh_healthy 0.086602  1.090463  0.098268  0.881 0.378166
mast_cat1dpLow_cont -0.203947  0.815506  0.144618 -1.410 0.158467
mast_cat1dpLow_env  0.127266  1.135719  0.113755  1.119 0.263234
mast_cat1dpLow_healthy -0.009481  0.990564  0.094175 -0.101 0.919810
mast_cat1primi_cont -0.195209  0.822663  0.138463 -1.410 0.158590
mast_cat1primi_env  0.126747  1.135130  0.090882  1.395 0.163129
mast_cat1primi_healthy NA          NA  0.000000  NA      NA
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

              exp(coef) exp(-coef) lower .95 upper .95
parKat2          0.9748      1.0258      0.7916      1.200
parKat3          1.1635      0.8595      0.9463      1.430
parKat4          1.4201      0.7042      1.1724      1.720
mast_cat1dpHigh_env  1.4977      0.6677      1.2090      1.855
mast_cat1dpHigh_healthy 1.0905      0.9170      0.8994      1.322
mast_cat1dpLow_cont  0.8155      1.2262      0.6142      1.083
mast_cat1dpLow_env  1.1357      0.8805      0.9087      1.419
mast_cat1dpLow_healthy 0.9906      1.0095      0.8236      1.191
mast_cat1primi_cont  0.8227      1.2156      0.6271      1.079
mast_cat1primi_env  1.1351      0.8810      0.9499      1.356
mast_cat1primi_healthy NA          NA          NA          NA

Concordance= 0.556 (se = 0.006 )
Likelihood ratio test= 122 on 10 df,  p=<2e-16
Wald test              = 129.1 on 10 df,  p=<2e-16
Score (logrank) test = 131.4 on 10 df,  p=<2e-16

```

Annexe 7 : Résumé de la régression de Cox

```

Formula:
infct_end_lac ~ parKat + milk_early_max_scaled_p1 + milk_early_max_scaled_p2
  milk_early_max_scaled_p3 + milk_early_max_scaled_p4 + mast_cat1 +
  race + (1 | herd_id)
Data: lac
Control: glmerControl(optimizer = "bobyqa", optCtrl = list(maxfun = 2e+05))
Subset: n_ctrl_early > 0 & repro == 1 & dp_mis == 0 & !is.na(infct_end_lac)

      AIC      BIC  logLik deviance df.resid
81034.9 81218.8 -40497.5 80994.9   72502

Scaled residuals:
   Min       1Q   Median       3Q      Max
-4.2907 -0.6401 -0.4389  0.7763  3.9057

Random effects:
 Groups Name      Variance Std.Dev.
herd_id (Intercept) 0.1678   0.4096
Number of obs: 72522, groups: herd_id, 217

Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)      1.53687    0.07217  21.295 < 2e-16 ***
parKat1          -3.10060    0.06543 -47.389 < 2e-16 ***
parKat2          -0.41390    0.02825 -14.653 < 2e-16 ***
parKat4           0.36276    0.03119  11.629 < 2e-16 ***
milk_early_max_scaled_p1 0.06812    0.02462  2.766 0.00567 **
milk_early_max_scaled_p2 0.12909    0.02045  6.312 2.75e-10 ***
milk_early_max_scaled_p3 0.13277    0.02288  5.802 6.57e-09 ***
milk_early_max_scaled_p4 0.03844    0.02188  1.756 0.07901 .
mast_cat1dpHigh_env  -0.79243    0.06962 -11.382 < 2e-16 ***
mast_cat1dpHigh_healthy -1.41795    0.06054 -23.421 < 2e-16 ***
mast_cat1dpLow_cont  -0.89009    0.07415 -12.005 < 2e-16 ***
mast_cat1dpLow_env   -1.73070    0.06528 -26.512 < 2e-16 ***
mast_cat1dpLow_healthy -2.35085    0.05896 -39.871 < 2e-16 ***
mast_cat1primi_cont  2.03069    0.04718 43.039 < 2e-16 ***
mast_cat1primi_env    0.91859    0.03563 25.779 < 2e-16 ***
racecroisée         0.02811    0.05512  0.510 0.61008
raceMontbeliarde   -0.24388    0.04961 -4.916 8.85e-07 ***
raceNormande        0.33501    0.04510  7.428 1.10e-13 ***
raceother           -0.44490    0.15899 -2.798 0.00514 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Correlation matrix not shown by default, as p = 19 > 12.
Use print(x, correlation=TRUE) or
vcov(x)      if you need it

fit warnings:
fixed-effect model matrix is rank deficient so dropping 1 column / coefficient

```

Annexe 8 : Résumé de la régression logistique pour la probabilité d'avoir une CCS avant le tarissement

```

Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace
Approximation) [glmerMod]
Family: binomial ( logit )
Formula:
nxt_cure ~ parKat + milk_early_max_scaled_p1 + milk_early_max_scaled_p2 +
  milk_early_max_scaled_p3 + milk_early_max_scaled_p4 + mast_cat1 +
  race + (1 | herd_id)
Data: lac
Control: glmerControl(optimizer = "bobyqa", optCtrl = list(maxfun = 2e+05))
Subset: n_ctrl_early > 0 & repro == 1 & dp_mis == 0 & !is.na(nxt_cure)

```

```

      AIC      BIC  logLik deviance df.resid
28919.4 29082.9 -14439.7 28879.4   26190

```

Scaled residuals:

```

      Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.0347 -0.9001  0.4839  0.5942  1.9300

```

Random effects:

```

Groups Name      Variance Std.Dev.
herd_id (Intercept) 0.1292  0.3594
Number of obs: 26210, groups: herd_id, 216

```

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	0.04405	0.07181	0.613	0.539558
parKat1	1.43977	0.07780	18.506	< 2e-16 ***
parKat2	0.08902	0.04734	1.880	0.060065 .
parKat4	-0.14378	0.04604	-3.123	0.001793 **
milk_early_max_scaled_p1	-0.02619	0.04717	-0.555	0.578745
milk_early_max_scaled_p2	-0.06206	0.03545	-1.751	0.079961 .
milk_early_max_scaled_p3	-0.12173	0.03496	-3.482	0.000497 ***
milk_early_max_scaled_p4	-0.06799	0.02976	-2.284	0.022342 *
mast_cat1dpHigh_env	0.63699	0.06394	9.963	< 2e-16 ***
mast_cat1dpHigh_healthy	1.12081	0.05554	20.181	< 2e-16 ***
mast_cat1dpLow_cont	0.29907	0.07312	4.090	4.32e-05 ***
mast_cat1dpLow_env	0.90374	0.06977	12.953	< 2e-16 ***
mast_cat1dpLow_healthy	1.33406	0.05605	23.800	< 2e-16 ***
mast_cat1primi_cont	-0.51229	0.07454	-6.873	6.29e-12 ***
mast_cat1primi_env	-0.08962	0.07507	-1.194	0.232537
racecroisée	-0.21169	0.08693	-2.435	0.014882 *
raceMontbeliarde	0.16726	0.06242	2.680	0.007373 **
raceNormande	-0.10992	0.06505	-1.690	0.091072 .
raceother	-0.14698	0.25885	-0.568	0.570168

```

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Correlation matrix not shown by default, as p = 19 > 12.

```

Use print(x, correlation=TRUE) or
vcov(x)      if you need it

```

fit warnings:

```

fixed-effect model matrix is rank deficient so dropping 1 column / coefficient

```

Annexe 9 : Résumé de la régression logistique pour la probabilité de guérison pendant le tarissement.

```

Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace
Approximation) [glmerMod]
Family: binomial ( logit )
Formula:
nxt_ninf ~ parKat + milk_early_max_scaled_p1 + milk_early_max_scaled_p2 +
  milk_early_max_scaled_p3 + milk_early_max_scaled_p4 + mast_cat1 +
  race + (1 | herd_id)
Data: lac
Control: glmerControl(optimizer = "bobyqa", optCtrl = list(maxfun = 2e+05))
Subset: n_ctrl_early > 0 & repro == 1 & dp_mis == 0 & !is.na(nxt_ninf)

      AIC      BIC  logLik deviance df.resid
37024.3 37199.1 -18492.1 36984.3   46292

Scaled residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.2732 -0.4304 -0.3590 -0.3004  4.2712

Random effects:
  Groups Name      Variance Std.Dev.
herd_id (Intercept) 0.1371   0.3703
Number of obs: 46312, groups: herd_id, 217

Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)    -0.572949   0.121716  -4.707 2.51e-06 ***
parKat1        -1.492597   0.118785 -12.566 < 2e-16 ***
parKat2         -0.135784   0.046930  -2.893 0.00381 **
parKat4         0.268940   0.054254   4.957 7.16e-07 ***
milk_early_max_scaled_p1 0.016035   0.035737   0.449 0.65365
milk_early_max_scaled_p2 0.031969   0.031685   1.009 0.31298
milk_early_max_scaled_p3 0.076691   0.038393   1.998 0.04577 *
milk_early_max_scaled_p4 0.009739   0.037429   0.260 0.79470
mast_cat1dpHigh_env    -0.391544   0.131031  -2.988 0.00281 **
mast_cat1dpHigh_healthy -0.891719   0.115024  -7.752 9.01e-15 ***
mast_cat1dpLow_cont    -0.278877   0.135735  -2.055 0.03992 *
mast_cat1dpLow_env     -0.691355   0.119211  -5.799 6.66e-09 ***
mast_cat1dpLow_healthy -1.169687   0.110757 -10.561 < 2e-16 ***
mast_cat1primi_cont     0.936603   0.082434  11.362 < 2e-16 ***
mast_cat1primi_env      0.469918   0.053923   8.715 < 2e-16 ***
racecroisée           0.094571   0.082937   1.140 0.25417
raceMontbeliarde     -0.175405   0.059695  -2.938 0.00330 **
raceNormande          0.044793   0.065224   0.687 0.49224
raceother             -0.209075   0.237635  -0.880 0.37896
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Correlation matrix not shown by default, as p = 19 > 12.
Use print(x, correlation=TRUE) or
  vcov(x)      if you need it

fit warnings:
fixed-effect model matrix is rank deficient so dropping 1 column / coefficient

```

Annexe 10 : Résumé de la régression logistique pour la probabilité de nouvelle infection

Araujo Joanna

Étude des relations entre mammites en début de lactation, réformes et dynamique des concentrations en cellules somatiques pendant la période tarie.

Study of the relationships between early lactation mastitis, culling and the dynamics of somatic cell counts during the dry period.

Thèse d'État de Doctorat Vétérinaire : Nantes, le 17 octobre 2024

RESUME :

Cette étude analyse l'impact des mammites sur la longévité des vaches laitières en modélisant les décisions de réforme et leur effet sur la dynamique des infections intramammaires. À partir d'un échantillon de 252 977 vaches et de plus de 3,8 millions de contrôles laitiers, l'étude montre que les vaches présentant des concentrations en cellules somatiques (CCS) élevées en début de lactation ont une probabilité réduite d'être remises à la reproduction ainsi qu'une probabilité de guérison au tarissement plus faible et une probabilité de nouvelle infection plus élevée. Plusieurs scénarios contrefactuels sont testés, notamment la prévention des mammites à réservoir mammaire et l'impact de la réforme des vaches infectées sur les dynamiques de CCS et la production laitière. Les résultats indiquent que la réforme des vaches à mammite à réservoir mammaire n'améliore pas toujours les taux d'infection ou la production laitière, suggérant que les décisions de réforme basées sur les mammites nécessitent une gestion fine pour maximiser les bénéfices sanitaires et économiques. Ces analyses contribuent à une meilleure compréhension des facteurs influençant la réforme en élevage laitier et la gestion des mammites au niveau du troupeau.

MOTS CLES :

- VACHE LAITIERE
- MAMMITE
- LONGEVITE
- REFORME
- PRIMIPARE
- MULTIPARE
- COMPTAGE DE CELLULES SOMATIQUES (employé pour CCS)
- METHODE STATISTIQUE
- ANALYSE DE REGRESSION
- CALCUL DES PROBABILITES
- REGRESSION LINEAIRE
- MODELE LINEAIRE MIXTE

DATE DE SOUTENANCE : 17 octobre 2024

