



<http://portaildoc.univ-lyon1.fr>

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2025 - Thèse n° 145

CRITERES DE REUSSITE LORS DE TRANSFERTS EMBRYONNAIRES BOVINS : ANALYSE DES DONNEES RELATIVES AUX VACHES RECEVEUSES ISSUES DE PLUSIEURS CENTRES DE TRANSFERT

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 12 décembre 2025
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

BOUCARD Lucine

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2025 - Thèse n° 145

CRITERES DE REUSSITE LORS DE TRANSFERTS EMBRYONNAIRES BOVINS :
ANALYSE DES DONNEES RELATIVES AUX VACHES RECEVEUSES ISSUES DE
PLUSIEURS CENTRES DE TRANSFERT

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 12 décembre 2025
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

BOUCARD Lucine

Liste des enseignants

Liste des Enseignants-Chercheurs du campus vétérinaire de VETAGRO SUP au 20-11-2025

ABITBOL	Marie	Professeur
ALVES DE OLIVEIRA	Laurent	Maître de conférences
ARCANGIOLI	Marie-Anne	Professeur
AYRAL	Florence	Maître de conférences
BARRETT	Laura	Maître de conférences
BECKER	Claire	Professeur
BELLUCO	Sara	Professeur
BENAMOU – SMITH	Agnès	Maître de conférences
BERNY	Philippe	Professeur
BLONDEL	Margaux	Maître de conférences
BONNET	Jeanne-Marie	Professeur Émérite
BOURGOIN	Gilles	Maître de conférences
BRASSARD	Colline	Maître de conférences
BRUTO	Maxime	Maître de conférences
BRUYERE	Pierre	Professeur
BUFF	Samuel	Professeur
BURONFOSSE	Thierry	Professeur
CACHON	Thibaut	Maître de conférence
CADORE	Jean-Luc	Professeur Émérite
CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	Professeur
CANNON	Leah	Maître de conférences
CHABANNE	Luc	Professeur
CHALVET-MONFRAY	Karine	Professeur
CHANOIT	Guillaume	Professeur
CHETOT	Thomas	Maître de conférences
DE BOYER DES ROCHES	Alice	Professeur
DEIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	Professeur
DJELOUADJI	Zorée	Professeur
ESCRIOU	Catherine	Maître de conférences
GALIA	Wessam	Maître de conférences
GILLET	Benoit	Maître de conférences
GILOT	Emmanuelle	Professeur
GONTHIER	Alain	Maître de conférences
HUGONNARD	Marine	Maître de conférences
HUMBERT	Alexandre	Maître de conférences Stagiaire
JUNOT	Stéphane	Professeur
KHOSH NEVIS	Mehrdad	Maître de conférences
KIM	Mark	Maître de conférences Stagiaire
KODJO	Angeli	Professeur
KRAFT	Émilie	Maître de conférences
LAABERKI	Maria-Halima	Professeur
LE GRAND	Dominique	Professeur
LEBLOND	Agnès	Professeur
LEDOUX	Dorothée	Maître de conférences
LEFEBVRE	Sébastien	Maître de conférences
LEGROS	Vincent	Maître de conférences

LEPAGE	Olivier	Professeur
LOUZIER	Vanessa	Professeur
LURIER	Thibaut	Maître de conférences
MAGNIN	Mathieu	Maître de conférences
MARCHAL	Thierry	Professeur
MOSCA	Marion	Maître de conférences
MOUNIER	Luc	Professeur
PEROZ	Carole	Maître de conférences
PIN	Didier	Professeur
PONCE	Frédérique	Professeur
PORPHYRE	Thibaud	Professeur Stagiaire
PORSMOQUER	Charles	Maître de conférences Stagiaire
PORTIER	Karine	Professeur
POUZOT-NEVORET	Céline	Professeur
PROUILLAC	Caroline	Professeur
RACHED	Antoine	Maître de conférences
REMY	Denise	Professeur
RENE-MARTELLET	Magalie	Maître de conférences
ROGER	Thierry	Professeur
SAWAYA	Serge	Maître de conférences
SCHRAMME	Michaël	Professeur
SERGEANTET	Delphine	Professeur
STORCK	Fanny	Professeur
TORTEREAU	Antonin	Maître de conférences
VICTONI	Tatiana	Maître de conférences
ZENNER	Lionel	Professeur

Remerciements au jury

À la présidente de jury, **Professeure Claire BECKER**,
De VetAgroSup, Campus vétérinaire de Lyon,
Qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de mon Jury de thèse,
Pour votre disponibilité et votre bienveillance.

Hommages respectueux

Au Professeur **BRUYÈRE Pierre**,
Professeur à VetAgroSup, Campus vétérinaire de Lyon,
Pour avoir accepté d'encadrer ce travail, pour votre enthousiasme, vos conseils et
votre implication indispensable à l'aboutissement de ce travail.

Mes plus sincères remerciements

À la Professeure **CHALVET-MONFRAY Karine**,
Professeure à VetAgroSup, Campus vétérinaire de Lyon,
Pour votre accompagnement et vos précieux conseils dans l'élaboration de ce travail.

Remerciements chaleureux.

Table des matières

Liste des annexes	11
Liste des figures	13
Liste des tableaux	15
Liste des abréviations	17
Introduction	19
Partie 1.....	21
Analyse bibliographique	21
I. Le cycle œstral des bovins	21
1. Les modifications cycliques de l’ovaire	21
a. Anatomie de l’ovaire (Bonnes et al., 2013).....	21
b. L’activité ovarienne avant l’ovulation	22
(1) Les différents stades de follicules	22
(2) La folliculogenèse.....	23
c. L’ovulation.....	24
d. L’activité ovarienne après l’ovulation	25
2. Les hormones en jeu	25
a. Les Hormones hypothalamo-hypophysaire	25
(1) GnRH	25
(2) FSH	26
(3) LH	26
b. Les hormones ovariennes	26
(1) Œstrogènes	26
(2) Progestérone.....	26
c. Les prostaglandines.....	27
d. Régulations hormonales	27
(1) Lors de la phase lutéale.....	28
(2) Lors de la phase folliculaire	28
3. Fécondation, développement embryonnaire précoce et reconnaissance maternelle de l’embryon.....	29
II. Obtention d’un embryon prêt à être implanté.....	31
1. Du protocole de superovulation à la collecte des embryons	31
a. Le protocole de super-ovulation	31
(1) Les hormones utilisées	31
(2) Le protocole de superovulation	32
b. La collecte des embryons	33

2.	Évaluation de l'embryon.....	35
a.	Stade de développement de l'embryon.....	35
b.	Qualité de l'embryon	36
c.	Influence du stade de développement et de la qualité des embryons sur les taux de gestation.	37
3.	Conservation des embryons (cryoconservation)	39
a.	La cryoconservation des embryons (Hanzen, 2008)	39
b.	Impact du type d'embryon transféré sur les taux de gestation	40
III.	Préparer une receveuse pour un transfert d'embryon	40
1.	Les facteurs liés à l'animal receveur.....	41
a.	La parité	41
(1)	La production laitière	42
(2)	Les affections péri-partum	42
b.	Race.....	42
c.	Cyclicité et synchronisation.....	42
(1)	Sélection des receveuses à synchroniser	43
(2)	Protocoles hormonaux de synchronisation	44
(a)	Objectifs des protocoles de synchronisation	44
(i)	Utilisation de la GnRH	44
(ii)	Utilisation de la PGF2 α	44
(iii)	Utilisation des implants de progestérone	45
(b)	Les différents protocoles.....	45
(2)	Synchronisation entre donneuse et receveuse.....	50
(3)	Manifestation des chaleurs.....	50
(4)	Le corps jaune : une structure à évaluer.....	51
(a)	Cas particuliers des corps jaunes cavitaires	52
(b)	Perfusion lutéale et image échographique	53
(c)	Conclusion sur les corps jaunes	54
(5)	Concentration plasmatique de progestérone	55
2.	Les facteurs liés à la conduite d'élevage	56
a.	Alimentation et besoins des receveuses.....	56
(1)	Poids, score corporel des receveuses et gain de poids moyen quotidien.....	57
(2)	La couverture des besoins alimentaires des receveuses	59
(a)	Les besoins en eau	59
(b)	Les besoins en constituants de la ration des receveuses.....	60
(i)	Les besoins en énergie	60

1.	Niveau énergétique de la ration	61
2.	Source d'énergie de la ration	62
(ii)	Les besoins en protéines	63
1.	Déficit azoté	63
2.	Excès de protéines	64
(iii)	Les besoins en minéraux et vitamines	64
1.	Les macro-éléments	64
2.	Les microéléments ou oligo-éléments	66
3.	Les besoins en vitamines.....	68
4.	Flushing et complémentation	71
(3)	Mise en place de la ration des receveuses.....	72
b.	Gestion sanitaire de l'élevage	72
3.	Les facteurs liés à l'environnement.....	73
a.	Impact de la saison.....	73
(1)	L'été et son impact sur les taux de gestation.....	73
(2)	L'index de température-humidité (THI)	74
(a)	Concept de zone de confort :	74
b.	Localisation de l'élevage	76
IV.	Optimiser le transfert	76
Partie 2.....		79
Analyses statistiques des données		79
I.	Matériel et méthodes	79
1.	Origine des données.....	79
2.	Harmonisation des données et variables explicatives utilisées.....	79
3.	Choix des modalités.....	81
4.	Analyses statistiques	82
a.	Description de l'échantillon	82
b.	Coefficients de corrélation	83
c.	Analyse des correspondances multiples (ACM) :	83
d.	Régression logistique :	84
II.	Résultats	86
1.	Analyse descriptive de la population.....	87
a.	Résultats de gestation globaux de l'étude	87
b.	Facteurs modulables, susceptibles d'influencer les performances de gestation.....	88
(1)	Le type d'embryon (frais ou congelé) utilisé :	88
(2)	La parité et le rang de vêlage de la receveuse	88

(3) La race de la receveuse	91
(4) Saison de collecte et de pose de l'embryon.....	92
c. Paramètres non ajustables ayant un impact sur le succès de gestation.....	94
(1) Année de collecte et de pose des embryons :	94
(2) Région des receveuses	96
2. Recherche de corrélation dans les variables	99
a. Variables ordinales : parité et rang de vêlage	99
b. Variables non ordinales.....	100
3. Analyses des correspondances multiples	101
4. Régression logistique.....	103
a. Résultats bruts	104
b. Implications pratiques de ce modèle	106
c. Vérification du pouvoir explicatif et de la fiabilité du modèle	107
d. Conclusion sur le pouvoir explicatif et la fiabilité du modèle	109
III. Discussions	110
1. Discussion des résultats.....	110
a. Facteurs modifiables et impactant les taux de gestation	110
b. Facteurs non modifiables et impactant les taux de gestation	115
2. Critiques des méthodes statistiques	117
a. Justification des méthodes employées	117
b. Divergence entre les analyses descriptives et explicatives.....	118
c. Divergence entre l'ACM et la régression logistique	118
3. Limites générales de l'étude.....	118
4. Perspectives et recommandations	119
Conclusion	121
Bibliographie.....	123
Annexes	133

Liste des annexes

Annexe 1 : Grille de notation de l'état corporel des bovins (NEC).....	133
Annexe 2 : Besoins, en énergie, protéines, phosphore et calcium des génisses laitières (d'après Agabriel, 2010).....	134
Annexe 3 : Besoins en énergie, protéines, calcium et phosphore, des génisses allaitantes, d'après (Agabriel 2010)	135
Annexe 4 : Besoins en énergie, protéines et calcium, phosphore des vaches laitières, d'après (Delaby, Nozière, Sauvant 2018).....	136
Annexe 5 : Valeurs d'Indice de Température et d'Humidité selon l'humidité et la température selon (d'après Collier et al. 2012).....	137

Liste des figures

Figure 1 : Schéma des structures d'une coupe d'ovaire, Source : BOUCARD Lucine	22
Figure 2 : Schéma des différents stades folliculaires de l'ovaire de la vache (d'après Huang et al. 2008)	23
Figure 3 : Trois vagues se succédant dans un cycle chez les bovins. Chaque vague correspond à la succession d'une phase de recrutement, de sélection et de dominance (Source : Adams & Singh, 2021)	24
Figure 4 : Contrôle hormonal et vagues folliculaires au cours du cycle sexuel femelle chez les bovins (Source : Forde et al., 2011)	27
Figure 5 : Régulation hormonale lors de la phase lutéale. Source : BOUCARD Lucine	28
Figure 6 : Régulation hormonale lors de la phase folliculaire. Source : BOUCARD Lucine	29
Figure 7 : illustration du protocole de superovulation utilisé par Umotest. Source : BOUCARD Lucine	33
Figure 8 : Sonde à 3 voies pour aspiration et collecte des embryons. Source : BOUCARD Lucine	33
Figure 9 : Sonde de Folley. Source : BOUCARD Lucine	34
Figure 10 : Sonde à trois voies. Source : BOUCARD Lucine	34
Figure 11 : Filtration des embryons dans un filtre lors du passage du liquide de collecte par ce filtre. Source : BOUCARD Lucine	34
Figure 12 : Comparaison des taux de gestation selon les embryons produits in vitro ou in vivo et selon s'ils sont transférés frais (F), congelés (Fz) ou vitrifiés (V) Source : Hansen 2020.	40
Figure 13 : Représentation du nombre de gestation selon la cyclicité des animaux sélectionnés pour un transfert embryonnaire. Source : Stroud, Hasler 2006	43
Figure 14 : Protocole nécessitant une unique injection de PGF2 α . Source : Kesler, 2005	45
Figure 15 : Protocole nécessitant une injection de PGF2 α . et l'utilisation d'un implant. Source : Karisch & Parish, 2024	45
Figure 16 : Protocole Select Synch. Source : Kesler, 2005	46
Figure 17 : Protocole Select Synch et utilisation d'un implant. Source : Karisch & Parish, 2024	46
Figure 18 : Protocole CO-Synch ou OV-Synch. Source : Kesler, 2005	47
Figure 19 : Protocole CO-Synch avec implant. Source : Karisch & Parish, 2024	47
Figure 20 : représentation graphique des deux protocoles, d'après (Bonacker et al. 2020	48
Figure 21 : image échographique d'un corps jaune cavitare, d'après (Julia, Taveau 2013).	53
Figure 22 : représentation des différents seuils de perfusion sanguine d'un corps jaune. Source : Pugliesi et al., 2018	54
Figure 23 : répartition de la priorité des besoins des mammifères domestiques, d'après (Lamb, Mercadante 2014).	56
Figure 24 : Courbes d'évolution du poids vif des génisses en fonction de l'âge au vêlage, d'après Jussiau et Papet (2015).	58
Figure 25 : Taux de gestation et d'avortement en fonction de la saison et de la technique utilisée (Baruselli et al. 2011).	74
Figure 26 : Répartition du résultat de gestation	87
Figure 27 : Répartition des gestations selon le type d'embryon	88
Figure 28 : Répartitions des gestations selon la parité de la receveuse	89
Figure 29 : Résultat de gestation selon le rang de lactation	90
Figure 30 : Répartition de gestation selon la race de la receveuse	91
Figure 31 : Résultat de gestation selon la saison de collecte de l'embryon	93

Figure 32 : Résultat de gestation selon la saison de collecte de l'embryon	94
Figure 33 : Résultat de gestation selon l'année de collecte de l'embryon, en fonction du nombre de receveuses par catégorie.....	95
Figure 34 : Résultat de gestation selon l'année de pose de l'embryon, selon le nombre de receveuse par catégorie.....	96
Figure 35 : Résultat de gestation selon la région de la receveuse, représenté selon le nombre de candidates par catégorie.	97
Figure 36 : Barplot associé à l'analyse en composante multiples, représentant la contribution des différents axes à chacune des dimensions (exprimé en pourcentage).....	101
Figure 37 : représentation de l'analyse des correspondances multiples en fonction des 2 premières dimensions, avec représentation des modalités selon les variables explicatives	102
Figure 40 : Représentation des Odds ratios et de leur intervalle de confiance pour chacune des modalités de comparaison de la régression logistique.....	105
Figure 41 : Représentation de la courbe ROC associée à la régression logistique.....	107
Figure 42 : Graphique Quantile-Quantile des résidus (test de normalité)	108
Figure 43 : test de dispersion non paramétrique	108
Figure 44 : test des valeurs aberrantes (outliers)	109
Figure 45 : Graphique des résidus DHARMA en fonction des valeurs prédite	109

Liste des tableaux

Tableau 1 : caractéristiques des follicules ovariens bovins au cours du développement. FSH : Follicule Stimulating Hormone, LH : Luteinizing Hormone, mm : millimètres, μ m : micromètre (Source : Adams & Singh, 2021).....	22
Tableau 2 : Stade de développement de l'embryon selon la classification IETS, d'après (Phillips, Jahnke 2016).....	36
Tableau 3 : Taux de gestation en fonction du stade de développement de l'embryon, dans différentes études.	37
Tableau 4 : taux de gestation en fonction de la qualité des embryons implantés.	38
Tableau 5: Effet de la parité sur les taux de gestation.....	41
Tableau 6 : Résumé des principales caractéristiques de chaque protocole de synchronisation des chaleurs.	49
Tableau 7: Effet de l'expression des chaleurs sur les taux de gestation dans plusieurs études.	51
Tableau 8: Taux de gestation en fonction du type de détection de chaleurs, d'après (Marques et al., 2020).....	51
Tableau 9 : Impact de la taille du corps jaune sur les taux de gestation.	52
Tableau 10 : Rapport entre la concentration plasmatique en progestérone et gestation. Source : Chagas e Silva et al., 2002.....	55
Tableau 11 : Objectif de GMQ selon l'âge et les objectifs de l'élevage d'après Jussiau et Pape (2015).	59
Tableau 12: Estimation des besoins moyens en eau en litres / animal / jour. Source : Boudon et al. 2013.	59
Tableau 13 : Indicateurs de carences ou d'excès minéral pour les macro-éléments chez les bovins d'après (Delaby et al., 2018).....	66
Tableau 14 : Impacts d'un défaut d'apport des oligo-éléments sur les performances de reproduction d'après (Brisson 2003; Chastant-Maillard 2016; Meschy 2023).	67
Tableau 15 : Teneurs physiologiques, valeurs seuils de carence et seuils de toxicité, et teneur maximale tolérable pour l'animal d'après (Delaby, Nozière et Sauvant 2018).	68
Tableau 16 : apports recommandés en vitamine A, D et E en Unité Internationale par kg d'après Delteil et al. (2018).	69
Tableau 17 : les vitamines B d'après (Robert, 2022).	70
Tableau 18 : taux de gestation selon la saison (Baruselli et al. 2011; Choi et al. 2023).....	74
Tableau 19 : effet du THI (index de température-humidité) sur les taux de gestation, en fonction de la parité des receveuses, d'après (Ferraz et al. (2016).	75
Tableau 20 : taux de gestation en fonction du lieu de pose de l'embryon dans la corne, de la facilité de passage du col de l'utérus et de la durée du transfert, d'après (Alkan et al. 202), Roper et al. 2018, Kasimanickam et al. 2019).	77
Tableau 21 : Taux de gestation en fonction du comportement de la génisse, d'après (Kasimanickam et al. 2019; 2018).	78
Tableau 22 : Résumé des taux de gestation (exprimés en pourcentages) pour chacune des modalités de l'étude, leur intervalle de confiance, ainsi que la p-value associée à chaque variable.....	98
Tableau 23 : V de Cramer entre chacune des variables, représentant chacune des associations entre ces variables.....	100

Liste des abréviations

- °C : Degré Celsius
- ACM : Analyse des correspondances multiples
- AG : Acide Gras
- AHH : Axe Hypothalamo-Hypophysaire
- AINS : Anti-inflammatoire non stéroïdien
- BCS : Body condition score (ou Note d'État Corporel)
- BVD : Diarrhée Virale Bovine
- CJ : Corps Jaune
- E2 : Œstrogènes
- eCG : equine Chorionic Gonadotropin
- EN : Énergie Nette
- FM : Flunixin Méglumine
- FSH : Follicule Stimulating Hormone
- FSHp : Follicule stimulating hormone porcine
- GMQ : Gain Moyen Quotidien
- GnRH : Gonadotropin Releasing Hormone
- ha : Hectare
- hCG : human Chorionic Gonadotropin
- IA : Insémination Animale
- IBR : Rhinotrachéite Infectieuse Bovine
- IETS : Société internationale du transfert embryonnaire
- IFNT : Interféron Tau
- LH : Luteinizing Hormone
- LHp : Luteinizing Hormone porcine
- MSI : Matière Sèche Ingérée
- NEC : Note d'état corporel
- P4 : Progestérone
- PGF2 α : prostaglandine 2 α
- PMSG: Pregnant Mare Serum Gonadotrophin
- PV : Poids vif
- RC : Rétrocontrôle
- SAM : Sélection assistée par marqueurs
- TE : Transfert Embryonnaire
- THI : Temperature Humidity Index
- TP : Taux Protéique
- UA : Unité Armour
- UF : Unité fourragère
- UFL : Unité fourragère lait
- UFV : Unité Fourragère Viande
- UI : Unité Internationale

INTRODUCTION

L'amélioration génétique constitue un enjeu majeur pour l'élevage bovin. Elle vise à obtenir des animaux plus productifs, mieux adaptés à leur environnement et plus résistants face aux maladies. L'un des leviers essentiels de ce progrès repose sur la réduction de l'intervalle de génération, paramètre clé de la formule du progrès génétique. Dans ce cadre, la sélection assistée par marqueurs (SAM) permet d'accroître l'intensité et la précision de sélection. Associé à la SAM, le transfert embryonnaire devient un outil performant de diffusion rapide de la génétique, grâce au choix rigoureux des donneuses et des accouplements.

L'entreprise Umotest, organisme de sélection de la race Montbéliarde regroupant huit coopératives, s'inscrit pleinement dans cette démarche. Parmi ses missions figurent la production et la commercialisation d'embryons, visant à améliorer la génétique de la race. Chaque année, environ 130 donneuses sont recrutées, auxquelles s'ajoutent des prélèvements en élevage, permettant la pose d'environ 3 500 embryons. Toutefois, ces dernières années, une diminution des taux de gestation a été observée, soulevant des interrogations quant aux facteurs influençant la réussite du transfert embryonnaire, qu'ils soient zootechniques, environnementaux ou techniques.

L'objectif de cette thèse était donc double : d'une part, réaliser une revue bibliographique des facteurs influençant le succès du transfert embryonnaire ; d'autre part, analyser les données collectées par certaines coopératives afin d'établir un état des lieux des pratiques actuelles. Cette démarche visait à proposer des pistes d'amélioration et à uniformiser les techniques de transfert au sein des coopératives, dans le but d'optimiser les chances de réussite et de contribuer au progrès génétique de la race Montbéliarde.

Pour répondre à ces objectifs, nous présenterons dans une première partie les bases physiologiques, puis nous nous intéresserons successivement à l'embryon, à la receveuse et à son environnement. Dans un second temps, une analyse des données issues de différentes coopératives de transfert a été menée à travers une approche descriptive, complétée par une analyse des correspondances multiples (ACM), avant la réalisation d'une régression logistique destinée à estimer l'effet propre de chaque facteur.

PARTIE 1

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Le cycle œstral des bovins

L'activité ovarienne des bovins femelles non gestantes est représentée par un schéma cyclique enchaînant des périodes de non-réceptivité sexuelle et des périodes de réceptivité, permettant l'accouplement et la mise en place de la gestation. La mise en place des cycles débute à la puberté, généralement lorsque les génisses sont âgées de 10 à 12 mois, pour un poids vif avoisinant les 200-250 kg (Forde et al., 2011).

Un cycle dure en moyenne entre 18 à 24 jours et se compose de deux phases distinctes : la phase lutéale qui dure 14 à 18 jours et la phase folliculaire qui dure 4 à 6 jours. Le début de la phase lutéale est marqué par l'ovulation, cet événement achève donc la phase folliculaire. La phase folliculaire débute lorsque la lutéolyse est achevée, en fin de phase lutéale (Bonnes et al., 2013).

1. Les modifications cycliques de l'ovaire

Chez les mammifères, dont les bovins, les ovaires contiennent une grande réserve de follicules primordiaux, réserve qui se met en place lors de la vie fœtale de l'animal (Aerts & Bols, 2010).

a. Anatomie de l'ovaire (Bonnes et al., 2013)

Les ovaires se trouvent dans la cavité abdominale des bovins femelles, près de l'entrée du bassin. La surface de l'ovaire est bosselée du fait des follicules et des corps jaunes (CJ) éventuellement présents. Les ovaires sont revêtus d'un épithélium cubique qui est doublé par une densification du stroma, nommée albuginée. Le stroma est un tissu conjonctif où on distingue deux zones :

- La médulla, en zone centrale, qui contient des ramifications nerveuses, sanguines et lymphatiques.
- Le cortex, en zone périphérique, qui contient les follicules et formations dérivées.

La figure 1 (ci-après) représente les structures d'une coupe d'ovaire.

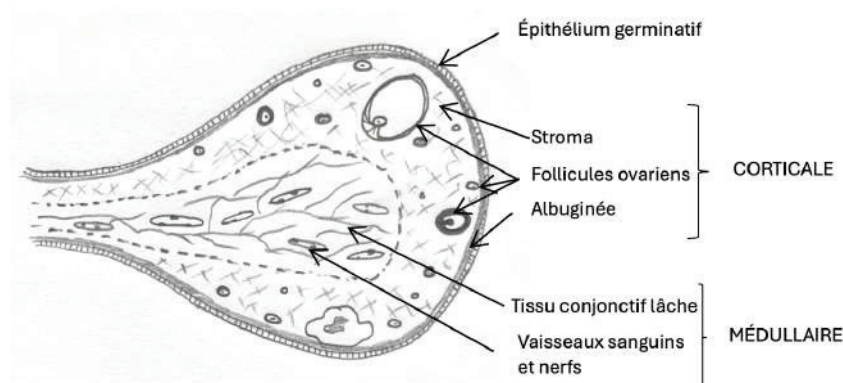


Figure 1 : Schéma des structures d'une coupe d'ovaire, Source : BOUCARD Lucine

b. L'activité ovarienne avant l'ovulation

(1) Les différents stades de follicules

La folliculogenèse est le processus par lequel un follicule primordial activé se développe jusqu'à atteindre sa taille pré-ovulatoire, incluant la croissance et la différenciation de l'ovocyte et des cellules de la granulosa avoisinantes. Sur un même ovaire, différents stades de développement des follicules sont présents (Figure 2). Ils sont classés selon les caractéristiques morphologiques des cellules de la granulosa, le diamètre de l'ovocyte et la présence ou non d'un liquide dans l'*antrum* (Adams & Singh, 2021). Les différents stades de follicules sont rappelés dans le tableau 1 ci-après.

Stade folliculaire	Récepteur FSH/LH	Couches de cellules de la granulosa	Diamètre du follicules (mm)	Diamètre de l'ovocyte (μ m)	Zone pellucide	Thèque interne
Primordial		1	< 0,04	30	Absente	Absente
Primaire	FSH (granulosa)	1-1,5	0,04-0,08	30	Absente	Absente
Secondaire	FSH (granulosa)	2-6	0,08-0,25	50 à 60	Début de la formation	Début de la formation
Tertiaire	LH (thèque)	>6	0,25-10	90	Formée	Partiellement formée
Pré-ovulatoire = de De Graaf	LH (granulosa follicule dominant)	>6	10-15	130	Formée	Formée

Tableau 1 : caractéristiques des follicules ovariens bovins au cours du développement. FSH : Follicule Stimulating Hormone, LH : Luteinizing Hormone, mm : millimètres, μ m : micromètre (Source : Adams & Singh, 2021).

Les follicules de De Graaf sont les follicules pré-ovulatoires, les plus volumineux (12 à 19 mm chez les bovins). Ils se distinguent par :

- Une cavité (*antrum*) volumineuse
- Un ovocyte situé dans le *cumulus oophorus* (cellules de la granulosa)
- Une thèque interne très vascularisée qui synthétise des androgènes sous influence de la LH
- Une thèque externe fibreuse
- Une granulosa développée, où les cellules portent des récepteurs FSH et transforment les androgènes en œstrogènes.

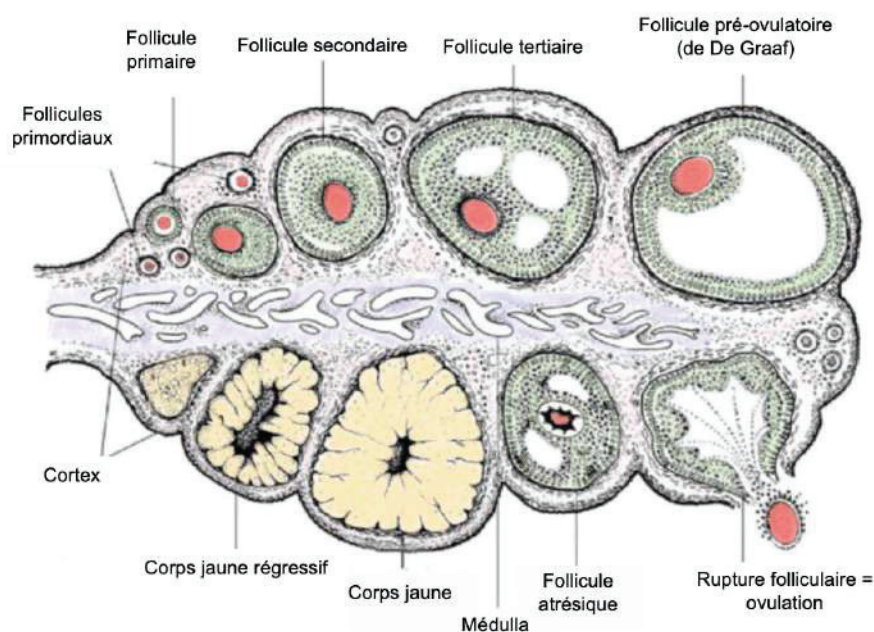


Figure 2 : Schéma des différents stades folliculaires de l'ovaire de la vache (d'après Huang et al. 2008)

(2) La folliculogenèse

La folliculogenèse correspond aux différentes étapes de développement d'un follicule, depuis sa sortie de réserve jusqu'à sa rupture au moment de l'ovulation. Ce développement s'effectue environ sur 5 mois chez les bovins (Picard-Hagen & Gayrard, 2008). La dernière phase de croissance folliculaire terminale, qui dure 4 à 5 jours, aboutit à la formation d'un follicule pré-ovulatoire. Cette croissance terminale se décompose en 3 étapes : le recrutement, la sélection et la dominance (figure 3).

Chez les bovins, les follicules sont recrutés par vagues, formant alors une cohorte de nombreux follicules, de diamètre égal ou supérieur à 2 mm. Plusieurs

« vagues » se succèdent au cours d'un cycle, 2 à 3 chez la vache, durant 7 à 9 jours. Durant la phase de recrutement, la croissance des follicules est dépendante de la FSH. Lorsqu'un follicule atteint 8 mm de diamètre, il est sélectionné et devient un follicule « dominant ». Celui-ci acquiert des récepteurs à la LH et peut ainsi poursuivre sa croissance. Les autres follicules, n'ayant pas ces récepteurs, interrompent leur croissance et deviennent atrophiques. Il s'agit de la phase de sélection. Pour finir, ce follicule dominant finit sa croissance sous influence de la LH pour atteindre une taille de 15mm environ. Il s'agit de la phase de dominance. Si un CJ est présent, le follicule dominant finit par s'atrophier sous l'influence de la progestérone. S'il n'y a pas de CJ, il termine sa croissance jusqu'à l'ovulation. Si trois vagues sont observées, elles surviennent au 2^{ème}, 9^{ème} et 16^{ème} jour du cycle. Si deux vagues sont observées, elles débutent au 2^{ème} et 11^{ème} jour. Ces variations sont individus-dépendantes (Bonnes et al., 2013; Dubois, 2016; Hanzen et al., 2000).

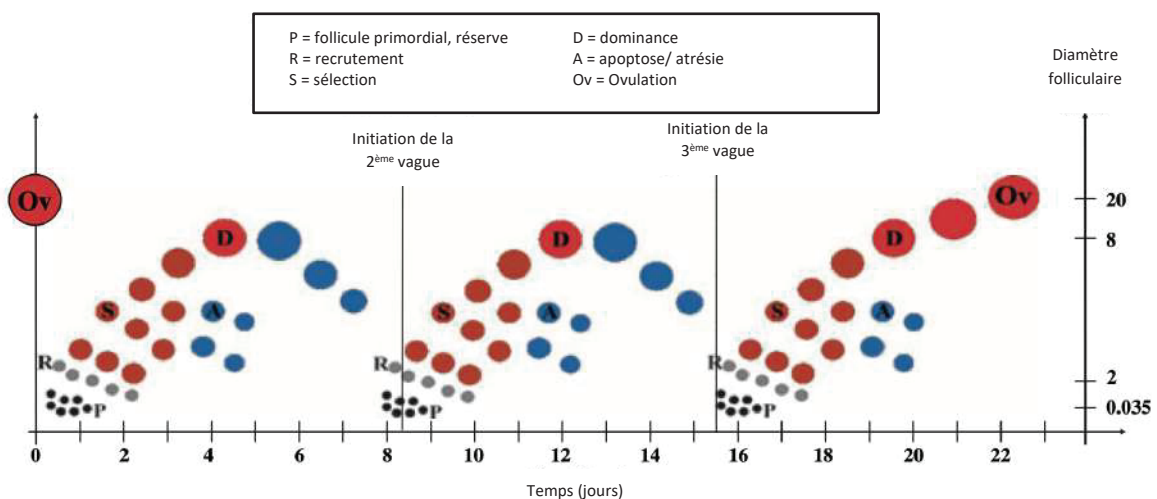


Figure 3 : Trois vagues se succédant dans un cycle chez les bovins. Chaque vague correspond à la succession d'une phase de recrutement, de sélection et de dominance (Source : Adams & Singh, 2021).

c. L'ovulation

L'ovulation est la libération d'un ou plusieurs gamètes femelles, prêts à être fécondés après rupture d'un ou plusieurs follicules pré-ovulatoires. Cette rupture a lieu grâce à la fragilisation des parois du follicule et de l'ovaire (Bonnes et al., 2013).

d. L'activité ovarienne après l'ovulation

A l'issue de l'ovulation, des transformations morphologiques et fonctionnelles du follicule conduisent à la formation d'un CJ et à la sécrétion de progestérone. Le CJ devient fonctionnel 1 à 2 jours après l'ovulation (Bonnes et al., 2013). La sécrétion de progestérone augmente rapidement à partir du 3^{ème} jour après l'ovulation, avec un pic de production entre le 10^{ème} et le 14^{ème} jour après l'ovulation, suivi d'une diminution jusqu'au 16^{ème} jour (Adams & Singh, 2021). A l'issue de cette phase, le CJ peut avoir deux évolutions différentes :

- S'il y a eu fécondation : le CJ est maintenu en corps jaune de gestation *via* un signal (l'interféron *tau*) transmis par l'embryon. La reconnaissance maternelle de la gestation a lieu entre le 15^{ème} et le 17^{ème} jour du cycle.
- S'il n'y a pas fécondation : le CJ régresse sous l'influence de la prostaglandine F2 α (PGF2 α). Il s'agit de la lutéolyse, qui a lieu le 17^{ème} jour du cycle (Bonnes et al., 2013; Forde et al., 2011).

2. Les hormones en jeu

a. Les Hormones hypothalamo-hypophysaire

L'hormone hypothalamique pertinente dans le contexte de la transplantation embryonnaire est la GnRH (Gonadotropin Releasing Hormone). C'est une hormone peptidique sécrétée par l'hypothalamus, dont le rôle est de stimuler la libération des hormones gonadotropes.

Les hormones hypophysaires comprennent la FSH (Follicule Stimulating Hormone) et la LH (Luteinizing Hormone), toutes deux sécrétées par les cellules gonadotropes de l'antéhypophyse. Étant donné qu'elles agissent directement sur les ovaires, elles sont qualifiées de gonadotropines. La FSH stimule la croissance des follicules tandis que la LH exerce une action lutéinisante (Bonnes et al., 2013).

(1) GnRH

La GnRH est l'hormone initiale de la cascade hormonale reproductive. Elle est sécrétée de manière pulsatile, au sein des neurones de l'hypothalamus, dans le système porte hypophysaire. Elle est transportée jusqu'à l'antéhypophyse où elle

stimule la biosynthèse et la sécrétion des hormones gonadotropes (LH, FSH) (Millar, 2005).

(2) FSH

La FSH est l'hormone principale qui stimule la croissance folliculaire. Elle permet également de préparer l'action de la LH et elle stimule la synthèse des œstrogènes par les follicules (Bonnes et al., 2013).

(3) LH

La LH joue plusieurs rôles chez la femelle. Associée à la FSH, elle permet la maturation finale des follicules. Toutefois, elle est surtout connue pour sa capacité à provoquer l'ovulation, induisant ainsi la formation du CJ et la synthèse de progestérone (Bonnes et al., 2013).

b. Les hormones ovariennes

Chez la femelle, les principales hormones ovariennes sont des hormones stéroïdiennes. Ces hormones sont les œstrogènes et la progestérone. Il s'agit d'hormones lipidiques ayant un précurseur commun : le cholestérol. Elles sont sécrétées par les gonades, les ovaires dans le cas de la femelle, mais également par le placenta et les glandes surrénales (Bonnes et al., 2013).

(1) Œstrogènes

Étymologiquement, œstrogène signifie « qui engendre l'œstrus ». Ces hormones sont sécrétées par les follicules de l'ovaire. Les œstrogènes ont pour rôle principal de provoquer les chaleurs chez les femelles (Bonnes et al., 2013). Ils jouent également un rôle de régulation sur le complexe hypothalamo-hypophysaire. À forte concentration plasmatique, ils exercent un rétrocontrôle positif sur la production de GnRH, LH et FSH. À faible concentration plasmatique, le rétrocontrôle est négatif (Bonnes et al., 2013).

(2) Progestérone

La progestérone est, étymologiquement, l'hormone « qui permet la gestation ». Elle permet donc le maintien de la gestation. Elle est sécrétée par le CJ, puis le placenta prend le relais à partir du 200^{ème} jour de gestation chez les bovins. De même que pour les œstrogènes, la progestérone joue un rôle sur l'axe hypothalamo-

hypophysaire. À forte concentration plasmatique, la progestérone exerce un rétrocontrôle négatif sur les hormones hypothalamo-hypophysaires. Une faible concentration plasmatique n'a pas d'impact sur ces hormones (Bonnes et al., 2013). La concentration plasmatique de progestérone est corrélée au poids et au volume du CJ (Adams & Singh, 2021).

c. Les prostaglandines

Les prostaglandines sont un groupe d'hormones de nature lipidique. Elles sont présentes dans de nombreux tissus de l'organisme où elles ont des rôles multiples. Dans le cadre de la reproduction, la plus importante est la prostaglandine $F2\alpha$ ($PGF2\alpha$). En ce qui concerne la reproduction, cette hormone a plusieurs rôles : elle permet l'éclatement du follicule au moment de l'ovulation, elle déclenche et entretient les contractions lors de la mise bas. Mais le rôle le plus important est celui de la lutéolyse, c'est-à-dire la lyse du CJ. Cette lutéolyse est assurée par l'utérus qui produit la $PGF2\alpha$. Cette hormone est largement utilisée dans la maîtrise des cycles sexuels (Bonnes et al., 2013).

d. Régulations hormonales

Comme vu précédemment, le cycle ovarien bovin se décompose en 2 phases. La première phase, appelée phase lutéale, dure environ 17 jours. La seconde est appelée phase folliculaire et dure en moyenne 4 jours. L'ensemble du cycle est régulé par les hormones hypothalamo-hypophysaires, ovariennes et utérines (Figure 4). Elles exercent un rétrocontrôle positif ou négatif variant au cours du cycle (Forde et al., 2011).

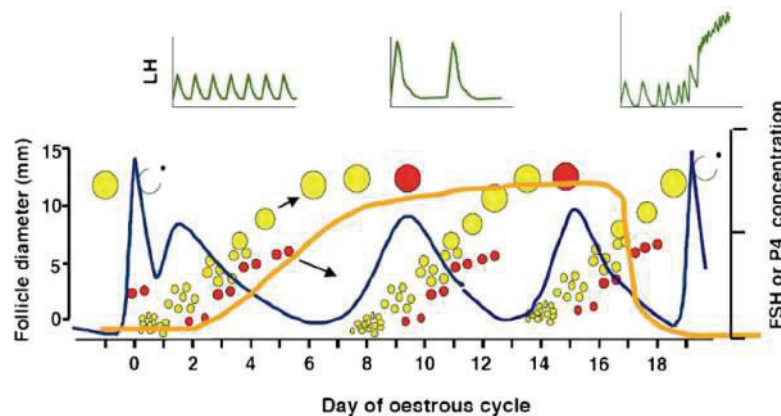


Figure 4 : Contrôle hormonal et vagues folliculaires au cours du cycle sexuel femelle chez les bovins (Source : Forde et al., 2011).

(1) Lors de la phase lutéale

A l'issue de l'ovulation, le follicule devient un CJ et synthétise de la progestérone. En effet, sous l'effet de la LH ayant provoqué l'ovulation, le CJ se forme et devient fonctionnel, en sécrétant de la progestérone à partir du 2^{ème} jour du cycle. Celle-ci exerce un rétrocontrôle négatif sur l'axe hypothalamo-hypophysaire (AHH). Ainsi, les concentrations en GnRH sont faibles, induisant de faibles taux de sécrétion de LH et FSH par l'hypophyse. Les vagues folliculaires, lors de cette phase, ne peuvent donc pas aboutir à une ovulation, et les follicules s'atréfient. La progestérone exerce également une influence sur l'utérus, en le préparant à une éventuelle gestation. Elle induit un repos utérin, en inhibant les contractions et stimulant la vascularisation de l'endomètre. La figure 5 schématise le processus de régulation hormonale en phase lutéale.

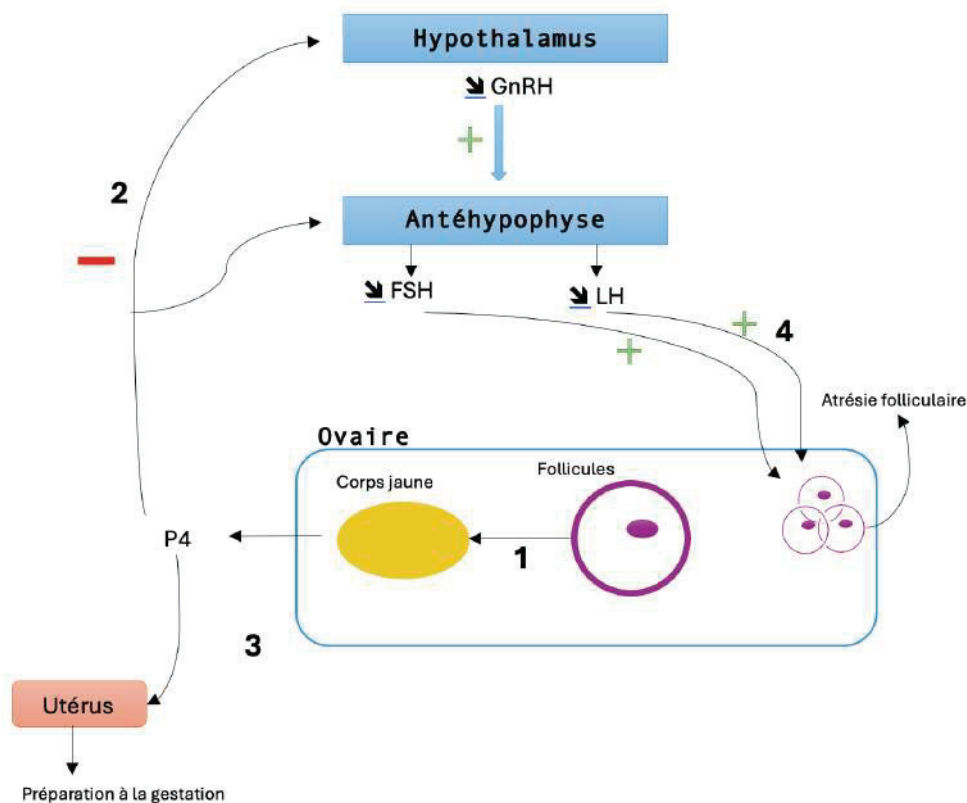


Figure 5 : Régulation hormonale lors de la phase lutéale. Source : BOUCARD Lucine

1 : Formation du corps jaune sous l'action de la LH à l'issue de l'ovulation. **2 :** Production de progestérone (P4) par le CJ qui induit un rétrocontrôle (RC) négatif sur l'axe hypothalamo-hypophysaire. **3 :** La P4 induit la préparation de l'utérus à recevoir un embryon. **4 :** Le RC induit une baisse des gonadotropines, donc une atrophie des vagues folliculaires lors de la phase lutéale.

(2) Lors de la phase folliculaire

La lutéolyse marque le commencement de la phase folliculaire. Au 17^{ème} jour, s'il n'y a pas de fécondation envoyant un signal à l'utérus, celui-ci sécrète de la PGF2 α ,

qui induit la lutéolyse et, ainsi, un taux de progestérone au plus bas. De ce fait, le rétrocontrôle négatif, exercé par la progestérone sur l'AHH, est levé. La concentration de GnRH augmente, permettant une augmentation de sécrétion de LH et FSH de manière pulsatile. Le follicule dominant, de la dernière vague folliculaire initiée, voit sa croissance stimulée par les hormones hypophysaires, lui permettant de sécréter des quantités accrues d'œstrogènes. Ceux-ci sont à l'origine du comportement d'œstrus de l'animal, observé vers le 21^{ème} jour du cycle. À partir d'un certain seuil, les œstrogènes exercent un rétrocontrôle positif sur l'AHH, permettant une production importante de GnRH. Cette concentration induit des décharges rapprochées de LH, augmentant la concentration globale de LH. Ainsi, des impulsions de LH toutes les 40 à 70 minutes pendant 2 à 3 jours permettent l'ovulation du follicule dominant, 24 à 30h après le début de l'œstrus (Forde et al., 2011). La figure 6 schématise le processus de régulation hormonale lors de la phase folliculaire.

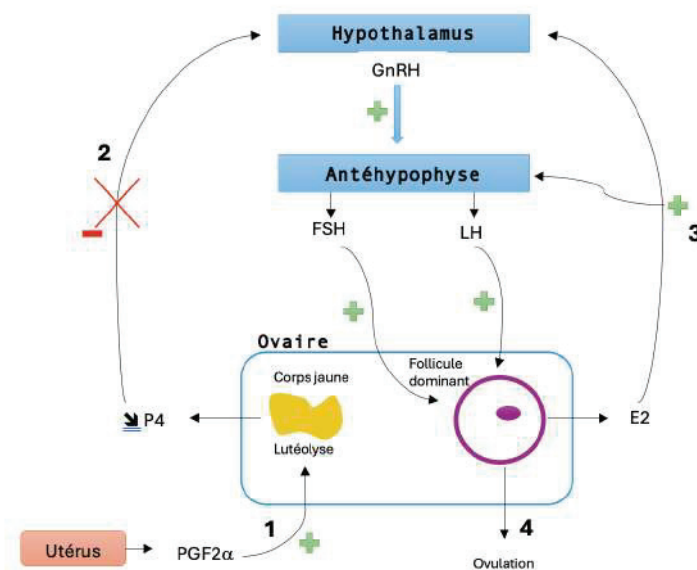


Figure 6 : Régulation hormonale lors de la phase folliculaire. Source : BOUCARD Lucine

1 : L'utérus produit de la PGF2α, induisant la lutéolyse. **2 :** La baisse de P4 due à la lutéolyse lève le rétrocontrôle négatif sur l'axe hypothalamo-hypophysaire. **3 :** Les hormones gonadotropes sont sécrétées permettant la croissance d'un follicule dominant qui sécrète de l'E2, exerçant un RC positif sur l'AHH. **4 :** Cet RC positif, induit une augmentation des gonadotropines aboutissant à l'ovulation du follicule dominant.

3. Fécondation, développement embryonnaire précoce et reconnaissance maternelle de l'embryon

Comme vu précédemment, à l'issue de l'ovulation, un gamète femelle est libéré dans la trompe utérine, adjacente à l'ovaire concerné. Grâce aux mouvements des cils

des cellules épithéliales et aux contractions péristaltiques, l'ovocyte est conduit jusqu'à l'ampoule tubaire où a lieu la fécondation (Bonnes et al., 2013).

La fécondation correspond à l'ensemble des événements qui se passent à l'issue du contact entre un spermatozoïde et un ovocyte. Ces événements aboutissent au mélange des chromosomes maternels et paternels, conduisant rapidement à une première division cellulaire. La fécondation aboutit donc à deux cellules filles, première étape de la vie du produit de la conception (Bonnes et al., 2013; Valadao et al., 2019).

La première étape de la gestation se compose de la formation du zygote, ainsi que du début de la croissance embryonnaire. Ont ensuite lieu l'adhésion du trophoblaste à l'endomètre, et le début de l'implantation. Enfin, la dernière étape est la phase fœtale, qui débute lors de la minéralisation osseuse et s'achève lors de la mise-bas. La phase fœtale débute à environ 45 jours de gestation chez les bovins (Valadao et al., 2019).

Lors de la première étape de la gestation, le conceptus se dirige vers la lumière utérine, *via* les cils et le péristaltisme de l'oviducte. Dans le même temps, 5 à 6 divisions cellulaires mitotiques ont lieu, sans modifier le volume total du conceptus, du fait de la zone pellucide. La première division a lieu environ 30 heures après la fécondation. Ces divisions entraînent une augmentation du nombre de cellules, les blastomères. Environ 3 jours après la fécondation, la structure embryonnaire est d'environ 16 cellules (stade morula). Au 4 ou 5^{ème} jour, le conceptus est dans la lumière utérine, composé d'une centaine de cellules formant un blastocyste, se nourrissant des sécrétions nutritives de l'endomètre. Au sein de cette structure, la masse cellulaire interne deviendra l'embryon, tandis que le trophoblaste formera une partie du placenta. L'implantation de l'embryon a lieu entre le 20^{ème} jour et le 30^{ème} jour de gestation (Valadao et al., 2019).

Chez les bovins, une reconnaissance maternelle est indispensable pour permettre et maintenir la gestation. Cette reconnaissance est permise par la production de médiateurs lutéotrophiques et antilutéolytiques, qui sont synthétisés par le trophoblaste de l'embryon. Il s'agit, entre autres, de la trophoblastine (ou interféron Tau - IFNT) et de l'hormone lactogène placentaire. Ces médiateurs agissent sur l'endomètre en inhibant les décharges de PGF2 α , sur les cellules lutéales en favorisant

la production de progestérone et en les protégeant de la lutéolyse. Ils augmentent également l'expression de l'ARNm impliqué dans l'angiogenèse tout en réduisant celui des protéines médiatrices de l'apoptose. (Arosh et al., 2016; Bonnes et al., 2013; Pate, 2020).

II. Obtention d'un embryon prêt à être implanté

Dans le cadre de la transplantation embryonnaire, la production d'embryons requiert une maîtrise précise des cycles hormonaux des donneuses afin de générer plusieurs embryons viables lors de la collecte. Ces embryons sont évalués en fonction de leur morphologie, puis sont soit transférés directement aux receveuses, soit conservés. Les méthodes de production des embryons, leurs caractéristiques morphologiques et leurs conditions de conservation sont autant de facteurs susceptibles d'influencer la réussite de la gestation chez les animaux receveurs.

1. Du protocole de superovulation à la collecte des embryons

Les donneuses d'embryons sont sélectionnées pour leur potentiel génétique élevé. Des traitements hormonaux sont mis en place afin de s'assurer de pouvoir récolter des embryons, mais également de pouvoir les transférer sur des receveuses.

a. Le protocole de superovulation

L'objectif des protocoles induisant une superovulation dans les programmes de transfert d'embryons est d'obtenir un nombre maximum d'embryons transférables avec une forte probabilité d'obtenir des gestations.

(1) Les hormones utilisées

Les hormones communément utilisées dans les protocoles de superovulation sont les suivantes :

♦ **Extraits hypophysaires :**

Les extraits hypophysaires sont les plus utilisés. Il s'agit d'hormones hypophysaires qui sont d'origine porcine (FSHp et LHp). Leur demi-vie courte (5-6 heures) impose des injections répétées. Les doses sont comprises entre 30 et 52 UA (Unité Armour), administrées bi-quotidiennement, à dose décroissante (Hanzen, 2008).

♦ **PGF2 α** :

La PGF2 α est utilisée pour induire la lutéolyse au cours d'un protocole et ainsi initier un nouveau cycle. Les extraits hypophysaires permettent alors de stimuler la vague folliculaire en cours pour obtenir plusieurs follicules dominants (Bó & Mapletoft, 2014).

♦ **La progestérone ou les implants progestatifs** :

La progestérone permet d'éviter une entrée prématurée en œstrus chez les donneuses en reproduisant artificiellement une phase lutéale. Ces techniques sont particulièrement utilisées lorsque la présence d'un CJ ne peut pas être confirmée (Bó & Mapletoft, 2014).

♦ **La GnRH et ses analogues** :

Afin de stimuler la production des hormones hypophysaires, la LH et la FSH, la GnRH ou ses analogues (gonadoréline ou encore buséréline) sont employées. Ces derniers sont des molécules de synthèses mimant l'action naturelle de la GnRH (Thibier, 1988).

(2) Le protocole de superovulation

Le protocole présenté ici est celui utilisé par l'entreprise UMOTEST. Ce protocole de superovulation repose sur la pose d'une spirale imprégnée de progestérone afin de synchroniser la donneuse et de maîtriser son cycle. Une administration répétée d'hormones hypophysaires (FSHp et LHp, Pluset® ou Stimufol®), bi-quotidiennement pendant 4 jours, à doses dégressives, permet de stimuler la croissance de plusieurs follicules. Puis une injection à base de dinoprost (Dinolytic®), une prostaglandine naturelle, est effectuée pour stimuler la lyse du CJ éventuellement présent. La spirale à base de progestérone (PRID®) est retirée dans le même temps. Deux inséminations animales (IA) sont ensuite effectuées, à 15 heures d'intervalles. Simultanément à la première IA, une injection à base de buséréline (Receptal® ou Busol®), un analogue à la GnRH, est administrée. Cette injection permet de stimuler la production de LH, permettant l'ovulation des follicules. La collecte des embryons s'effectue 6 jours après la deuxième IA. Enfin, une injection

à base de PGF2 α (Estrumate®) est effectuée 3 jours après la collecte pour lyser les CJ en place. La figure 7 illustre ce protocole.

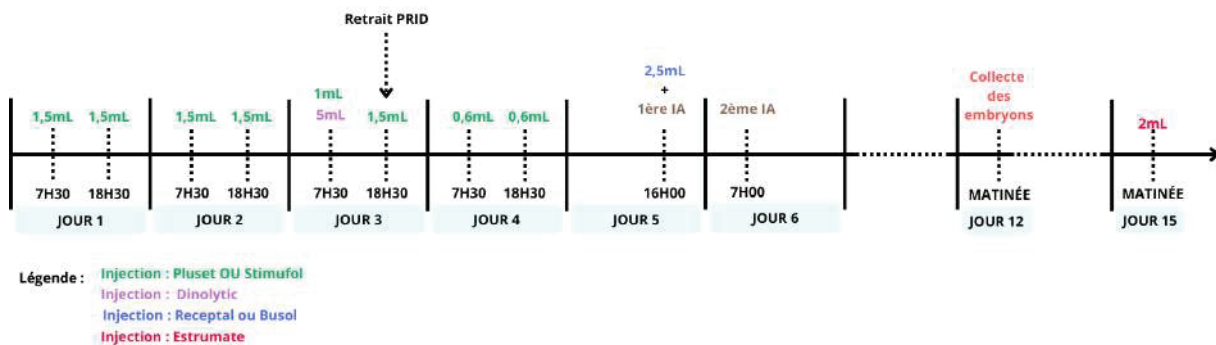


Figure 7 : illustration du protocole de superovulation utilisé par Umotest. Source : BOUCARD Lucine

b. La collecte des embryons

Les embryons sont collectés grâce à un lavage de chaque corne utérine, avec environ 500ml de liquide de collecte. Pour réaliser ces lavages, un système composé d'une sonde à trois voies et d'une sonde de Folley est utilisé. L'ensemble du dispositif est introduit dans la corne et permet d'introduire le liquide de collecte puis de l'aspirer, notamment grâce à un système d'obstruction des tubulures, comme l'illustre la figure 8.



Figure 8 : Sonde à 3 voies pour aspiration et collecte des embryons. Source : BOUCARD Lucine

La sonde introduite dans la corne utérine est donc une sonde de Folley avec ballonnet. Avant l'introduction de cette sonde, un dilateur de col est utilisé afin de faciliter le passage du col et l'introduction de la sonde dans la corne utérine. Le ballonnet est ensuite gonflé à l'aide d'une seringue sèche afin de rendre l'extrémité de la corne hermétique. Les figures 9 et 10 illustrent la sonde à trois voies utilisées, ainsi que la sonde de Folley avec le ballonnet et le mandrin. La sonde de Folley est ensuite reliée à la sonde à trois voies. Lorsque tout est en place, la collecte peut débuter. Les deux cornes sont prélevées, l'une après l'autre.



Figure 10 : Sonde à trois voies.
Source : BOUCARD Lucine

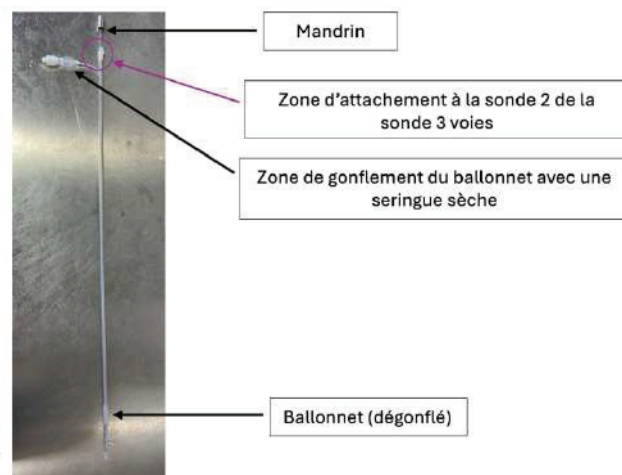


Figure 9 : Sonde de Folley. Source : BOUCARD Lucine

Le liquide, qui est conservé au bain-marie à 31,5°C durant la collecte, est aspiré et envoyé dans la corne puis est récupéré avec les embryons. Lorsque le liquide de collecte est réaspiré, il passe par un filtre qui permet de retenir les embryons présents dans ce liquide. Ce procédé est illustré dans la figure 11.

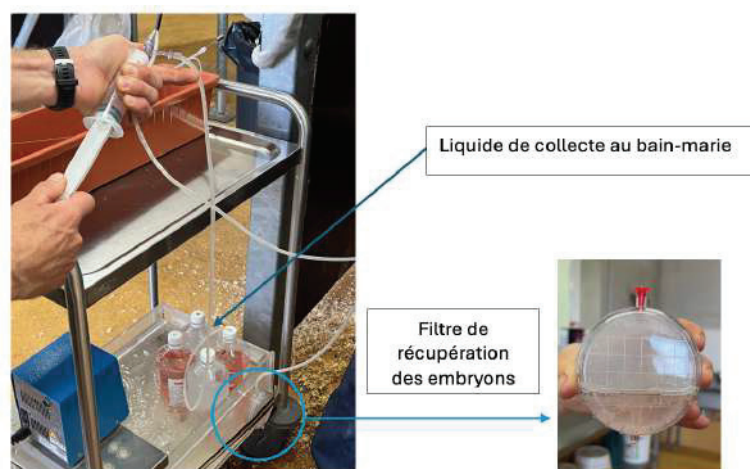


Figure 11 : Filtration des embryons dans un filtre lors du passage du liquide de collecte par ce filtre. Source : BOUCARD Lucine

Lorsque la collecte de la corne est terminée, la sonde est placée dans la seconde corne et l'opération est renouvelée.

Par la suite, les embryons sont récupérés dans le filtre à l'aide d'un liquide de rinçage et transférés dans une boîte de PETRI afin de les observer à la loupe binoculaire.

Chaque embryon est pris individuellement et placé dans un puits d'une plaque stérile, ce qui permet de les nettoyer et de les examiner de manière plus approfondie. Ils sont ensuite évalués selon leur stade de développement et leur qualité. À l'issue de cette évaluation, plusieurs options s'offrent au manipulateur. Les embryons peuvent être sélectionnés pour un transfert frais et sont alors mis en paillettes afin d'être transférés rapidement à la receveuse. Ils peuvent aussi être congelés pour une utilisation future. Cependant, si leur qualité est insuffisante, ils sont écartés et ne sont pas utilisés pour un transfert.

2. Évaluation de l'embryon

À l'issue de la collecte, les embryons sont examinés à la loupe binoculaire, avec un grossissement x50. Cette observation minutieuse permet d'évaluer la qualité de chaque embryon, d'identifier d'éventuelles anomalies et de déterminer son stade de développement en fonction de son âge. Le classement des embryons est effectué selon des critères d'évaluation établis par la Société Internationale du Transfert Embryonnaire (IETS, International Embryo Transfer Society). Ainsi, chaque embryon doit être examiné individuellement et mis en mouvement afin d'être observé dans son intégralité. Ces observations permettent d'attribuer deux notes à chaque embryon : une note pour le stade de développement et une note pour la qualité de l'embryon. Toutefois, le manuel de l'IETS précise que cette évaluation visuelle des embryons est subjective et ne constitue en aucun cas une science exacte (Phillips & Jahnke, 2016).

a. Stade de développement de l'embryon

La note attribuée pour le stade de développement se situe entre 1 et 9. La note 1 est attribuée au stade de l'ovocyte non fécondé, tandis que la note 9 est attribuée lorsque le stade du blastocyte éclos en expansion est atteint.

- **Stade 1** : l'ovocyte non fécondé est parfaitement sphérique, le cytoplasme apparaît granuleux et un espace périvitellin est observé entre la zone pellucide et la cellule.
- **Stade 2** : les embryons composés de 1 (zygote) à 12 cellules sont en retard sur leur développement et doivent être considérés comme mort ou dégénérés.
- **Stade 3** : à ce stade, les embryons sont divisés en 16 cellules ou plus, correspondant au stade jeune morula.

- **Stade 4** : les blastomères forment un amas cellulaire compact, une morula, mais elles ne sont pas encore différenciées.
- **Stade 5** : il y a formation de la cavité blastocœlique, début de différenciation des cellules en cellules trophoblastiques externes et embryoblastes : l'embryon atteint le stade de jeune blastocyte.
- **Stade 6** : la couche trophoblastique externe, la cavité blastocœlique et les cellules internes sont bien définies, l'embryon est un blastocyte qui occupe une grande partie de l'espace vitellin et la zone pellucide a toujours la même épaisseur.
- **Stade 7** : la zone pellucide s'amincit et il y a une augmentation globale de la taille de l'embryon (blastocyte expansé).
- **Stade 8** : l'embryon commence à éclore (blastocyte éclos) *via* une fissure de la zone pellucide.
- **Stade 9** : il y a éclosion totale de l'embryon à travers la zone pellucide (blastocyte éclos expansé).

Le tableau 2 reprend la description de l'embryon en fonction de son stade de développement, de 1 à 9.

Stade	Stade de développement
1	Ovocyte non fécondé
2	De 2 à 12 cellules
3	Jeune morula
4	Morula
5	Jeune blastocyte
6	Blastocyte
7	Blastocyte expansé
8	Blastocyte éclos
9	Blastocyte éclos expansé

Tableau 2 : Stade de développement de l'embryon selon la classification IETS, d'après (Phillips, Jahnke 2016).

b. Qualité de l'embryon

La note attribuée pour la qualité de l'embryon est basée sur une évaluation physique de l'embryon prenant en compte le stade de développement. D'autres critères sont pris en compte comme l'uniformité de la taille de l'embryon, la couleur des blastomères, la présence ou non de vacuoles au sein des cellules ou la forme de la zone pellucide. Ainsi, la note 1 est attribuée lorsqu'un embryon est jugé excellent,

tandis que la note 4 est attribuée à un embryon considéré comme mort ou dégénéré (Phillips & Jahnke, 2016).

- **Qualité 1 : excellent ou bon.** Il s'agit d'un embryon avec peu d'irrégularités, il doit être symétrique et sphérique avec des blastomères individualisés et qui sont uniformes, 85% du matériel cellulaire doit être intacte et viable.
- **Qualité 2 : acceptable.** L'embryon présente des irrégularités modérées dans la forme de sa masse ou dans sa couleur, sa taille ou la densité des cellules. Au moins 50% de la masse cellulaire est intacte.
- **Qualité 3 : insuffisant.** L'embryon présente des irrégularités majeures, dans la forme de sa masse, sa taille, sa couleur ou sa densité. Au moins 25% du matériel cellulaire est intact.
- **Qualité 4 : mort ou dégénéré.** Il s'agit des embryons dégénérés, des ovocytes non fécondés, des embryons à 1 cellule (zygote) ou non viables.

c. Influence du stade de développement et de la qualité des embryons sur les taux de gestation.

Les taux de gestation sont influencés d'une part par le stade de développement des embryons et d'autre part par leur qualité.

♦ Influence du stade de développement :

Le stade de développement des embryons utilisés impacte les taux de gestation. Ces taux de gestation semblent améliorés lorsque les embryons utilisés ont un stade de développement plus avancé, notamment à partir du stade de jeune blastocyste, dans la majorité des études. Les résultats qui ont été obtenus par plusieurs études sont illustrés dans le tableau 3.

Taux de gestation (%)				Sources	
JM	MM	JB	BM		
61	67	67	71	n = 2503	(Schneider et al., 1980)
	54,3	59,7	52,1	n = 2748	(Hasler, 2001)
10	65	63	90	n = 717	(Lindner & Wright, 1983)
	37,34	42,2	46,25	n = 618	(Erdem et al., 2020)
27,9	50,2	59,1	63,4	n = 19936	(Putney et al., 1988)
40,4	42,3	42,0	32,5	n = 1466	(Bényei et al., 2006)

Tableau 3 : Taux de gestation en fonction du stade de développement de l'embryon, dans différentes études.

JM : jeune morula, MM : morula mature, JB : jeune blastocyste, BM : blastocyste mature, n = nombre d'embryons posés. En rouge sont représentés les moins bons résultats et en vert, les meilleurs.

Toutefois, certaines études n'ont pas mis en avant de différence significative au niveau des taux de gestation, en fonction du stade de développement des embryons (Bényei et al., 2006; Hasler, 2001).

♦ Influence de la qualité des embryons :

De nombreuses études ont souligné l'intérêt d'utiliser des embryons de qualité 1 ou 2 pour les transferts. Ces embryons, qu'ils soient de qualité 1 ou 2, permettaient d'optimiser les taux de gestation, sans différence significative entre les embryons de qualité 1 ou 2. En revanche, une différence notable des taux de gestation existe entre les embryons de qualité 1 ou 2 et ceux de qualité 3, ces derniers étant associés à des taux de gestation significativement plus faibles. Selon les études, les embryons de qualité supérieure (qualité 1 ou 2) présentaient des taux de gestation variant entre 41,9 % et 71 %, tandis que les embryons de qualité inférieure (qualité 3 ou 4) ont affiché des taux de gestation plus faibles, allant de 17,1 % à 56 %. Les résultats de plusieurs études sont résumés dans le tableau 4.

Taux de gestation (%)				Source	
Q1	Q2	Q3	Q4		
57 ^a		56	43	n = 1048	(Rodrigues et al., 2018)
58,1 ^a		17,1		n = 66	(Alvarez et al., 2008)
45 ^b	44 ^b	27	20	n = 783	(Lindner & Wright, 1983)
71 ^a		55 ^c		n = 7814	(Schneider et al., 1980)
57,8 ^a		54,3	37,9	n = 3616	(Hasler, 2001)
44,66 ^a		33,07		n = 561	(Alkan et al., 2020)
44,15 ^a		32,58		n = 618	(Erdem et al., 2020)
41,9 ^a		33,3		n = 1411	(Bényei et al., 2006)

Tableau 4 : taux de gestation en fonction de la qualité des embryons implantés.

n = nombre d'embryons transférés dans chaque étude

Q1 : embryon de qualité 1, Q2 = embryon de qualité 2, Q3 = embryon de qualité 3, Q4 = embryon de qualité 4

^a embryons de qualité 1 et 2 regroupés dans l'étude, ^b différence non significative des taux de gestation entre les embryons de qualité 1 et les embryons de qualité 2, ^c embryons de qualité 3 et embryons de qualité 4 regroupés dans l'étude, n = nombre d'embryons transférés dans l'étude.

En rouge sont représentés les moins résultats de l'étude et en vert, les meilleurs.

Alvarez et al. (2008) ont même suggéré de cultiver *in-vitro* les morulas de grade 3 pour permettre d'augmenter leurs capacités de développement. Cette culture *in-vitro* permettait d'obtenir des blastocytes qui étaient alors réévalués et une note « qualité » leur était à nouveau attribuée. Cette technique a permis d'obtenir 51,1% de gestation en moyenne. À l'issue de la réévaluation, les taux de gestation ont respectivement été

de 65%, 60% et 29,4% pour les embryons de qualité 1, 2 et 3 respectivement ($p < 0,05$). Cette technique permet ainsi de tenter d'utiliser des embryons jugés insuffisants en premier lieu.

3. Conservation des embryons (cryoconservation)

Afin de conserver les embryons qui ne sont pas transférés frais sur les receveuses, il est possible de les conserver congelés au stade de blastocyste dans l'azote liquide à -196 degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$), pendant plusieurs années. Un embryon frais peut être conservé environ 12 heures à température ambiante, et pendant 12 à 24 heures s'il est réfrigéré à 4°C . La cryoconservation permet de prolonger la durée de conservation de l'embryon obtenu (Hanzen, 2008).

a. La cryoconservation des embryons (Hanzen, 2008)

Le principe de la cryoconservation des embryons est de conserver les embryons, en paillettes, dans de l'azote liquide à une température de -196°C . Pour ce faire, plusieurs procédés sont possibles :

♦ La congélation lente :

Les embryons sont mis en solution dans un milieu de conservation contenant des agents cryoprotecteurs, tels que du glycérol, de l'éthylène glycol ou encore du saccharose. Ces agents permettent d'abaisser le point de cristallisation et modifient la forme des cristaux. Cette solution, contenant l'embryon, est conditionnée en paillettes. Cette paillette est refroidie jusqu'à -7°C , la cristallisation est déclenchée puis la paillette est maintenue à cette température pendant quelques minutes. Le refroidissement se poursuit alors jusqu'à -35°C . Par la suite, la paillette est placée dans l'azote liquide à -196°C , et est conservée dans ces conditions jusqu'à son utilisation.

♦ La vitrification :

Cette méthode diffère de la précédente par sa concentration en agents cryoprotecteurs qui rendent le milieu extrêmement visqueux. Cette viscosité empêche la formation de glace intra et extra-cellulaire. La vitrification est réalisée *via* un refroidissement très rapide des paillettes, en les plongeant directement dans l'azote liquide.

b. Impact du type d'embryon transféré sur les taux de gestation

La cryoconservation semble avoir un impact négatif sur les taux de gestation. Ceux-ci paraissent diminuer lorsque les embryons sont transférés après cryoconservation. Hansen (2020) a estimé une diminution des taux de gestation de 7,4%. Ce résultat est également confirmé par Ferraz et al. (2016) qui, par une vaste étude comprenant plus de 10 000 transferts d'embryons, ont montré des taux de gestation supérieurs pour les embryons frais, avec un taux de gestation de 43,9% lors de l'utilisation d'embryons frais contre 36,8% pour des embryons congelés. Cette tendance a également été démontrée pour les embryons produits *in vitro* avec 39% de gestation lorsque l'embryon utilisé était frais contre 32,9% lorsqu'il était congelé. La figure 12 illustre cette tendance.

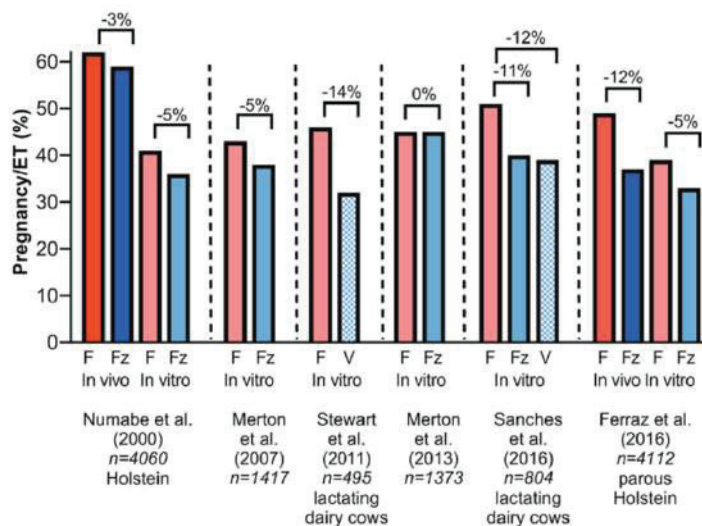


Figure 12 : Comparaison des taux de gestation selon les embryons produits *in vitro* ou *in vivo* et selon s'ils sont transférés frais (F), congelés (Fz) ou vitrifiés (V) Source : Hansen 2020.

III. Préparer une receveuse pour un transfert d'embryon

Lorsqu'un embryon a été sélectionné pour être transféré, il est indispensable que l'animal receveur soit prêt physiologiquement à recevoir cet embryon. L'embryon doit donc pouvoir effectuer sa nidation et poursuivre son développement permettant une gestation et aboutissant à une naissance. Les causes de mortalité embryonnaire sont multiples. Elles peuvent être liées à l'animal, à la conduite d'élevage ou encore à l'environnement. C'est pourquoi il est indispensable de connaître ces causes et de les maîtriser afin d'optimiser les chances de réussite d'un transfert.

1. Les facteurs liés à l'animal receveur

a. La parité

La parité est un facteur important, souvent pris en compte dans les études. Nombreuses sont les études qui mettent en avant l'intérêt de sélectionner des génisses comme receveuses. Le tableau 5 expose ainsi les résultats de plusieurs études, où les taux de gestation étaient meilleurs lorsque des nullipares, ou génisses, étaient utilisées en tant que receveuses.

Taux de gestation (%)			Sources	
Nullipares	Primipares	Multipares		
42,0 ^a	37,8 ^b	31,6 ^c	n = 10397	(Ferraz et al., 2016)
45,56 ^a	30,77 ^b		n = 495	(Xie et al., 2024)
70,5 ^a	52,8 ^b		n = 7456 (embryon frais)	(Hasler, 2001) ^d
60,9 ^a	47,1 ^b		n = 3995 (embryon congelé)	
71,4 ^a	51,5 ^b		n = 5510 (étude 1)	(Hasler, 2006)
77,5 ^a	56,6 ^b		n = 5869 (étude 2)	

Tableau 5: Effet de la parité sur les taux de gestation.

^{a,b,c} : signification statistique entre exposants différents dans la même ligne, ^d : étude avec distinction embryon frais/congelé
n = nombre d'embryons transférés dans chaque étude

En vert sont représentés les meilleurs résultats de chaque étude, et en rouge, les moins bons.

L'étude de Hasler (2001) a également permis d'observer cette tendance quel que soit le type d'embryon utilisé, frais ou congelé. Ainsi, que l'embryon soit frais ou non, les receveuses génisses semblent présenter des taux de gestation significativement plus élevés que les vaches.

Pourtant, choisir une vache laitière en tant que receveuse peut paraître un choix judicieux. En effet, une receveuse étant déjà en lactation possède un historique lié à son niveau de fertilité et sa facilité de vêlage. En effet, son bassin ainsi que sa filière pelvienne sont déjà développés (Broadbent et al., 1991; Lamb & Mercadante, 2014). Toutefois, malgré ces avantages, les vaches semblent offrir moins de garantie de succès à la suite d'un transfert embryonnaire. Plusieurs facteurs semblent pouvoir expliquer les difficultés des vaches laitières à mener à bien une gestation à l'issue d'une transplantation embryonnaires. Ces difficultés sont, entre autres, le niveau de production laitière, le stress associé à ce niveau de production et la présence de maladies péri-partum.

(1) La production laitière

La production laitière semble avoir un impact important sur la capacité à mettre en place une gestation à l'issue d'un transfert embryonnaire chez la receveuse. En effet, dans leur étude, Vasconcelos et al. (2006) ont observé que les animaux avec une production laitière élevée ont une probabilité plus faible de gestation et une probabilité plus haute de perte embryonnaire.

(2) Les affections péri-partum

Les maladies péri-partum regroupent de nombreuses affections. Il est en particulier possible de citer les affections liées au vêlage (dystocies), les rétentions placentaires ou encore les métrites. Ces affections présentes chez les vaches primipares ou multipares, semblent affecter les taux de gestation à l'issue d'un transfert embryonnaire. Dans le cas de problèmes liés au vêlage, les taux de gestation baissent de 4%, passant de 36,5% à 32,6% de gestation. De même, lors de la présence de métrites, les taux de gestation baissent de 35,7% à 30,2% (Ferraz et al., 2016). Les métrites seraient associées à une baisse de la survie embryonnaire et fœtale. En effet, ces affections peuvent entraîner des lésions utérines, affectant la placentation et donc la mise en place et le maintien d'une gestation (Ribeiro et al., 2013).

b. Race

La majorité des études partage le même consensus selon lequel la race ne semble pas être un facteur influençant la réussite d'un transfert embryonnaire. Dans leur étude Xie et al. (2024) ont comparé la race Holstein à d'autres races non spécifiées. Les taux de gestation après transfert ne présentaient pas de différence significative en fonction de la race.

c. Cyclicité et synchronisation

Pour rappel, plusieurs follicules débutent leur développement au cours de chaque cycle mais seul un de ces follicules réussira à se développer, pour aboutir à l'ovulation. À l'issue de cette ovulation, sous contrôle hormonal, ce follicule deviendra un CJ produisant de la progestérone. Les protocoles de synchronisation permettent de contrôler le cycle d'une receveuse afin de s'assurer que le transfert embryonnaire (TE) s'effectue au meilleur moment du cycle.

De plus, dans le cas de transferts d'embryon à l'état frais, il est indispensable que la receveuse soit cyclée et synchronisée avec la donneuse. En effet, l'embryon doit pouvoir se développer et s'implanter dans un milieu propice, ce qui implique que la receveuse soit dans la bonne phase du cycle sexuel. Ainsi, les protocoles de synchronisation permettent, comme leur nom l'indique, de synchroniser les receveuses et les donneuses afin que celles-ci expriment leurs chaleurs dans la même période. Si les embryons sont congelés, la receveuse doit seulement être dans la phase du cycle où l'embryon peut se développer et s'implanter. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire que la receveuse soit synchronisée avec la donneuse.

(1) Sélection des receveuses à synchroniser

Avant de débiter un protocole de synchronisation, il est important de savoir sélectionner les animaux qui y participeront. Le choix des receveuses doit se porter sur des animaux ayant déjà ovulé, et donc étant déjà cyclés. Dans leur étude, Stroud & Hasler (2006) ont étudié l'impact de la cyclicité des animaux sur les taux de gestation. Ils ont utilisé des protocoles de synchronisation avec implant de progestérone pour cycliser les animaux. Il s'agissait de génisses prépubères, de génisses pubères, de vaches en post-partum et de vaches ayant repris une cyclicité après la mise-bas. Les génisses prépubères ou les vaches en post-partum, recevant un implant, ont pu présenter des chaleurs et ovuler, mais leurs taux de gestation étaient inférieurs à ceux des receveuses ayant déjà manifesté des chaleurs et étant déjà cyclées. La figure 13 illustre cette tendance. Pour garantir une bonne fertilité chez les génisses, il est nécessaire qu'elles aient eu et exprimé deux à trois œstrus (Ennuyer & Laummonier, 2013).

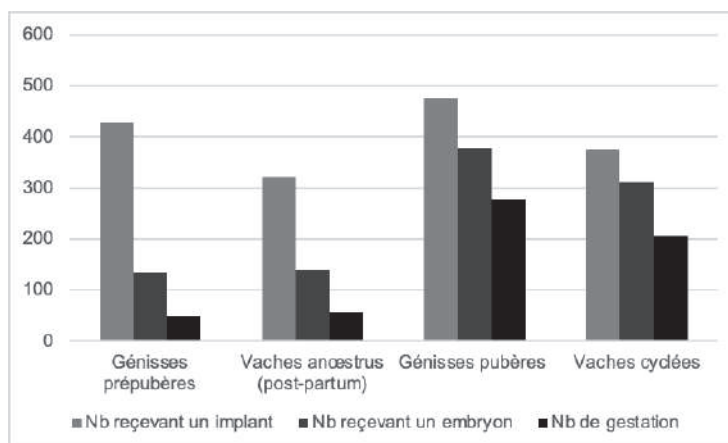


Figure 13 : Représentation du nombre de gestation selon la cyclicité des animaux sélectionnés pour un transfert embryonnaire.
Source : Stroud, Hasler 2006.
Nb = nombre d'animaux

(2) Protocoles hormonaux de synchronisation

(a) Objectifs des protocoles de synchronisation

L'objectif principal des protocoles est la synchronisation des chaleurs de plusieurs femelles. Cette synchronisation permet de maîtriser les cycles sexuels des femelles receveuses. Ces protocoles permettent donc de contrôler la croissance folliculaire, l'ovulation et la régression du CJ.

Il existe de nombreux protocoles dans le cadre de la maîtrise des cycles sexuels des bovins femelles. Ces protocoles sont utilisés pour synchroniser les chaleurs, dans le but de maîtriser le moment le plus opportun pour la réalisation d'une IA.

Toutefois, dans le cadre de TE, il n'y pas d'IA. Mais ces protocoles permettent d'obtenir plusieurs femelles dans la même phase du cycle œstral. Ainsi, il est possible de connaître le moment le plus opportun pour implanter un embryon. Différentes hormones sont souvent combinées afin de potentialiser la synchronisation du cycle œstral des animaux.

(i) Utilisation de la GnRH

La GnRH, pour rappel, est une hormone hypothalamique qui permet la libération des hormones sexuelles LH et FSH au niveau de l'adénohypophyse. Cette hormone est utilisée dans les protocoles pour synchroniser les vagues folliculaires et les ovulations de plusieurs animaux. Cette injection de GnRH provoque un pic de LH pré-ovulatoire, permettant l'ovulation, et induit une nouvelle vague folliculaire (Kesler, 2005). Selon les protocoles, il peut y avoir une injection unique, ou plusieurs, en association avec d'autres hormones.

(ii) Utilisation de la PGF2 α

La PGF2 α est une hormone lipidique largement utilisée dans le cadre de la gestion des cycles sexuels, en permettant la lyse du ou des CJ en place. Toutefois, il est important de connaître le stade du cycle auquel se trouvent les animaux. En effet, le CJ est réceptif à la PGF2 α uniquement entre les jours 8 et 17 du cycle œstral (Islam, 2011).

(iii) Utilisation des implants de progestérone

La progestérone est utilisée dans les protocoles de synchronisation sous forme d'implants imprégnés de progestérone. Ces dispositifs sont insérés par voie vaginale pendant environ 7 jours et permettent de mimer une phase lutéale, empêchant ainsi l'ovulation.

(b) Les différents protocoles

♦ Injection seule de PGF2 α (figure 14) :

Ce protocole est composé d'une seule injection de PGF2 α . Il nécessite de savoir quand ont eu lieu les dernières chaleurs afin d'effectuer l'injection en dehors de la phase réfractaire du CJ à la PGF2 α (Kesler, 2005).

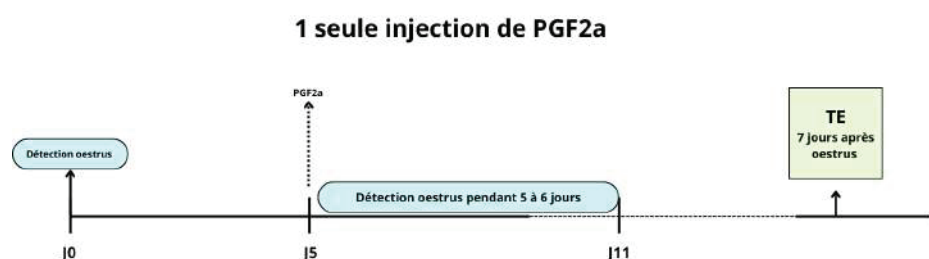


Figure 14 : Protocole nécessitant une unique injection de PGF2 α . Source : Kesler, 2005

♦ Injection de PGF2 α + progestérone (figure 15) :

L'injection de PGF2 α est cette fois précédée par la mise en place d'un implant vaginal de progestérone pendant 7 jours. Cet implant permet de s'affranchir de la phase du cycle dans laquelle se trouve la femelle lors du début du protocole parce qu'il mime la phase lutéale (Karisch & Parish, 2024).

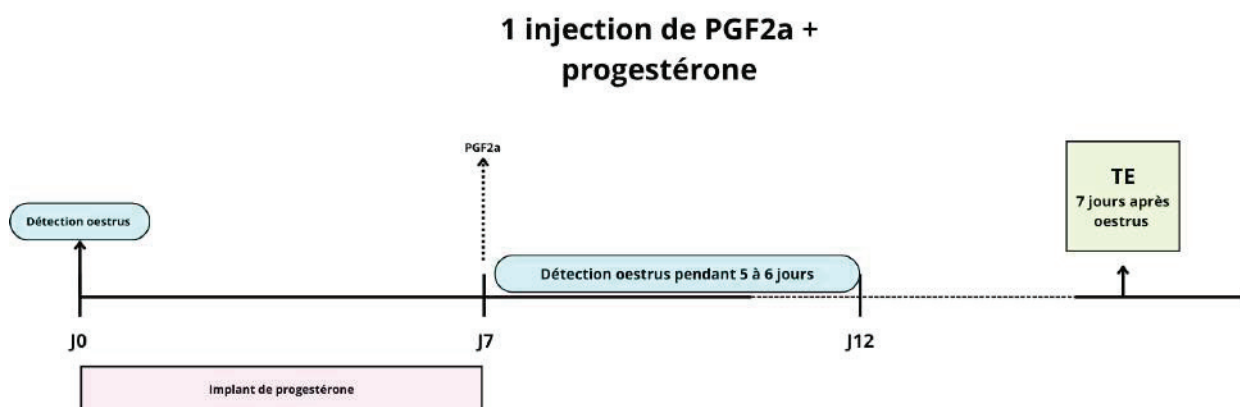


Figure 15 : Protocole nécessitant une injection de PGF2 α . et l'utilisation d'un implant. Source : Karisch & Parish, 2024

♦ **Select-Synch (figure 16) :**

Ce protocole repose sur une injection de GnRH, afin de provoquer l'ovulation de la vague folliculaire en cours, *via* la libération d'un pic de LH provoqué par la GnRH. Puis, une injection de PGF2 α est réalisée, 7 jours plus tard pour provoquer la lyse du CJ et permettre ainsi l'apparition des chaleurs et l'ovulation. Ce protocole nécessite une observation des chaleurs entre le 6^{ème} et le 12^{ème} jour (Kesler, 2005).

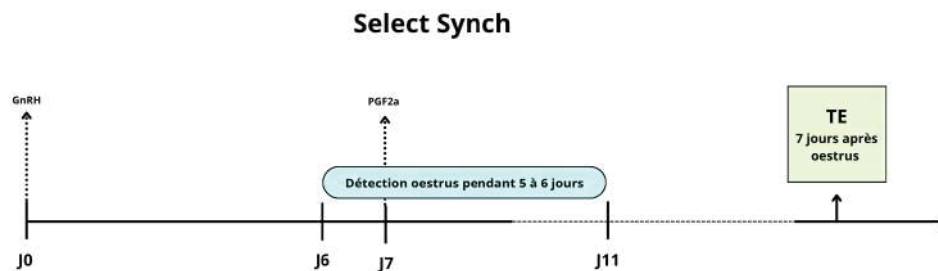


Figure 16 : Protocole Select Synch. Source : Kesler, 2005

♦ **Select-Synch + progestérone (figure 17) :**

Le protocole Select-Synch peut être modifié, avec l'ajout d'un implant de progestérone durant 7 jours, au même moment que l'injection de GnRH. L'ajout de l'implant permet de mimer la phase lutéale et ainsi de s'assurer qu'au retrait de l'implant une vague folliculaire est en cours et que l'utérus est dans la bonne phase du cycle. Cette durée de pose peut varier entre 5 à 7 jours selon les utilisateurs (Karisch & Parish, 2024).

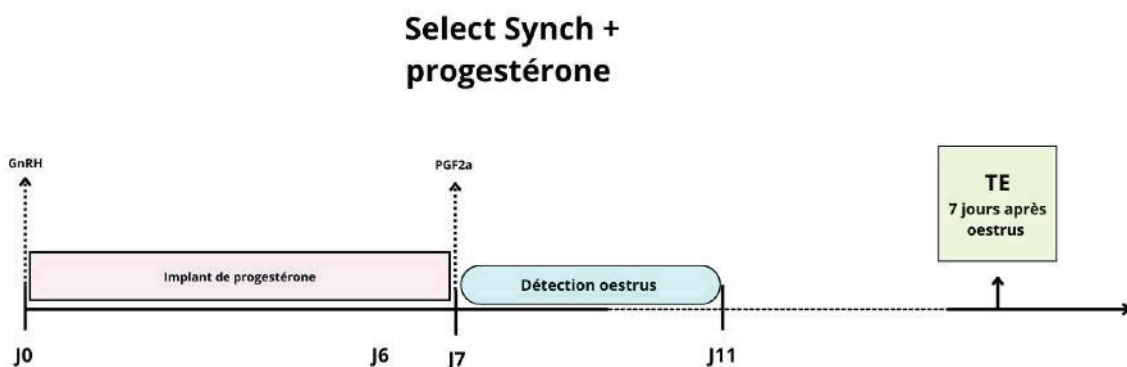


Figure 17 : Protocole Select Synch et utilisation d'un implant. Source : Karisch & Parish, 2024

♦ **CO-Synch = OV-Synch (figure 18):**

Ce protocole se base sur le protocole Select-Synch, mais une injection supplémentaire de GnRH est effectuée environ 2 jours après l'injection de PGF2 α . Cette injection permet de connaître le moment précis de l'ovulation (Kesler, 2005).

Co-Synch

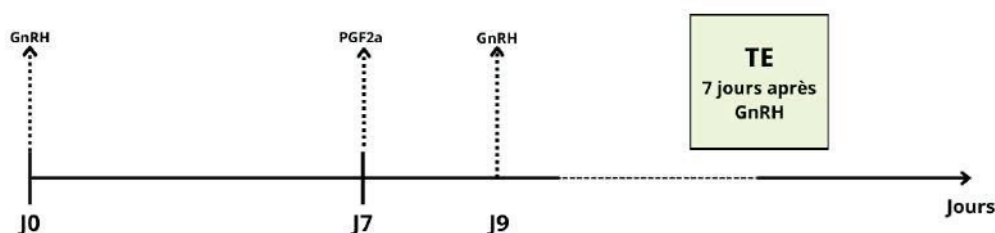


Figure 18 : Protocole CO-Synch ou OV-Synch. Source : Kesler, 2005

♦ **CO-Synch + progestérone (figure 19) :**

Comme précédemment, le protocole décrit ci-avant peut être modifié par la mise en place d'un implant de progestérone. La mise en place de cet implant permet de mimer une phase lutéale et, ainsi, de provoquer une chute de progestérone lors du retrait. Cet implant permet de s'abstenir de l'observation des chaleurs (Karisch & Parish, 2024).

Co-Synch + progestérone

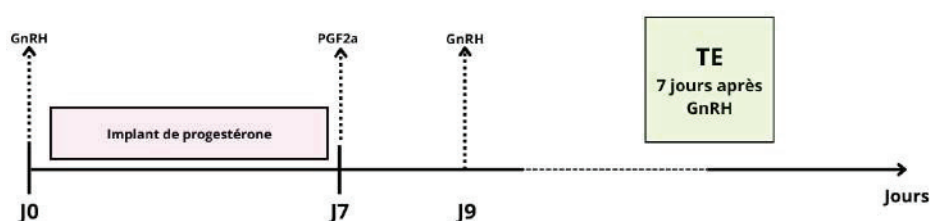


Figure 19 : Protocole CO-Synch avec implant. Source : Karisch & Parish, 2024

D'autres variantes de ce protocole peuvent exister. Ainsi l'étude menée par Bonacker et al. (2020) a comparé deux protocoles largement utilisés, tous deux basés sur l'utilisation d'un implant de progestérone. Seul le temps de pose de celui-ci différait entre les 2 protocoles, de même que l'un des deux protocoles requérait l'administration de PGF2 α le jour de la pose de l'implant. Ces deux protocoles sont détaillés ci-dessous.

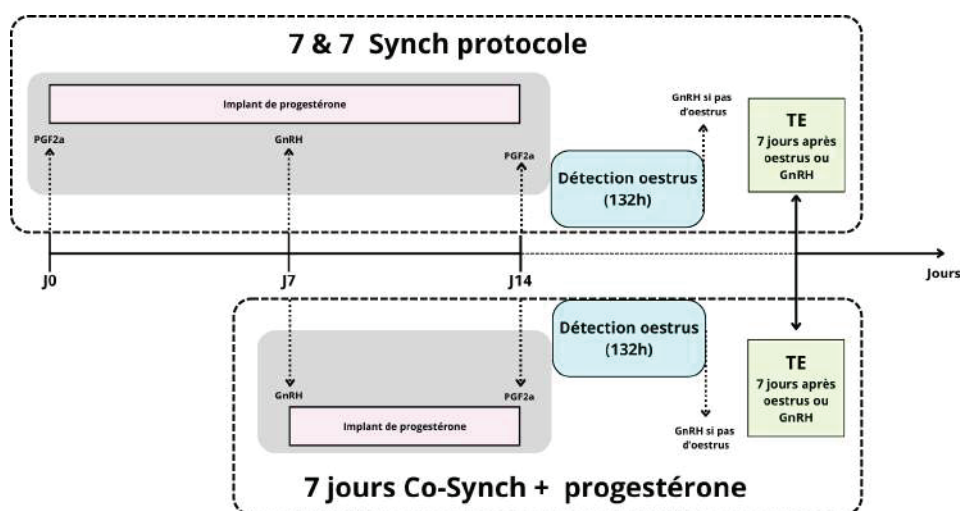


Figure 20 : représentation graphique des deux protocoles, d'après (Bonacker et al. 2020)

J0 représente le premier jour du protocole avec une injection de prostaglandines (PGF2 α) et la pose d'un implant de progestérone. Cet implant est laissé pendant 14 jours. A J7, une injection de GnRH est effectuée dans les deux protocoles. De plus, cette injection est accompagnée de la pose de l'implant dans le second protocole, pour une durée de 7 jours. A J14, l'implant est retiré et une injection de PGF2 α est réalisée, dans les deux protocoles. La suite est identique dans les deux protocoles, les chaleurs sont observées deux fois par jour pendant 132h après le retrait des implants. Si aucune chaleur n'a été vue, une injection de GnRH est effectuée. La transplantation embryonnaire a lieu 7 jours après l'observation des chaleurs, ou à défaut, après l'injection de GnRH.

D'après cette étude, le protocole 7 & 7 permettrait d'obtenir une meilleure réponse œstrale, c'est-à-dire des receveuses manifestant mieux leurs chaleurs. En effet, 86% des receveuses ont manifesté des chaleurs dans le cadre de ce protocole, contre 76% dans le cadre du second protocole. De plus, ce premier protocole permettrait d'obtenir un taux d'utilisation des receveuses plus élevé. En effet, avant le transfert les receveuses ont été évaluées par palpation transrectale et/ou par échographie par un vétérinaire expérimenté. N'ont alors été sélectionnées que les receveuses présentant un CJ actif sur l'un de leurs ovaires. Ainsi, 76% des receveuses traitées avec les premiers protocoles ont été sélectionnées contre 65% avec le second protocole. Et enfin, les taux de gestation étaient significativement plus élevés avec ce protocole (40% contre 34%).

Le tableau 6 reprend les principales caractéristiques des différents protocoles ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. La plupart des études montrent l'importance de l'utilisation d'implants de progestérone. En effet, les résultats semblent sensiblement plus élevés avec utilisation d'un implant. Toutefois, rares sont les études

comparant l'ensemble des protocoles. Il est donc difficile d'indiquer quel protocole prime sur l'autre afin d'augmenter les chances de réussite d'un transfert d'embryon.

	Durée du traitement (en jours)	Induction cyclicité / ovulation	Avantages	Inconvénients	Taux de gestation	Sources
Injection PGF2α seule	1	Très faible	Coût très faible Peu de manipulation	Pas de cyclicité Dépend de la détection des chaleurs en amont et en aval	Génisses allaitantes : • Prépubères : 6% • Cyclées : 19% Génisses laitières : 37%	(Kesler, 2023)
PGF2α + implant (7jours)	7	Bonne	Induction cyclicité Coût moyen	Détection des chaleurs nécessaire Coût plus élevé	Génisses allaitantes : • Prépubères : 28% • Cyclées : 49% Génisses laitières : 45%	(Kesler, 2023)
Select-Synch	7	Faible	Coût faible Peu de manipulation	Détection des chaleurs nécessaire	Génisses allaitantes : 52% (n=213) Vaches et génisses : 45%	(Funston et al., 2004) (Patterson et al., 2001)
Select-Synch + implant	7	Bonne	Induit une cyclicité Détection des chaleurs non nécessaire	Coût élevé Plus de manipulation	Groupe : 1 : 59,6% 2 : 48,0% 3 : 45,4% 4 : 52,2% 5 : 38,0% Global : 49,4%	(Esterman et al., 2016)
CO-Synch	9	Bonne	Induction cyclicité et de l'œstrus	Coût plus élevé	Lieux : 1 : 52% 2 : 54% 3 : 38% 4 : 53%	(Lamb et al., 2001)
CO-Synch + implant	9	Très bonne	Bonne synchronisation entre les individus Détection des chaleurs non nécessaire	Coût élevé Plus de manipulations	Lieux : 1 : 43% 2 : 66% 3 : 51% 4 : 71% Groupe : 1 : 63,1% 2 : 52,0% 3 : 37,5% 4 : 37,5% 5 : 31,8% Global : 47,1%	(Lamb et al., 2001) (Esterman et al., 2016)

Tableau 6 : Résumé des principales caractéristiques de chaque protocole de synchronisation des chaleurs.

Lieux : une des quatre stations expérimentales de l'étude

Groupe : répartition des animaux par groupes selon leur rang de lactation de la manière suivante : groupe 1 et 3 :

uniquement des multipares, groupe 2 : 93 primipares et 39 multipares, groupe 4 : 26 primipares et 68 multipares et groupe

5 : 12 primipares et 35 multipares.

(2) Synchronisation entre donneuse et receveuse

Comme dit précédemment, l'objectif des protocoles de synchronisation est, d'une part, de synchroniser les animaux receveurs entre eux afin qu'ils soient tous dans la même phase du cycle et, d'autre part, de synchroniser les receveuses avec les donneuses afin que l'embryon soit implanté lors de la bonne phase du cycle. Cependant, receveuses et donneuses doivent être synchronisées entre elles seulement si l'embryon est implanté frais. S'il s'agit d'un embryon congelé, il faut qu'il soit implanté dans la bonne phase du cycle.

Le début du cycle est caractérisé par la manifestation des chaleurs, pour les receveuses et les donneuses. Un décalage de 30 heures entre celles-ci ne semble pas affecter significativement les taux de gestation. Toutefois, dans leur étude Rodrigues et al. (2018) ont montré une légère amélioration des résultats de gestation lorsque la receveuse exprime l'œstrus jusqu'à 1 jour avant la donneuse, avec une augmentation de la fertilité plus importante lorsque la receveuse exprime un œstrus 6 heures avant la donneuse.

Lors du transfert, si l'embryon est congelé, il est important d'avoir pris connaissance de différents éléments tels le stade de l'embryon, la date des chaleurs de la donneuse (pour déterminer le jour de vie de l'embryon) et la date des chaleurs des receveuses. Ces critères permettent de juger si la phase du cycle de la receveuse est en accord avec le stade de développement de l'embryon.

(3) Manifestation des chaleurs

A l'issue d'un protocole de synchronisation, les femelles receveuses d'embryons doivent donc se trouver en œstrus ou, à défaut, l'ovulation doit avoir été induite à l'aide d'une injection de GnRH, avant de recevoir un embryon. Toutefois, l'observation avérée des chaleurs des receveuses semble être un point important pour la réussite du transfert embryonnaire. Le tableau 7 montre des taux de gestation plus élevés lorsque les animaux expriment des chaleurs à l'issue d'un protocole de synchronisation. De plus, les résultats semblent mettre en avant qu'une manifestation des chaleurs permet de diminuer la mortalité embryonnaire avec des pertes embryonnaires qui semblent plus faibles.

Sources	Taux de gestation (%)	
	Expression des chaleurs	Non expression des chaleurs
(Madureira et al., 2022) Expérience 1 (n=914) Expérience 2 (n=487)	41,0 ±3,3 41,3 ±2,2 (forte) 32,7±2,7 (moyenne)	31,5 ±2,9 11,3 ±3,5
(Pereira et al., 2016) (n=2003) A 32 jours À 60 jours Perte de gestation	46,2 37,5 18,6	32,7 25,1 22,7
(Frade et al., 2014) (n= 236)	62,4	47,0

Tableau 7: Effet de l'expression des chaleurs sur les taux de gestation dans plusieurs études.

n = nombre de receveuses dans l'étude

Les meilleurs résultats de chaque étude sont représentés en vert, et les moins bon en rouge.

Dans leur étude, Marques et al. (2020) ont mis en évidence l'intérêt de l'utilisation de colliers détecteurs de chaleurs dans le cadre de TE. En effet, dans les études, 1244 animaux ont été divisés en 2 lots, le premier constituant le groupe témoin (où les chaleurs étaient observées bi-quotidiennement) et le groupe 2, le groupe avec le dispositif de détection des chaleurs. Le dispositif a permis l'obtention de taux de gestation plus élevés. Les résultats sont représentés dans le tableau 8. Ce dispositif permettrait d'améliorer la synchronisation entre le stade du cycle œstral de la receveuse et l'embryon transféré, augmentant donc la fertilité de la receveuse.

Taux de gestation (%)	Groupe contrôle		Groupe avec dispositif	
	1 ^{er} service	2 ^{ème} service	1 ^{er} service	2 ^{ème} service
Taux de gestation entre 33 et 42 jours	27,8 ±2,9	36,5±4,1	38,2±3,1	40,5 ±4,3
Taux de gestation à 95 jours	21,2 ±2,7	25,2±3,7	32,1±3,1	33,9 ±4,2
Perte de gestation	21,0±5,2	29,2 ±6,6	14,1 ±3,6	15,4±5,0

Tableau 8: Taux de gestation en fonction du type de détection de chaleurs, d'après (Marques et al., 2020)

1^{er} service = la première tentative de TE ; 2^{ème} service = animaux recevant un deuxième embryon après un premier échec lors du 1^{er} transfert.

En rouge sont représentés les moins bons résultats de gestation et la plus forte perte de gestation, tandis qu'en vert sont exprimés les meilleurs résultats de gestation et le plus faible taux de perte de gestation.

(4) Le corps jaune : une structure à évaluer

Afin de sélectionner les femelles prêtes à recevoir un embryon, il est indispensable de vérifier la présence d'un corps jaune et de l'évaluer. Pour rappel, un CJ est un tissu endocrine issu du follicule après l'ovulation. Il sécrète la progestérone, hormone nécessaire à l'établissement et au maintien de la gestation. Pour évaluer un corps jaune, les critères pris en compte sont : la taille, la présence d'une cavité centrale ainsi que la taille de celle-ci (Thomson et al., 2021).

La taille du corps jaune a longtemps été considérée comme étant un facteur de réussite pour un TE. Tous les auteurs ne semblent pas s'accorder sur l'influence de la taille du corps jaune sur les taux de gestation. En effet, l'étude de Xie et al. (2024) semble montrer une influence significative de la taille de ce CJ sur les taux de gestation. Toutefois, d'autres études récentes ont observé que la taille du corps jaune n'avait pas d'impact significatif sur les taux de gestation. Les résultats de ces études sont exposés dans le tableau 9.

Taille du corps jaune	Taux de gestation		Sources
15-20 mm (n=25) 20-25 mm (n=52) >25 mm (n=10)	36,0 % 46,2 % 40,0 % p>0,05		(Say et al., 2021)
< 3.0 ml (n=239) 3,0 – 4,2 ml (n=180) >4.18 ml (n=65)	66,0 % 62,0 % 65,0% p=0,2		(Thomson et al., 2021)
<5 cm ³ (n=316) 5-10 cm ³ (n=102) >10 cm ³ (n=77)	39,6 % 43,1% 61,0 % p<0.05		(Xie et al., 2024)
< 3cm ² (2,6 ± 0,01 ; n= 317) 3-4 cm ² (3,4±0,01 ; n= 610) >4 cm ² (4,7 ± 0,03 ; n= 538)	À 30 jours	À 90 jours	(Santos et al., 2023)
	50,5 %	46,4 %	
	49,0% 46,1 % p=0,39	45,2% 41,8 % p=0,37	

Tableau 9 : Impact de la taille du corps jaune sur les taux de gestation.

n = nombre de receveuses dans chaque étude

mm : taille du diamètre le plus large du corps jaune en millimètres ; *ml* : volume du corps jaune en millilitres.

Les meilleurs résultats de chaque étude sont représentés en vert et les moins bon en rouge.

Siqueira et al. (2009) ont conclu, dans leur étude, que la taille du corps jaune et son apparence échographique semblent être des critères peu fiables pour prédire les taux de gestation chez des receveuses. Pour Pugliesi et al. (2019a), seules les receveuses avec des CJ de taille extrême doivent être écartées du protocole de TE. Il s'agit des CJ de moins de 2 cm² ou plus de 6 cm².

Enfin, la localisation du corps jaune, sur l'ovaire gauche ou l'ovaire droit, ne semble pas avoir d'impact sur les taux de gestation (Santos et al., 2023; Thomson et al., 2021).

(a) Cas particuliers des corps jaunes cavitaires

Les corps jaunes cavitaires sont des corps jaunes particuliers. Il s'agit d'un tissu lutéal entourant une cavité remplie de liquide. Ils se différencient des kystes lutéaux

par la taille de leur paroi (supérieure à 5 voire 10 mm) et par la taille de leur cavité (inférieure à 25mm). Ils ont longtemps été considérés comme pathologiques mais sont totalement physiologiques. La figure 21 illustre un corps jaune cavitare.

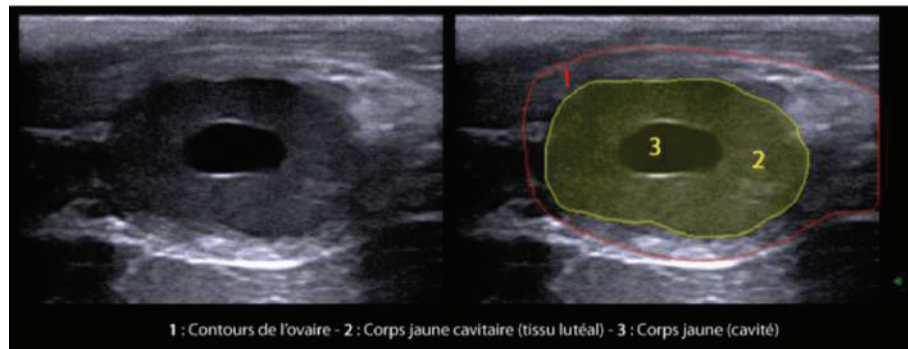


Figure 21 : image échographique d'un corps jaune cavitare, d'après (Julia, Taveau 2013).

Les auteurs semblent se contredire quant à l'impact de ces CJ sur les taux de gestation. D'après Thomson et al. (2021), ce type de CJ n'a aucun impact significatif sur les taux de gestation comparativement aux CJ homogènes avec respectivement 62% de gestation et 61,9% (n=1075 et p=0,10). Dans leurs études, Xie et al. (2024) et Karischt et Parish (2024) ont observé une différence significative sur les taux de gestation. En effet, les CJ cavitaires semblent induire des taux de gestation dégradés avec 39,68% de gestation, contre 44,44% lors de CJ homogènes (n=495, p<0,05). Enfin, Jaśkowski et al. (2022) ont estimé dans leur étude que les CJ cavitaires permettent d'obtenir des taux de gestation significativement plus élevés (47,7% contre 29,9%, n= 432, p<0,0001).

(b) Perfusion lutéale et image échographique

L'échographie Doppler est une nouvelle technologie permettant d'obtenir plus d'informations concernant la perfusion sanguine du CJ. Cette perfusion sanguine est le reflet de la vitalité du CJ.

Plusieurs auteurs ont évalué les corps jaunes en leur affectant un degré de perfusion sanguine. Ainsi, trois seuils ont été mis en place :

- ◆ Moins de 40% de perfusion : faible niveau de perfusion sanguine, corrélée avec de faibles taux de gestation ;
- ◆ Entre 45 et 50% de perfusion : niveau de perfusion moyen, corrélé avec des taux de gestation plus élevés ;
- ◆ Plus de 55% de perfusion : haut niveau de perfusion sanguine, corrélé avec de forts taux de gestation.

A l'aide de ces seuils, il est possible de prédire la capacité d'une receveuse à recevoir un embryon et à mener une gestation à terme (Pinaffi et al., 2015; Pugliesi et al., 2018). Pugliesi et al. (2018) ont obtenu des résultats de gestation augmentant avec une meilleure perfusion : 41,5% pour une perfusion, à moins de 40%, 55,9% pour une perfusion allant de 45 et 50% et 62,3% pour une perfusion supérieure à 55%.

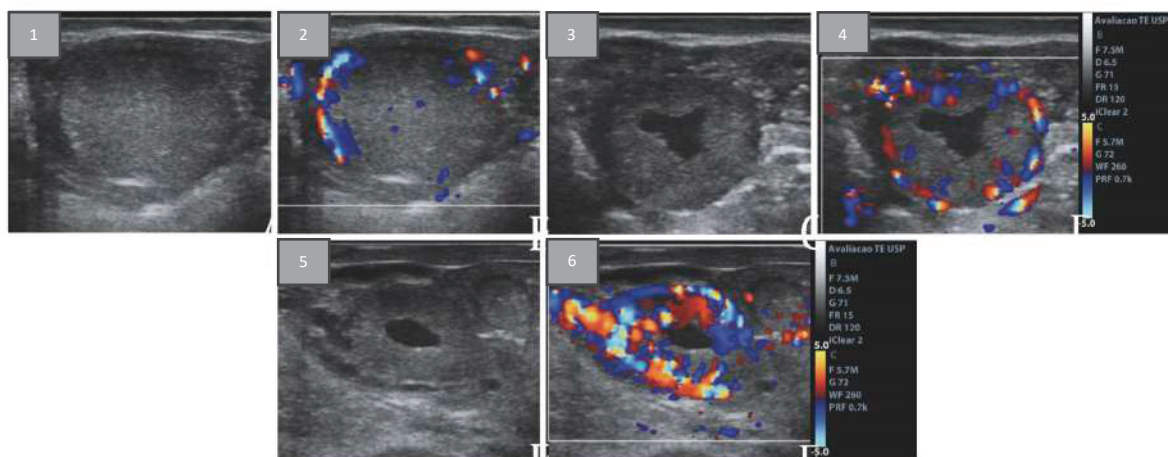


Figure 22 : représentation des différents seuils de perfusion sanguine d'un corps jaune. Source : Pugliesi et al., 2018

Images 1, 3 et 5 : images de corps jaune en échographie conventionnelle. **Images 2, 4 et 6** : images de ces mêmes corps jaunes en échographie Doppler, avec respectivement des perfusions faible (<40% de perfusion), moyenne (45 à 50% de perfusion) et haute (>55% de perfusion).

De plus, Pugliesi et al. (2019b) ont suggéré de ne sélectionner que les receveuses avec une perfusion sanguine de corps jaune supérieure à 40%. Cela permettrait d'éliminer les receveuses ayant le moins de chance de mener une gestation à terme. Enfin, si le nombre de receveuses aptes à recevoir un embryon est important et supérieur au nombre d'embryons disponibles, ils suggèrent de sélectionner les receveuses avec la meilleure perfusion sanguine, soit supérieures à 45% de perfusion, afin d'optimiser les chances de gestation.

(c) Conclusion sur les corps jaunes

Ainsi, concernant le corps jaune, la taille ne semble pas être un critère très sélectif. Seuls les corps jaunes de tailles extrêmes, c'est-à-dire très petits (moins de 2cm²) ou très grands (plus de 6 cm²) sont à proscrire. Enfin, évaluer la vascularisation grâce à l'échographie Doppler permet d'obtenir une meilleure valeur pronostique quant à la capacité de la receveuse à démarrer une gestation à la suite d'un TE.

(5) Concentration plasmatique de progestérone

La progestérone est, pour rappel, une hormone qui permet la mise en place et le maintien de la gestation. Elle est sécrétée par le corps jaune dans un premier temps, puis le placenta prend le relai à partir du 6^{ème} mois de gestation environ chez la vache. Cette hormone est indispensable pour permettre la gestation. En effet, l'une des principales causes de mortalité embryonnaire précoce est une faible concentration plasmatique de progestérone dans le sang, lors des premières semaines de gestation (Pugliesi et al., 2019a). Cette sécrétion de progestérone, par le CJ, favorise en effet la sécrétion de l'interféron Tau par l'embryon, ce qui bloque la production de PGF2 α par l'utérus, permettant ainsi la reconnaissance maternelle de la gestation (Mann & Lamming, 2001).

Le rapport entre le taux de gestation et la concentration plasmatique en progestérone est un sujet qui reste très controversé. Les auteurs ne semblent pas en accord sur le lien possible qu'il pourrait y avoir entre gestation et concentration plasmatique de progestérone.

Chagas e Silva et al. (2002) ont ainsi observé, dans leur étude, une tendance mais sans résultat significatif. En effet, la concentration plasmatique en progestérone semblait être plus élevée dans le cas de gestation, comme décrit dans le tableau 10. Il était également précisé que les animaux, avec un taux plasmatique en progestérone inférieur à 1 ng/ml avaient de faibles chances de démarrer une gestation après transfert.

Groupe	n	Concentration plasmatique en progestérone (ng/ml)			
		Œstrus (Jour 0)	Jour 4	Jour 7	Jour 21
Gestation	196	0,2 $\pm$ 0.01	1,0 $\pm$ 0.05	2,9 $\pm$ 0.08	6,0 $\pm$ 0.17
Non gestation	211	0,2 $\pm$ 0.02	0,9 $\pm$ 0.04	2,8 $\pm$ 0.08	1,5 $\pm$ 0.16
P-value		>0.05	>0.05	>0.05	<0.001

Tableau 10 : Rapport entre la concentration plasmatique en progestérone et la gestation. Source : Chagas e Silva et al., 2002.

n = nombre d'individus dans l'étude

Ainsi, sélectionner des receveuses d'embryons sur le taux de progestérone plasmatique le jour du transfert semble être d'une utilité limitée.

Néanmoins, le transfert d'embryons dans un utérus caractérisé par des concentrations plus élevées de progestérone (P4) est associé à une amélioration du développement embryonnaire, se traduisant par une augmentation significative du poids et de la taille dès le début de la phase fœtale. De ce fait, un taux de progestérone plus élevé aurait un impact plus important sur le développement fœtal que sur la mise en place de la gestation (Rabaglino et al., 2023).

2. Les facteurs liés à la conduite d'élevage

a. Alimentation et besoins des receveuses

L'alimentation semble être l'un des facteurs les plus importants qui jouent sur les performances de reproductions des bovins. En effet, les besoins des animaux ont un ordre de priorité bien défini (figure 23). Le cycle œstral ainsi que la mise en place de la gestation se trouvent ainsi être parmi les besoins les moins importants (Lamb & Mercadante, 2014). C'est la raison pour laquelle l'alimentation ne doit pas être négligée lorsque les animaux sont mis à la reproduction ou sélectionnés en tant que receveuses.

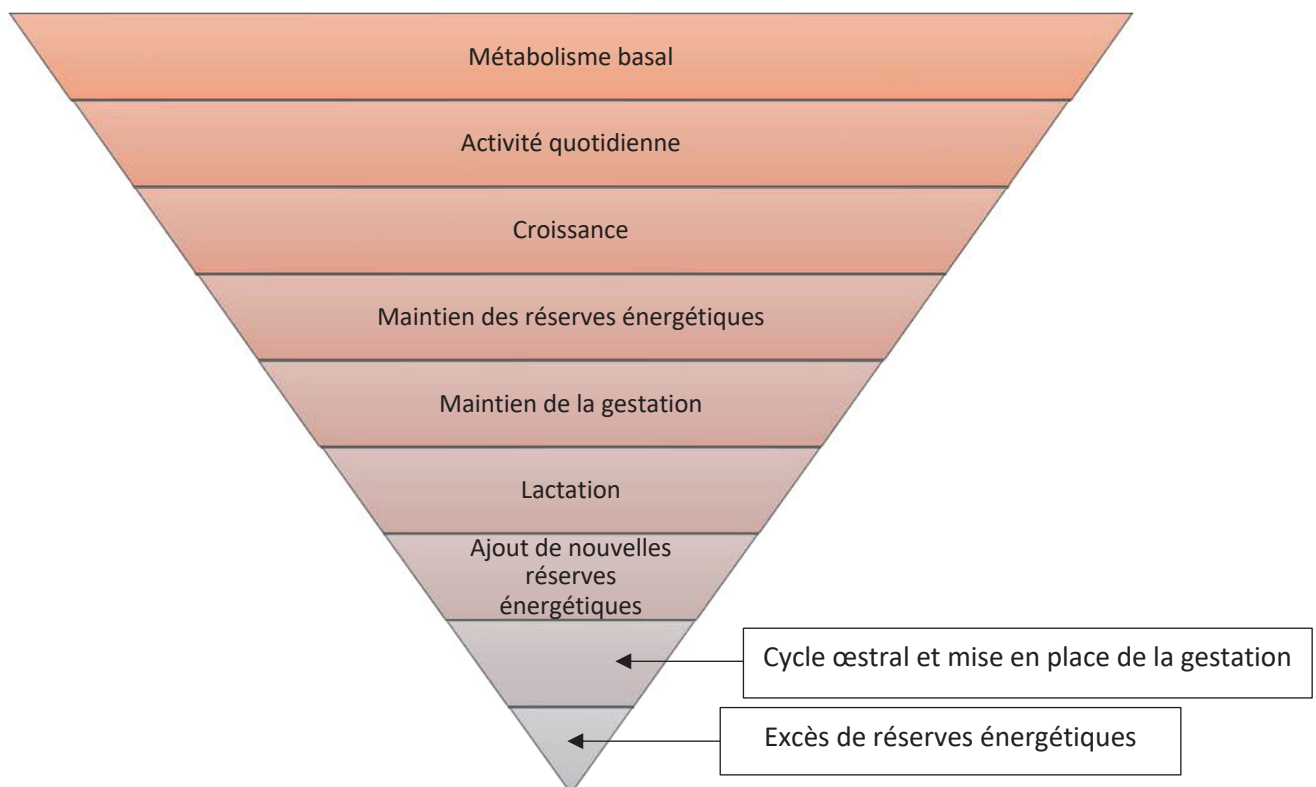


Figure 23 : répartition de la priorité des besoins des mammifères domestiques, d'après (Lamb, Mercadante 2014).

(1) Poids, score corporel des receveuses et gain de poids moyen quotidien

L'utilisation d'outils permettant de juger de l'état corporel des animaux est indispensable pour estimer l'équilibre nutritionnel. Cet état corporel est estimé visuellement et par l'attribution d'une Note d'État Corporel (NEC) ou Body Condition Score (BCS) à l'aide de grilles de notation allant de 0 (émaciation sévère) à 5 (sur-engraissement sévère) selon la grille d'Edmonson et al. (1989). La grille de notation se trouve en annexe 1.

Au moment du choix des receveuses dans un protocole de transplantation embryonnaire, il est important de juger cet équilibre nutritionnel de l'animal. Les changements d'ordre métabolique induits par la nutrition peuvent en effet affecter les paramètres liés à la reproduction, comme la production de progestérone, la santé utérine ou encore la survie embryonnaire (Daly et al., 2020). Les taux de gestation des receveuses avec un score corporel évalué à 2 ou 3 semblent significativement plus élevés (53% et 55% respectivement) que lorsque le score corporel est estimé à 1 (44%). Les animaux estimés à 4 ou plus ont des taux de gestation intermédiaires (47%).

Lorsque des vaches ayant déjà mis bas sont sélectionnées dans un protocole, il est important de suivre l'évolution de cette note. L'objectif est d'avoir des animaux à au moins 2,5 au moment du vêlage et au minimum à 2 au moment du transfert (Broadbent et al., 1991; Looney et al., 2006). De plus, il est important de s'assurer que la diminution de la NEC n'excède pas un point entre le vêlage et le pic de lactation. En effet, les animaux perdant plus d'un point de NEC ont une reprise de cyclicité plus difficile (ovulation et expression des chaleurs plus tardives, taux de conception moins bon). Ce suivi de NEC permet de s'assurer que la ration couvre les besoins, en particulier pour la production laitière, en plus des autres besoins. Toutefois, le poids initial de la receveuse, au moment de son intégration dans un protocole, ne semble pas être un critère affectant les taux de gestation (Brisson, 2003; Fernandes et al., 2016).

Lorsque des génisses sont utilisées en tant que receveuses, outre la NEC, la prise de poids de la receveuse est à prendre en compte pour s'assurer que la ration couvre bien les besoins de l'animal, notamment ses besoins en termes de croissance.

Cette prise de poids est caractérisée par le gain de poids moyen quotidien (GMQ). Ce GMQ dépend de l'âge de la receveuse et de l'objectif d'âge au vêlage. Il doit être maîtrisé dès le plus jeune âge de la génisse afin d'avoir un animal apte à la reproduction et à la production qui en découlera. En effet, la puberté survient lorsque les animaux ont atteint un certain poids vif, variable selon la race : 40 à 45 % du poids vif (PV), soit 250 à 280 kg pour des génisses Prim Holstein, les génisses Normandes sont pubères environ 2 mois plus tard et sont plus lourdes de 25 kg en moyenne et les génisses Montbéliardes lorsqu'elles ont atteint 50% de leur poids adulte (vers 15 mois). De plus, il est recommandé que la génisse ait atteint un minimum de 420 kg avant d'être mise à la reproduction (Ennuyer & Laummonier, 2013). Les courbes de prises de poids sont détaillées dans la figure 24 (Jussiau & Papet, 2015).

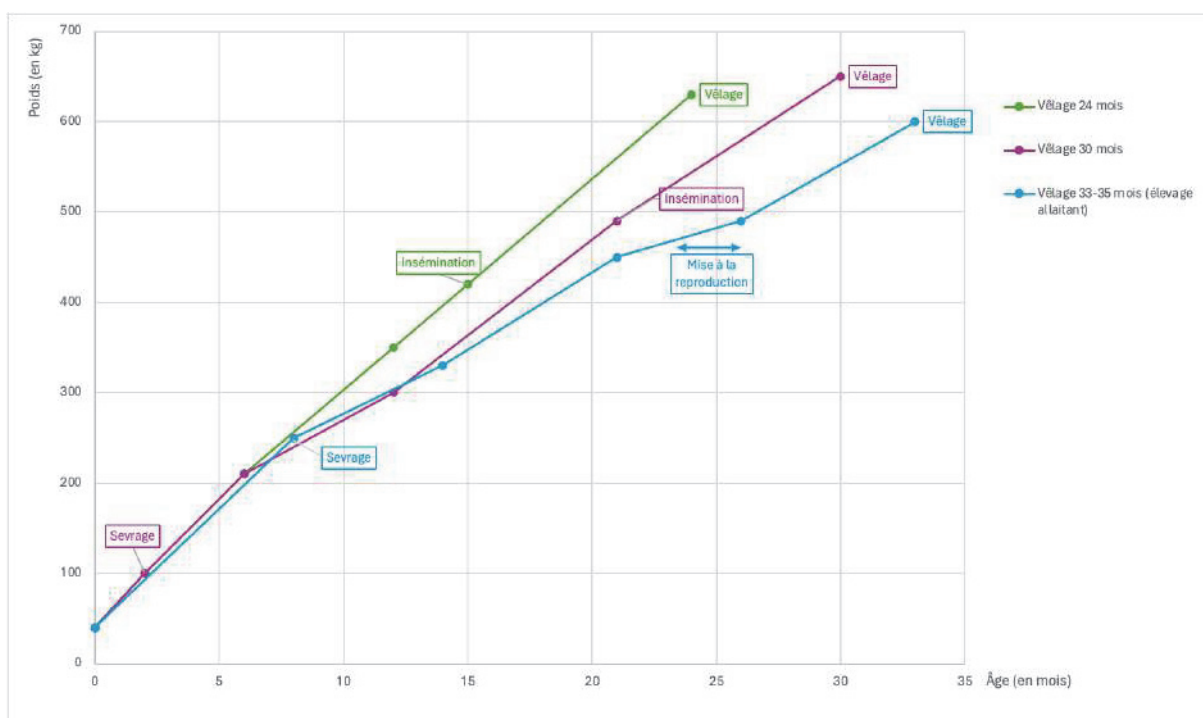


Figure 24 : Courbes d'évolution du poids vif des génisses en fonction de l'âge au vêlage, d'après Jussiau et Papet (2015).

Les génisses Prim Holstein ayant des croissances inférieures à 500g/j depuis leur naissance sont généralement moins bien cyclées à 15 mois (Ennuyer & Laummonier, 2013).

Ainsi, en fonction des objectifs de l'éleveur, il est indispensable de maîtriser la prise de poids quotidienne de la génisse afin qu'elle soit prête à recevoir un embryon,

mener sa gestation et assurer sa production (laitière ou l'élevage de son veau par la suite). Les objectifs de GMQ sont détaillés dans le tableau 11.

		De sevrage à six mois	De 6 mois à un an	D'un an à l'insémination ou mise à la reproduction
GMQ (en g/l)	Vêlage à 24 mois	900-950	700-750	900
	Vêlage à 30 mois	900-950	500	700
		De la naissance au sevrage	Du sevrage à 18-20 mois	De 18-20 mois à la mise à la reproduction
GMQ (en g/l)	Vêlage 33-35 mois (allaitant)	870	440-570	260

Tableau 11 : Objectif de GMQ selon l'âge et les objectifs de l'élevage d'après Jussiau et Pape (2015).

(2) La couverture des besoins alimentaires des receveuses

(a) Les besoins en eau

Les apports en eau doivent être suffisants. La quantité d'eau dépend de l'âge de l'animal, de sa production et de son alimentation. Les besoins en eau sont détaillés dans le tableau 12.

Vache laitière en production	100 L	x 1,5 à x 2 en conditions estivales (>25°C)
Vache allaitante et son veau	60 L	
Vache tarie, génisse de plus de 2 ans	40 L	
Génisse de 1 à 2 ans	30 L	

Tableau 12: Estimation des besoins moyens en eau en litres / animal / jour. Source : Boudon et al. 2013.

Cette eau doit être fraîche, entre 10 et 15°C quelle que soit la saison. Il est important de vérifier la qualité de l'eau : la présence de nitrates (concentrations supérieures à 130 mg/L), par exemple, peut induire des problèmes d'infertilité ou encore d'avortement. Les points d'abreuvement doivent être assez nombreux (1 point d'abreuvement pour 12 vaches laitières, 1 point d'abreuvement pour 15 génisses), propres et accessibles (Ennuyer & Laummonier, 2013; Murgue et al., 2022).

(b) Les besoins en constituants de la ration des receveuses

La littérature scientifique présente peu d'études spécifiquement dédiées à l'alimentation des receveuses d'embryons, qu'il s'agisse de vaches ou de génisses. La majorité des travaux existant portent davantage sur l'alimentation en vue de la mise à la reproduction. Toutefois, il semble pertinent de considérer que ces données puissent être extrapolées à l'alimentation des receveuses, en raison des exigences physiologiques similaires au cours de cette période clé.

(i) Les besoins en énergie

L'énergie est un acteur important de l'alimentation sur la reproduction. Elle permet la production d'hormones, l'activité ovarienne et le développement des ovocytes (Brisson 2003). Dans le système INRA, les besoins énergétiques sont exprimés en Unité Fourragère (UF), où une UF correspond à l'énergie nette contenue dans 1kg d'orge standard (Delaby et al., 2018; Delteil et al., 2018).

Dans le système français, il existe deux situations :

- Le système « lait », utilisé pour les femelles en lactation, gestantes ou tarées, les femelles d'élevage, les animaux en croissance modérée ou encore les animaux à l'entretien. Ce système est exprimé en unité fourragère lait (UFL) et correspond à 1760 kilocalorie (kcal) d'énergie nette (EN).
- Le système « viande », utilisé pour les bovins à croissance élevée (avec un GMQ supérieur à 1000 g pour les bovins). Ce système est exprimé en unité fourragère viande (UFV) et correspond à 1820 kcal.

Concernant les génisses, une seule UF est utilisée, qu'il s'agisse de génisses laitières ou allaitantes, il s'agit de l'unité fourragère lait (UFL). Les besoins énergétiques varient en fonction du poids et du GMQ de la génisse. Concernant les vaches, les besoins sont calculés selon les besoins d'entretien et les besoins de production (lactation pour les laitières et élevage du veau pour les allaitantes). En ce qui concerne les besoins d'entretien, ils varient selon les conditions d'élevage (type de logement). Pour les besoins de production, les taux et le niveau de production sont pris en compte (Agabriel, 2010).

Les différents besoins en fonction des classes d'âge et du type de production sont détaillés en annexes 2, 3 et 4.

1. Niveau énergétique de la ration

Une restriction énergétique induit un déficit énergétique, s'accompagnant d'une perte de poids. Un équilibre énergétique négatif peut induire de l'infertilité, particulièrement en élevage laitier, en période post-partum. En effet, il semble que ce déficit énergétique induise une diminution de la qualité des ovocytes et de la capacité de développement embryonnaire (Butler, 2003). Cette restriction aurait un impact, selon certains auteurs, sur la qualité des sécrétions utérines nécessaires à la croissance embryonnaire et au maintien de la gestation (Bridges et al., 2012).

Un déficit énergétique peut être mis évidence par diverses méthodes :

- La NEC : le suivi de l'état corporel des animaux est important, particulièrement pour les vaches laitières. Une baisse de la NEC reflète un déficit énergétique. L'animal puise dans ses réserves pour réaliser sa production laitière, induisant un amaigrissement de l'animal (Brisson, 2003). Cette analyse reste subjective, mais est la plus simple à mettre en place.

- La composition du lait (pour les vaches laitières) : le taux protéique (TP) semble être un bon indicateur de l'évolution de l'état corporel de la vache en début de lactation. Un seuil fixé à 28g/L de lait semble être la limite reflétant un amaigrissement maîtrisé, pour une Prim Holstein. Le TP ne doit pas se trouver en dessous de cette valeur pendant les 3 premiers contrôles de la lactation. Cette valeur est augmentée à 30 g/L de lait pour les vaches de race Montbéliarde et Normande (Ennuyer & Laummonier, 2013).

- La concentration plasmatique en Beta-hydroxybutyrate (β OH) : cette analyse se réalise au chevet de l'animal. Une cétose subclinique, induite par un déficit énergétique, peut être confirmée par un dosage sanguin des corps cétoniques. Une concentration sanguine de 1,2 mmol/L de β OH est retenue comme seuil. Un dépistage peut également être fait sur le lait, à l'aide de bandelettes (Ennuyer & Laummonier, 2013).

Un excès énergétique de la ration induit des animaux en sur-engraissement, avec une NEC supérieure à 4. Cet état de sur-engraissement peut altérer les performances de reproduction. Les mécanismes affectant la reproduction lors d'un état

d'engraissement trop important ne sont pas encore très clairs (Meyer, 2009; Morrow, 1976).

2. Source d'énergie de la ration

L'énergie est apportée par les glucides et les lipides de la ration. Il est possible d'ajouter de l'énergie dans la ration afin de combler un déficit, particulièrement pour les receveuses.

♦ Ajout de glucides dans la ration :

Afin de combler un déficit énergétique, il est possible d'ajouter des sources d'énergie dans la ration. Le propylène glycol, qui est un glucide précurseur du glucose, est fréquemment utilisé en élevage. Hidalgo et al. (2004) ont étudié l'impact de l'utilisation de propylène glycol, pendant les 20 jours précédant le transfert, sur des génisses receveuses d'embryon. Ils ont comparé un groupe de 142 génisses qui recevaient le propylène glycol et un lot de 133 génisses qui n'en recevaient pas (lot témoin). Le nombre de génisses sélectionnées pour le transfert était significativement plus élevé parmi celles qui ont reçu le propylène (69,7% sélectionnées contre 42,2% sélectionnées dans le lot témoin). La sélection des génisses était basée sur la qualité du corps jaune et la concentration plasmatique en progestérone. De plus, parmi les génisses sélectionnées, les taux de gestation étaient plus élevés dans le groupe traité que dans le groupe témoin (65,1% contre 43,6%).

L'ajout de propylène glycol dans la ration des receveuses les jours précédant le transfert permet ainsi d'augmenter la qualité du corps jaune et donc le nombre de receveuses sélectionnées. Les taux de gestation sont eux aussi améliorés (Gamarra et al., 2014; Hidalgo et al., 2004).

♦ Ajout de lipides dans la ration :

Les matières grasses représentent également une source d'énergie, en cas de sous-alimentation. Mais selon la nature de celles-ci, les performances de reproduction peuvent être altérées (Meyer, 2009). La nature des acides gras (AG) joue en effet un rôle sur les performances de reproduction : les acides gras insaturés semblent améliorer les performances de reproduction (Long et al., 2014).

Toutefois, Cardona et al. (2016) ont observé un intérêt limité dans l'utilisation d'acides gras polyinsaturés. En effet, l'utilisation de ceux-ci ne permet pas d'augmenter de manière significative les taux de gestation, mais permet d'augmenter le GMQ des receveuses. Ceci semble cohérent avec l'étude menée par Doyle et al. (2019), où l'utilisation d'oméga-3 a eu un effet positif sur le développement embryonnaire, mais ne paraissait pas augmenter les taux de gestation. En effet, l'apport d'AG dans la ration modifie la teneur en AG dans le liquide utérin. L'embryon a besoin d'AG pour son développement, ce qui peut expliquer le meilleur développement embryonnaire.

Ainsi, l'utilisation de lipides, particulièrement les acides gras insaturés, peut présenter un intérêt lorsque les receveuses présentent une carence nutritionnelle ou une NEC trop faible, afin d'augmenter leur GMQ (Robert, 2022).

(ii) Les besoins en protéines

Tout comme les besoins en énergie, les besoins en protéines sont variables. Pour des génisses, ils sont dépendants du QMG et du poids de l'animal. Pour les vaches laitières, les besoins regroupent les besoins d'entretien et de production. Les besoins d'entretien sont variables selon le taux de matière sèche ingérée, et les besoins de production varient selon la production laitière mais aussi la composition du lait, notamment le taux protéique. Les besoins des génisses (laitières et allaitantes) et des vaches sont illustrés en annexes 2 et 3.

Les besoins en protéines sont couverts par la matière azotée présente dans la ration. Cette matière azotée se trouve sous forme d'acides aminés liés ou libres, d'urée ou de sel d'ammoniac.

1. Déficit azoté

Il existe peu d'études ayant évalué l'impact d'un déficit azoté sur les performances de reproduction, notamment dans le cadre d'un transfert embryonnaire. Toutefois, les insuffisances d'apports azotés sont rares, comparativement au déficit énergétique. Il semblerait tout de même qu'un déficit en azote favoriserait une mortalité embryonnaire précoce, en début de gestation (Meyer, 2009).

2. Excès de protéines

Un excès d'apport de protéines digestibles par rapport aux besoins est accompagné d'un catabolisme des acides aminés sanguins en excès, ce qui induit la production d'urée. Cet excès d'urée se retrouve dans le sang et est éliminé dans le lait, ou encore l'urine. Dans de nombreuses études, citées par Brisson (2003), il a été démontré qu'un apport excessif de protéines dans la ration, mis en évidence par une concentration élevée d'urée mesurée dans le lait, réduisait de manière significative les taux de conception. Cet effet reste le même, quel que soit l'origine des protéines (protéines brutes, protéines dégradées dans le rumen ou échappant à la dégradation). Cet effet est apparent lorsque le taux d'urée dans le lait est supérieur à 30 mg/dL. Cette concentration d'urée aurait un impact sur l'environnement utérin, avec une modification de pH. Le milieu deviendrait non favorable au développement et à l'implantation de l'embryon (Brisson, 2003).

(iii) Les besoins en minéraux et vitamines

Les minéraux jouent un rôle crucial dans le bon fonctionnement des hormones, des enzymes et des cellules. Parmi les minéraux, il faut distinguer les macro-éléments des micro-éléments.

1. Les macro-éléments

♦ Calcium :

Le calcium ne semble pas avoir un impact direct sur les performances de reproduction. Toutefois, pour Yasothai (2014), une carence en calcium pourrait interférer avec la reproduction, en induisant un anœstrus. Des excès en calcium pourraient interférer avec l'absorption gastro-intestinal d'autres minéraux (phosphore, zinc) importants pour la reproduction (Brisson, 2003; Yasothai, 2014). Il est donc important de couvrir les besoins, sans excès.

♦ Phosphore :

Le phosphore a longtemps été considéré comme un facteur influençant la reproduction, en particulier en cas de carence. Un apport insuffisant serait associé à divers troubles tels que l'infertilité, la formation de kystes ovariens, des chaleurs irrégulières ou absentes, ainsi qu'une mortalité embryonnaire précoce due à une atonie utérine (Brisson, 2003; Chastant-Maillard, 2016; Yasothai, 2014). Ces effets

sont principalement observés chez les animaux recevant des rations pauvres en protéines ou sévèrement déficitaires en phosphore. En revanche, lorsque la déficience en phosphore est modérée, son impact sur la reproduction reste difficile à démontrer (Meschy, 2023). À l'inverse, un excès de phosphore dans la ration ne semble pas altérer les performances reproductives, mais il représente un enjeu environnemental croissant qu'il convient de prendre en compte (Brisson, 2003).

♦ **Magnésium :**

Actuellement, aucun lien direct n'a été mis en évidence entre le magnésium et la reproduction, chez les bovins (Brisson, 2003; Meschy, 2023; Yasothai, 2014).

♦ **Potassium :**

Peu de données décrivent le rôle du potassium dans les performances de reproduction. Pour certains, le potassium ne joue aucun rôle (Brisson, 2003) tandis que pour d'autres, le potassium en excès dans la ration peut retarder la puberté et l'ovulation, altérer le développement du corps jaune et augmenter l'anœstrus chez les génisses, ainsi qu'engendrer une baisse de fertilité chez les vaches (Chastant-Maillard, 2016; Yasothai, 2014).

♦ **Sodium et chlore :**

Il existe peu de données sur le rôle de ces éléments dans la reproduction. Toutefois, il ne semble pas y avoir de lien direct avec les performances de reproduction (Brisson, 2003; Meschy, 2023).

♦ **Soufre :**

A nouveau, la documentation sur le soufre et les performances de reproduction est faible. Il semble qu'un excès de soufre perturbe l'absorption et l'utilisation du cuivre et du sélénium, cette carence ayant alors un impact sur la reproduction, comme décrit dans le tableau 14 (Meschy, 2023).

De manière générale, il est essentiel d'assurer un apport minimal adéquat en macro-éléments afin de garantir une physiologie optimale de l'animal, tout en évitant aussi bien les carences que les excès. Un équilibre précis est nécessaire pour préserver la santé et les performances, notamment en reproduction, tout en limitant

les impacts environnementaux. Les recommandations nutritionnelles, ainsi que les valeurs physiologiques et les seuils de référence pour chaque macro-élément, sont détaillés dans le tableau ci-après.

Élément	Limite de carence	Plage physiologique	Limite d'excès	Teneur maximale tolérable
Calcium	1,3 – 2 mmol/L	2,0 – 2,8 mmol/L	3 – 7,5 mmol/L	7 g/kg MSI
Phosphore	1,3 – 1,5 mmol/L	1,5 – 2,6 mmol/L	2,6 – 3,9 mmol/L	15 g/kg MSI
Magnésium	0,5 mmol/L	0,7 -1,4 mmol/L	1,6 mmol/L	6 g/kg MSI
Potassium	2,5 mmol/L	4 -5 mmol/L	6 – 10 mmol/L	20 g/kg MSI
Sodium	125 mmol/L	135 -150 mmol/L	150 mmol/L	18 g/kg MSI ^a 12 g/kg MSI ^b
Chlore	70 mmol/L	90 – 110 mmol/L	150 mmol/L	27 g/kg MSI ^a 18 g/kg MSI ^b
Soufre	10 mmol/L	20 – 50 mg/L	/	3 -5 mg/kg MSI

Tableau 13 : Indicateurs de carences ou d'excès minéral pour les macro-éléments chez les bovins d'après (Delaby et al., 2018).

^a: croissance, ^b: lactation

2. Les microéléments ou oligo-éléments

Les oligo-éléments participent à la réalisation de fonctions vitales par l'activation de systèmes enzymatiques et sont des composants d'hormones et de vitamines. Lors de carences de l'un ou plusieurs de ces éléments, la reproduction est la première fonction perturbée. Généralement, les teneurs en oligo-éléments des fourrages verts sont insuffisantes (à l'exception du manganèse dans les graminées). Une supplémentation est alors nécessaire pour couvrir les besoins des bovins (Meschy, 2023).

De manière générale, si les apports sont en excès ou insuffisants, les effets sur l'organisme sont nombreux mais, dans cette partie, seuls les effets sur la reproduction seront abordés.

Les impacts d'un défaut d'apport de ces oligo-éléments sont résumés dans le tableau 14 ci-après.

Éléments	Impacts sur la reproduction
Cobalt	Infertilité générale Diminution des taux de conception Augmentation des risques d'avortements
Cuivre	Baisse de fertilité et de l'activité ovarienne Diminution des taux de conception Chaleurs réduites voir absentes Mortalité embryonnaire précoce
Iode	Anœstrus Augmentation de la mortalité embryonnaire et fœtale Favorise l'apparition de kystes ovariens
Manganèse	<i>Lors de carences sévères <15mg/kg MS)</i> Chaleurs discrètes voir absentes Œstrus irréguliers Risque de kystes ovariens Diminution des taux de conception
Sélénium	Chaleurs peu intenses et silencieuses Baisse de la motilité utérine Risque de kystes ovariens
Zinc	Mortalité embryonnaire Altération de la durée des cycles

Tableau 14 : Impacts d'un défaut d'apport des oligo-éléments sur les performances de reproduction d'après (Brisson 2003; Chastant-Maillard 2016; Meschy 2023).

De manière générale, les carences en minéraux nuisent aux performances reproductives en perturbant la fonction ovarienne et le développement embryonnaire. Cependant, il est essentiel de respecter les seuils de sécurité, car un apport excessif peut entraîner une toxicité aux conséquences potentiellement graves. Le tableau 15 ci-après présente les recommandations nutritionnelles, ainsi que les valeurs physiologiques et les seuils de référence pour chaque oligo-élément.

Élément	Indicateur	Limite de carence (mmol/L)	Plage physiologique (mmol/L)	Limite d'excès (mmol/L)	Teneur maximale tolérable ¹ (mg/kg MSI)
Cobalt	Vit B12 foie (µg/kg frais)	150-300 au pâturage	700-2500	/	10-25
	Vit B12 sérum (ng/L)	50-100 au pâturage, 100-200 sinon			
	Co sérum (mg/L)	0,6-1,2 au pâturage			
Cuivre	Cu foie (mg/kg MS)	3,7-11	/	230-580	40
	Cu plasma (mg/L)	0,1-0,35		0,7-0,9	
Iode	I sérum (µg/L)	<80	100-400	>700	50
	I lait (µg/L)	<25	30-300	> 500	
Manganèse	Mn sang (µg/L)	<20	70-90	/	2000
	Mn serum (µg/L)	<5	6-70	80-145	
Sélénium	Se foie (µg/kg frais)	<0,15	0,25-0,8	>4	5
	Se sang (mg/L)	<0,10	0,2-1,2	>10	
	Se lait (mg/L)	<0,01	0,02-0,07	>0,08	
Zinc	Zn sérum (mg/L)	<0,6	0,8-1,4	>3	500

Tableau 15 : Teneurs physiologiques, valeurs seuils de carence et seuils de toxicité, et teneur maximale tolérable pour l'animal d'après (Delaby, Nozière et Sauviant 2018).

¹ : Défini comme le niveau alimentaire qui, lorsqu'il est adopté pendant une période définie, ne nuit pas à la santé et à la performance des animaux ; Vit B12 = vitamine B12, Co = cobalt, Cu = cuivre, I = iode, Mn = manganèse, Se = sélénium, Zn = zinc

3. Les besoins en vitamines

Les vitamines sont des substances organiques essentielles au bon fonctionnement de l'organisme. Cependant, la plupart d'entre elles ne pouvant être synthétisées par l'animal, elles doivent être apportées par l'alimentation sous forme de compléments. Une carence, même peu importante, a un impact sur le niveau de performances, notamment de reproduction, des animaux (Delteil et al., 2018).

Les vitamines se répartissent en deux catégories en fonction de leur solubilité : les vitamines liposolubles et les vitamines hydrosolubles.

♦ Les vitamines liposolubles : les vitamines A, D et E

La vitamine A est synthétisée dans les entérocytes, à partir de caroténoïdes d'origine végétale, et est stockée dans le foie. Le plus important des caroténoïdes est le β-carotène (ou provitamine A), représentant 90 à 95% des caroténoïdes présents

dans les fourrages. Le β -carotène est présent dans la partie végétative de la plante, mais il est facilement oxydé et sa concentration diminue dès la fauche de la plante et lors du stockage (foin ou ensilage). Une carence en vitamine A et/ou en β -carotène a des impacts sur les performances de reproduction : baisse du taux de conception, kératinisation de l'épithélium du vagin entraînant une perte de fonctionnalité du tractus vaginal, augmentation du risque de mortalité et résorption embryonnaire. Outre sa fonction de précurseur de la vitamine A, le β -carotène peut avoir une implication dans les performances de reproduction, indépendamment de la vitamine A. Une carence en β -carotène serait responsable de retards d'ovulation et de mortalités embryonnaires précoces (Brisson, 2003; Delteil et al., 2018; Robert, 2022).

La vitamine D ne semble pas jouer de rôle spécifique dans la reproduction, bien qu'elle soit indispensable au bon fonctionnement de l'organisme (Brisson, 2003).

La vitamine E agit avec le sélénium. Ils ont des propriétés anti-oxydantes et interviennent dans la synthèse des prostaglandines. Toutefois, l'effet de la vitamine E sur la fertilité reste controversé (Meyer, 2009).

Les apports recommandés en vitamines A, D et E sont résumés dans le tableau 16 ci-après. Ces apports sont exprimés en UI/kg de MS, où UI correspond aux Unités Internationales.

Groupe d'animaux	Vitamine A	Vitamine D	Vitamine E
Vaches laitières en début de lactation (de 0 à 3 semaines) ¹	4000	1200	15
Vaches allaitantes	3900	-	-
Génisses en croissance	2200	300	25

Tableau 16 : apports recommandés en vitamine A, D et E en Unité Internationale par kg d'après Delteil et al. (2018).

¹ : de 0 à 3 semaines post-vêlage, période où commence la préparation pour la prochaine mise à la reproduction

♦ Les vitamines hydrosolubles : les vitamines B et C.

Les vitamines hydrosolubles ne s'accumulent pas dans l'organisme ; un apport quotidien est donc nécessaire (Delteil et al., 2018).

Les vitamines B sont un groupe de 8 protéines, dont les noms sont détaillés dans le tableau 17. Ces vitamines sont nécessaires à la reproduction et au développement du fœtus (Brisson, 2003).

Vitamine	Appellation
Vitamine B1	Thiamine
Vitamine B2	Riboflavine
Vitamine B3	Niacine ou vitamine PP
Vitamine B5	Acide panthoténique
Vitamine B6	Pyridoxine ou adermine
Vitamine B8	Biotine
Vitamine B9	Acide folique
Vitamine B12	Cyanocobalamine

Tableau 17 : les vitamines B d'après (Robert, 2022).

La vitamine C, ou acide ascorbique, semble jouer un rôle dans le fonctionnement du corps jaune. L'apport de vitamine C semble bénéfique dans certains cas, pour des animaux dont le fonctionnement du corps jaune ou les processus d'implantation et de développements embryonnaires précoces sont déficients (Hurley, Doane, 1989).

Les subcarences, qui entraînent des effets subtils sur les performances zootechniques sans provoquer de signes cliniques, sont bien plus courantes que les carences sévères. Ainsi, en l'absence d'une connaissance précise de la teneur en vitamines de l'alimentation, un risque de carence existe. Il peut donc être pertinent d'enrichir la ration en vitamines afin d'assurer des apports optimaux et de garantir une reproduction optimale.

Par ailleurs, bien que toutes les vitamines ne soient pas directement impliquées dans la fonction reproductrice, leur rôle dans le métabolisme général en fait des éléments essentiels à la reproduction. En effet, lorsque l'organisme est affaibli, la reproduction est l'une des premières fonctions affectées. En contribuant au bon fonctionnement des différentes fonctions vitales, les vitamines participent ainsi au maintien des capacités reproductives.

4. Flushing et complémentation

Un flushing énergétique consiste à apporter des concentrés supplémentaires afin d'augmenter la concentration énergétique de la ration (ajout de 2 UFL par jour dans la ration). Ce flushing se fait généralement 3 semaines avant et après la mise à la reproduction (TE ou IA). Il ne semble pas nécessaire, voire pénalisant sur la fécondité, si la NEC de la receveuse est supérieure ou égale à 3. Il peut être intéressant si la NEC est inférieure ou égale à 2 (Cozler et al., 2009; Ennuyer & Laummonier, 2013; Le Cozler, 2015).

♦ Supplémentation en minéraux :

L'apport de minéraux chez les femelles receveuses semble favoriser une amélioration des taux de gestation. L'étude de Sales et al. (2011) a démontré l'intérêt d'une supplémentation injectable en minéraux, mettant en évidence des taux de gestation supérieurs dans le groupe traité. Les animaux des deux groupes ne semblaient pas présenter de déficit avant la supplémentation. Ils étaient en système de pâturage rotatif à la belle saison avec 45g d'aliment minéral et protéique, et nourries à l'aide de fourrages et une supplémentation de 400g du même complément minéral et protéiques pour compenser la faible valeur du fourrage, en hiver. La supplémentation, administrée 17 jours avant le transfert embryonnaire, contenait du cuivre, du zinc, du sélénium et du manganèse. Les taux de gestation, évalués 23 et 48 jours après le transfert, étaient plus élevés dans le groupe traité (48 % et 43 %) que dans le groupe témoin (36 % et 30 %).

♦ Supplémentation en vitamine E et sélénium :

La vitamine E et le sélénium peuvent être utilisés en supplémentation, notamment en période de stress thermique. En effet, ce dernier impacte négativement les performances reproductives, en particulier lors du transfert embryonnaire, comme détaillé dans le paragraphe II.3.a.(1). Grâce à leurs propriétés antioxydantes, ces molécules contribueraient à atténuer les effets du stress oxydatif induit par ces conditions. Šmigoc et al. (2023) ont mis en avant l'intérêt de supplémenter les génisses receveuses d'embryon en vitamine E et sélénium. Les deux groupes d'animaux ne présentaient pas de carence en amont de l'étude, et ils ont tous deux reçu la même ration de base, composée de foin, de maïs et d'ensilage d'herbe mais également l'ajout de 1,5kg d'un aliment concentré dont la teneur en vitamine E et sélénium était connue.

Le groupe ayant reçu une supplémentation injectable en vitamine E et en sélénium a présenté de meilleurs taux de gestation (64,7%) que le groupe n'ayant reçu que la ration de base (41,2%). Cette étude a été effectuée en été, pendant une période de stress thermique pour les animaux.

(3) Mise en place de la ration des receveuses

La ration des receveuses doit être mise en place environ 6 semaines avant le transfert et doit être maintenue pendant 8 semaines après celui-ci. Cette période est nécessaire afin de limiter la mortalité embryonnaire précoce due à l'altération des hormones engendrée par un stress que pourrait causer un changement alimentaire. Ces 8 semaines permettent une mise en place de la gestation, la ration peut ensuite être modifiée progressivement (Daly et al., 2020).

La nutrition joue ainsi un rôle crucial dans l'implantation de l'embryon par les receveuses, ainsi que dans le maintien de la gestation. Il est important que la ration couvre tous les besoins des receveuses en fonction de leur âge, de leur production et de leur physiologie.

b. Gestion sanitaire de l'élevage

La gestion des maladies infectieuses lors de la préparation des receveuses d'embryons est essentielle. Il est crucial que les receveuses soient en bonne santé pour maximiser les chances de réussite du transfert. En effet, des déséquilibres immunitaires ou des inflammations chroniques peuvent compromettre les performances reproductives (Banos et al., 2013).

Il peut être pertinent de connaître le statut sanitaire des élevages, vis-à-vis de certaines affections, avant de sélectionner des receveuses. En effet, les maladies infectieuses ont un impact négatif sur le succès du transfert embryonnaire, en réduisant les taux de gestation et en augmentant les taux de mortalité embryonnaire et d'avortement. La leptospirose et la néosporose ont ainsi un impact négatif sur l'implantation embryonnaire, tandis que la brucellose a un impact négatif sur les taux de gestation et augmente les taux d'avortement. Enfin, la diarrhée virale bovine (BVD) et la rhinotrachéite infectieuse bovine (IBR) semblent également augmenter les taux de mortalité embryonnaire et d'avortement (Diniz et al., 2016).

Une étude, menée par Pereira et al. (2013), au Brésil, a montré l'intérêt de vacciner les animaux dont le statut n'est pas connu pour les maladies suivantes : BVD, IBR et leptospirose. Ils ont démontré que vacciner les animaux contre ces affections permet d'améliorer les taux de gestation après une insémination, et particulièrement lorsque les deux doses sont effectuées avant l'insémination animale. Peu d'études se concentrent exclusivement sur le transfert d'embryons, mais nous considérons que ces résultats obtenus sur l'insémination animale peuvent être extrapolés.

3. Les facteurs liés à l'environnement

L'environnement dans lequel vit la receveuse peut jouer un impact sur sa capacité à mener une gestation. En particulier, la saison joue un rôle important à prendre en compte pour optimiser les chances de réussite.

a. Impact de la saison

La période de l'année à laquelle a lieu le transfert d'embryon influence les taux de gestation qui ont tendance à diminuer au printemps et en été.

(1) L'été et son impact sur les taux de gestation

Les avis liés à la période de l'année la plus opportune à l'organisation du transfert d'embryon sont divisés. Certains auteurs pensent qu'il n'y a pas d'impact sur les taux de gestation. D'après Martínez et al. (2021), la saison n'a pas d'impact sur les performances de la receveuse. Dans cette étude, un effet saison a été observé sur le rendement et la qualité des embryons, mais n'a pas été démontré sur les performances des receveuses. Toutefois, cet avis n'est pas partagé par tous. Dans leur étude, Bastidas et Randel (1987) ont conclu que les taux de gestation semblaient meilleurs lorsque le transfert était effectué de février à octobre et diminuait en décembre et janvier. Toutefois cette étude date de 1987 et a été effectuée au Texas. Le climat ayant évolué depuis, il semble important de se reporter à des études plus récentes pour tirer des conclusions. À l'inverse, dans leurs études, Baruselli et al. (2011) et Choi et al. (2023) ont observé un effet de la saison sur les taux de gestation des receveuses. Les résultats obtenus dans leurs études sont présentés dans le tableau 18.

Taux de gestation selon la saison		
Printemps/été	Automne/hiver	Sources
37,7%	40,7%	(Baruselli et al., 2011)
37,3%	40,7%	(Choi et al., 2023)

Tableau 18 : taux de gestation selon la saison (Baruselli et al. 2011; Choi et al. 2023).

Cependant, malgré la baisse des taux de gestation au printemps et en été, ces taux restent plus élevés après un transfert d'embryon qu'après une insémination animale, comme l'illustre la figure 25. Malgré la période chaude, le transfert d'embryon permet ainsi d'obtenir de meilleurs taux de gestation que l'IA. Le transfert d'embryon peut ainsi être une solution efficace pour atténuer les effets de la chaleur et du stress thermique induit (Baruselli et al., 2011).

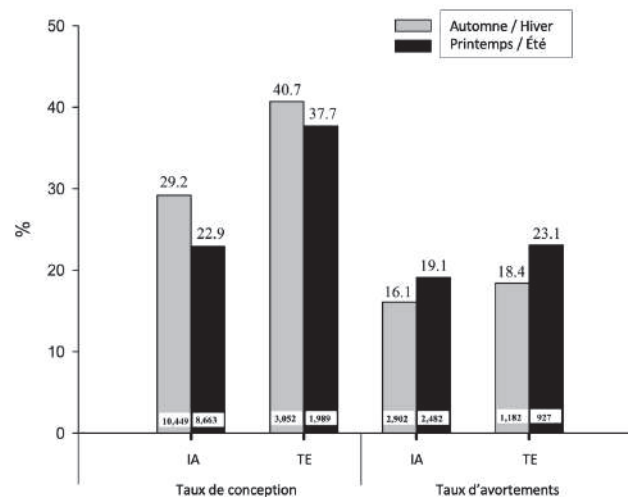


Figure 25 : Taux de gestation et d'avortement en fonction de la saison et de la technique utilisée (Baruselli et al. 2011).
IA : insémination artificielle, TE = transfert d'embryon, nombre d'individus détaillés dans chaque colonne.

(2) L'index de température-humidité (THI)

Outre la saison, ce qu'il semble intéressant de prendre en compte est le stress thermique dans lequel se situe la receveuse au moment du transfert et de sa préparation.

(a) Concept de zone de confort :

La neutralité thermique correspond à la zone où la production de chaleur et les dépenses énergétiques de l'animal pour s'adapter à son milieu sont minimales. Chez les bovins, cette neutralité thermique se situe entre -10°C et + 25°C. La zone de confort

thermique correspond à la plage de température où l'animal maintient sa température corporelle constante sans efforts comportementaux ou physiques. Cette zone s'étend de 0°C à 20°C pour les bovins (Mounier et al., 2021).

Un animal est considéré en stress thermique lorsqu'il ne se situe plus dans sa zone de confort. Afin d'objectiver de manière simple le stress thermique, de nombreux indicateurs ont été créés. Parmi ceux-ci, le THI, l'index de température-humidité, est largement utilisé. Il se base sur la température de l'air et le taux d'humidité. Cet outil a été décrit par Thom en 1958 puis a été adapté en 1964 aux troupeaux de vaches par Berry.

Ainsi, une vache souffre de stress thermique si le THI est supérieur à 72 (Armstrong, 1994; Bernabucci et al., 2010). Pour les vaches hautes productrices, c'est-à-dire produisant plus de 35kg de lait par jour, la limite haute est fixée à 68 (Zimbelman et al., 2009). L'annexe 5 représente le THI en fonction de l'humidité relative (%) et de la température extérieure (°C). Ce stress thermique est à prendre en considération, d'autant plus si les animaux receveurs sont des multipares. La tolérance doit être abaissée. En effet, les résultats de TE semblent meilleurs si on considère un THI inférieur à 72 pour des vaches multipares et inférieur à 79 pour des génisses. Les résultats obtenus dans cette étude sont présentés dans le tableau 19 (Ferraz et al., 2016).

THI	Taux de gestation génisses	Taux de gestation vaches
< 72	41,5% ^a	36,8% ^a
72 – 79	43,9% ^a	32,5% ^b
> 79	37,0% ^b	31,7% ^b

Tableau 19 : effet du THI (index de température-humidité) sur les taux de gestation, en fonction de la parité des receveuses, d'après (Ferraz et al. (2016).

Les exposants ^{a,b} dans une même colonne indiquent une différence significative (p<0,05).

Selon Herbut, Angrecka et Walczak (2018), le stress thermique rendrait difficile la détection des chaleurs. De plus, ce stress thermique induirait des modifications des taux plasmatiques de progestérone pouvant altérer la qualité des ovocytes et des embryons. L'environnement utérin pourrait également être impacté, réduisant ainsi les capacités d'implantation des embryons (Rensis & Scaramuzzi, 2003).

Cette baisse de fertilité, lors de stress thermiques, peut s'expliquer selon plusieurs mécanismes, affectant l'ovaire lui-même, tels qu'un stress oxydatif, des apoptoses cellulaires et des dysfonctionnement mitochondriaux (Roth, 2016). Un afflux important de sang au niveau de l'utérus ainsi qu'une augmentation de la température utérine pourraient impacter l'implantation de l'embryon au niveau utérin (Rensis & Scaramuzzi, 2003). Il est d'ailleurs intéressant de noter que l'effet du stress thermique ne serait pas toujours immédiat. D'après Torres-Júnior et al. (2008), un stress thermique aurait un effet délétère retardé sur le développement folliculaire et la compétence ovocytaire des animaux. C'est pourquoi une baisse de fertilité est possible en automne, quelques mois après la période de stress thermique.

b. Localisation de l'élevage

Peu d'études s'intéressent à l'impact de la localisation d'un élevage, en termes d'altitude, sur les performances de reproduction.

IV. Optimiser le transfert

En conclusion de cette première partie, nous nous intéresserons au geste du transfert en lui-même. Le transfert de l'embryon est en effet une étape importante et les taux de gestation peuvent être diminués si le geste n'est pas connu et bien maîtrisé.

Pour optimiser les chances de réussite d'un transfert d'embryon, il est important que l'embryon soit déposé au bon endroit dans la corne utérine, et il faut que le passage du col de l'utérus soit assez facile. De plus, le temps pour effectuer le transfert doit être le plus rapide possible. Roper et al. (2018) ont ainsi montré que plus la durée de transfert est longue, plus les chances de réussite diminuent, passant de 60% de gestation si le transfert s'effectue en moins de 9 minutes, à 25% si le temps dépasse 14 minutes. Ils considèrent que la durée du transfert correspond aux temps passé depuis la réalisation des contrôles des structures ovariennes par échographies avant le transfert jusqu'à la sortie du bras après le transfert de l'embryon.

Ces deux dernières conditions (temps de transfert et difficultés de passage du col de l'utérus) sont importantes : si le passage du col est difficile ou si le temps de transfert est trop long, l'opérateur peut créer des microlésions sur la muqueuse utérine,

impliquant la libération des médiateurs de l'inflammation, des prostaglandines, pouvant ainsi empêcher la survie et le développement embryonnaire. Ces prostaglandines peuvent aussi être libérées si le tractus génital est manipulé de manière excessive (Alkan et al., 2020). Le lieu de dépôt de l'embryon idéal se trouve dans le tiers crânial de la corne utérine. Il s'agit en effet de l'endroit où est prélevé l'embryon lors du flushing de la donneuse (Alkan et al., 2020). Ainsi, les chances de réussite d'un transfert embryonnaire sont augmentées si le transfert se fait rapidement, si le passage du col de l'utérus est facile et si l'embryon est déposé dans le tiers crânial de la corne utérine. Les résultats de taux de gestation en fonction de ces paramètres sont illustrés dans le tableau 20.

	Lieu de dépose de l'embryon			Facilité de passage du col de l'utérus			Durée du transfert (en minute) *			Sources
	Tiers crânial	Tiers moyen	Tiers caudal	Facile	Moyen	Difficile	6-9	10-13	14-25	
TG (%)	41,06	29,67	/	41,2	34,9	30,3	/	/	/	(Alkan et al., 2020)
	43	31	24	43	32	18	60	37	25	(Roper et al. 2018)
	/	/	/	62,7	59,1	49,2	/	/	/	(R. Kasimanickam et al., 2019)

Tableau 20 : taux de gestation en fonction du lieu de pose de l'embryon dans la corne, de la facilité de passage du col de l'utérus et de la durée du transfert, d'après (Alkan et al. 2022), Roper et al. 2018, Kasimanickam et al. 2019).

TG : taux de gestation

* : temps comprenant l'évaluation des structures ovariennes, la mise en place de l'embryon dans la paillette par un autre technicien et la pose de l'embryon. Il s'agit du temps où le bras est dans le rectum de la receveuse.

De même, dans leur étude, Alkan et al. (2020) ont observé que les taux de gestation diminuent lorsque la difficulté de passage augmente, même si l'embryon est déposé dans le tiers crânial de la corne utérine. Ces taux de gestation passaient de 43,50% lorsque le passage était facile, à 36,17% lorsque le passage était moyennement facile et 26,08% si le passage était difficile.

Il est important de prendre en compte le lieu de dépôt de l'embryon, si le passage du col de l'utérus est facile. A contrario, si le passage est difficile ou que le technicien peine à réaliser le transfert, le lieu de dépôt importe peu. Il est important que le transfert s'effectue rapidement afin de limiter la sécrétion de prostaglandines à la suite des manipulations du tractus génital.

Enfin, l'utilisation d'anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS) peut limiter la sécrétion de prostaglandines et ainsi diminuer leur impact. La libération de prostaglandines peut interférer avec le développement et l'implantation de l'embryon. De plus, le développement et la division de l'embryon peuvent être lent après un transfert, notamment si l'environnement utérin est inadapté, ou si la libération de progestérone est insuffisante. Dans ce cas, l'embryon se développant lentement, avant la reconnaissance maternelle, il ne peut pas sécréter suffisamment d'interféron Tau pour inhiber la lutéolyse, entraînant la mort embryonnaire (Karasahin et al., 2021). L'utilisation d'AINS permet d'empêcher la libération de $\text{PGF2}\alpha$, afin de laisser le temps à l'embryon de sécréter les interférons Tau permettant la reconnaissance maternelle de la gestation. Ainsi, les taux de gestation sont meilleurs. L'AINS le plus utilisé, dans ce cadre, est la flunixin méglumine (FM). Cette utilisation permettrait d'améliorer les taux de gestation lorsqu'un embryon de qualité 2 ou moins est utilisé (Jaśkowski et al., 2021).

Dans deux autres études, citées par R. Kasimanickam et al. (2019), les taux de gestation semblaient améliorés lorsque cet AINS était utilisé sur des receveuses excitées et/ou stressées. En effet, les receveuses stressées présentaient des taux de gestation inférieurs à ceux des receveuses qui se sont montrés plus calmes lors du transfert. Les données obtenues dans ces deux études sont résumées dans le tableau 21.

	Receveuse calme	Receveuse excitée	Sources
Taux de gestation (%)	60,2 59,4	52,4 51,7	(R. Kasimanickam et al., 2019)

Tableau 21 : Taux de gestation en fonction du comportement de la génisse, d'après (Kasimanickam et al. 2019; 2018).

Ainsi, l'utilisation d'AINS au moment du transfert semble avoir un intérêt lorsque la receveuse n'est pas coopérative. Les taux de gestation sont augmentés avec l'utilisation de FM, passant de 46,3% de gestation lorsque la receveuse est excitée/stressée et ne reçoit pas de FM, à 56,8% avec l'injection de FM (R. K. Kasimanickam et al., 2018).

PARTIE 2

ANALYSES STATISTIQUES DES DONNEES

Dans un contexte d'amélioration génétique de la race Montbéliarde, l'objectif de cette étude rétrospective était de réaliser un bilan sur les pratiques actuelles de transfert d'embryon et de réaliser une modélisation afin de prédire les facteurs favorisant la mise en place d'une gestation à l'issue d'un transfert embryonnaire.

I. Matériel et méthodes

Cette étude rétrospective a été réalisée à partir de données fournies par l'entreprise Umotest, en collaboration avec cinq de ses coopératives partenaires. Ces structures ont transmis de vastes panels de données présentant initialement des formats variables et hétérogènes.

1. Origine des données

La première étape a été de mettre en commun l'ensemble des données, selon la variable d'intérêt principale : le résultat de gestation à l'issue d'un transfert embryonnaire. L'objectif était de connaître le statut de gestation de la receveuse à l'issue de ce transfert. Ainsi, seules les receveuses avec un statut « positif » ou « négatif » ont été retenues. Les statuts non renseignés ou « douteux » ont été supprimés afin de ne pas biaiser les résultats. Le résultat de gestation (positif ou négatif) a été obtenu par échographie transrectale à environ 30 jours post-transfert, ou *via* la manifestation de signes d'œstrus de la receveuse en amont de ces 30 jours (diagnostic négatif). Ainsi, à l'issue de cette première étape, étaient présents 28546 transferts embryonnaires, détaillés à l'aide de 27 variables.

2. Harmonisation des données et variables explicatives utilisées

Il a ensuite été nécessaire d'harmoniser et de nettoyer les données, afin de regrouper et sélectionner les variables communes et d'exclure les données incomplètes ou non informatives. Tout d'abord, l'étude se déroulant autour des

embryons de race Montbéliarde, les embryons issus de donneuses d'autre race n'ont pas été conservés dans cette analyse. Leur nombre était effectivement trop restreint pour permettre une analyse statistique robuste. Parmi l'ensemble des variables présentes dans la base de données ainsi reconstituée, seules certaines ont été conservées en tant que variables explicatives.

Tout d'abord, plusieurs variables concernant la collecte des embryons ont été conservées afin d'objectiver leur impact sur la capacité implantatoire de l'embryon. Ces variables concernaient la période de collecte des embryons dans l'année et au cours des années, entre le 1^{er} janvier 2014 et le 31 décembre 2024. Ainsi, grâce à la date de collecte des embryons, la saison ainsi que l'année de collecte ont été déduites et conservées en variables explicatives. De la même manière, la saison et l'année de pose des embryons ont été conservées sous forme de deux variables explicatives. L'objectif était d'observer, l'impact de la saison et de l'année sur le résultat de gestation.

Concernant l'embryon, seule la variable concernant son état (« frais » ou « congelé ») a été conservée, afin d'objectiver l'impact de la méthode de conservation de l'embryon sur les résultats de gestation.

Ensuite, plusieurs variables caractérisant la receveuse ont été sélectionnées. Les premières ont été la parité et le rang de vêlage. En analysant la parité, nous avons ainsi pour objectif d'observer si une différence était présente entre les vaches et les génisses. Le rang de lactation ou rang de vêlage a ensuite permis d'affiner cette première analyse. Nous avons également conservé la race des receveuses afin de mettre en évidence l'impact de cette race sur le résultat de gestation. De plus, le numéro de la receveuse a permis de déterminer le département puis la région où celle-ci se situait, afin de visualiser si la localisation de la receveuse pouvait impacter le résultat de gestation.

Enfin, de nombreuses autres variables étaient présentes dans les données initiales, comme le protocole utilisé pour synchroniser les receveuses, ou encore la qualification de la receveuse et du transfert *via* le technicien de transfert, la qualité et le stade de l'embryon. Toutefois, bien qu'étant des variables importantes, les effectifs

dans ces variables étaient très faibles comparativement à l'échantillon. Il a alors été décidé de ne pas les prendre en compte afin de ne pas biaiser les résultats et conserver un échantillon de taille importante. À l'issue de ce travail de sélection des variables et d'homogénéisation des données, un panel de 20 853 transferts embryonnaires exploitables était disponible, collectés entre le 1^{er} janvier 2014 et le 31 décembre 2024.

3. Choix des modalités

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel **R** (2023.12.1+402). Dans un premier temps, les variables ont été modifiées afin d'obtenir des variables qualitatives à plusieurs modalités. Les tests statistiques, qui sont décrit ci-après, exigent l'utilisation de ces variables qualitatives catégorielles. Il s'agit de variables qui décrivent des caractéristiques non numériques, et dont les valeurs possibles sont des catégories ou modalités distinctes. Dans un premier temps, les seuils de catégorisation des variables ont été choisis selon leur pertinence biologique. Toutefois, lorsque l'effectif de ces modalités était inférieur à $\sqrt{3 * n}$ de l'échantillon, des regroupements entre ces modalités ont été effectués. Le seuil de $\sqrt{3 * n}$ a été retenu comme valeur minimal car il permet de garantir un effectif suffisant pour assurer une représentativité suffisante et limiter les dispersions statistiques. Par ailleurs, afin d'améliorer la clarté et la lisibilité des résultats, les variables comportant un trop grand nombre de modalités ont été simplifiées par des regroupements logiques entre les modalités proches.

De cette manière, les variables ont été catégorisées selon leur sens biologique ou leur pertinence statistique. Ainsi, la variable « parité de la receveuse » a été divisée en deux modalités : *génisse* et *vache*. La variable « rang de lactation » a, quant à elle, été décliné en plusieurs catégories : *génisse*, *vache en 1^{ère} lactation*, *vache en 2^{ème} lactation*, *vache en 3^{ème} et 4^{ème} lactation*, et enfin *vache en 5^{ème} lactation et plus*. Les vaches en 3^{ème} et 4^{ème} lactation ont été regroupées afin d'obtenir un effectif suffisant, tout comme pour celles comptant 5 lactations ou plus.

Les variables « saison de collecte » et « saison de pose » ont été, toutes deux, déclinées en quatre modalités, selon les saisons météorologiques :

- *Hiver* : décembre, janvier et février

- *Printemps* : mars, avril et mai
- *Été* : juin, juillet et août
- *Automne* : septembre, octobre et novembre.

De même, les années de collecte et de pose ont été regroupées en période de 3 ans, afin d'obtenir des groupes homogènes : *avant 2016*, *2016 à 2018*, *2019 à 2021* et *2022 à 2024*.

Concernant la « race de la receveuse », plusieurs races étaient représentées, de manière hétérogène. La race la plus présente était la *Montbéliarde*, suivie de la race *Prim Holstein* et des animaux de race *croisées*. Les races peu représentées ont été regroupés sous la modalité « *autres* ».

Pour finir, concernant la variable « région de la receveuse » la région Auvergne-Rhône-Alpes a été scindée en *Auvergne* et *Rhône-Alpes* afin d'homogénéiser les groupes. La région *Bourgogne-Franche-Comté* présentaient des effectifs similaires, tandis que les receveuses issues d'autres régions, moins représentées, ont été regroupées sous la modalité « *autre* ».

4. Analyses statistiques

A l'issue de ce travail d'homogénéisation et de catégorisation, plusieurs étapes d'analyses ont été effectuée.

a. Description de l'échantillon

Dans un premier temps, des analyses descriptives ont permis de caractériser la population. Pour ce faire, pour chaque variable, les effectifs de chaque modalité ont été représentés, en indiquant le nombre d'individu pour chacune des modalités ainsi que le pourcentage associé. Les intervalles de confiance à 95% ont été calculés afin d'estimer la précision des valeurs obtenues et la variabilité associée à l'échantillonnage. Un intervalle de confiance étroit traduit une estimation précise de la fréquence, tandis qu'un intervalle plus large reflète une variabilité importante et donc une incertitude accrue pour la modalité étudiée. De plus, si les intervalles de confiance de chacune des modalités d'une variable ne se chevauchent pas, cela signifie que cette différence est statistiquement significative.

Chacune des modalités a également été décrite selon le résultat de gestation. Les résultats de gestation selon chacune des modalités, qu'ils soient positifs ou négatifs, ont été indiqués en pourcentage. La signification statistique des associations entre la modalité en question et le résultat de gestation a été évaluée à l'aide d'un test du χ^2 . La p-value, qui est alors calculée, indique la probabilité que les résultats obtenus soient dus au hasard ou non. Le seuil de significativité de cette p-value a été fixé à 5% (soit $p < 0,05$), ce qui permet de déduire si la différence observée entre les modalités est significative ou non. Enfin, l'intervalle de confiance à 95% a été calculé, afin d'estimer la précision de chacune de ces estimations.

b. Coefficients de corrélation

Dans un second temps, l'intensité des associations entre les variables a été évaluée. Le calcul des coefficients de corrélation permet, en effet d'identifier les associations entre variables qualitatives, afin d'évaluer la redondance éventuelle de variables. De cette manière, lorsque 2 variables sont fortement corrélées, une seule des deux variables peut être conservée pour la suite de l'analyse, afin d'éviter de biaiser ou d'alourdir les résultats.

Pour ce faire, plusieurs analyses ont été effectuées. Tout d'abord, le Rho de Spearman et le Tau de Kendall ont été utilisés pour les variables ordinales (parité de la receveuse et rang de vêlage). L'utilisation de ces deux coefficients pour des variables ordinales permet en effet de vérifier la robustesse du lien observé. Enfin, pour les variables non ordinales, le V de Cramer a été calculé. Ce dernier varie entre zéro et un. Zéro indique qu'il n'y a aucune association, tandis que un indique une association parfaite.

c. Analyse des correspondances multiples (ACM) :

A l'issue de ce travail de recherche d'associations et de tri des variables, une analyse des correspondances multiples (ACM) a été effectuée. Cette ACM est une méthode d'analyse exploratoire permettant d'étudier les relations entre plusieurs variables qualitatives. L'ACM transforme alors le tableau de données en un espace factoriel et une carte où les modalités proches sont associées entre elles dans la population. Chaque variable a donc un poids plus ou moins important dans cette

représentation. Chaque dimension de cet espace factoriel correspond à un axe factoriel, c'est-à-dire une combinaison linéaire de variables qui permet de résumer au mieux la variabilité des données dans un espace réduit. La contribution des variables à chaque axe de cet espace factoriel est visualisée à l'aide d'un barplot, afin de faciliter l'interprétation des résultats. L'objectif final de cette ACM était de résumer et visualiser les individus selon des caractéristiques communes, afin d'identifier des liens entre les variables qui permettent d'obtenir un résultat positif et donc une gestation ou au contraire un résultat négatif. Lorsque des modalités se trouvent de part et d'autre de l'axe d'une des deux dimensions, cela suggère qu'il y a une différence entre les modalités des variables. De plus, un second aspect de l'ACM est la proximité des modalités, les unes par rapports aux autres indiquant un lien entre ces modalités.

d. Régression logistique :

Pour finir, et afin d'identifier les facteurs associés au succès de gestation, une régression logistique a été réalisée, en considérant comme variable à expliquer le résultat de gestation (positif ou négatif). Cette régression logistique a permis d'évaluer l'effet des différentes variables explicatives sur la probabilité de gestation, et de tester leur pouvoir explicatif. Les variables explicatives incluses dans le modèle étaient les suivantes : le type d'embryon, la race de la receveuse, l'année et la saison de transfert des embryons, la région de la receveuse et le rang de vêlage de celle-ci. Les différences entre les variables présentées ici et celles présentées au début de la partie matériel et méthodes sont bien entendu issues des choix liés aux corrélations mises en évidence.

Le choix de la régression logistique repose sur la binarité de la variable à expliquer et sur la volonté d'estimer l'effet propre de chaque facteur, toutes choses égales par ailleurs. Ce modèle vise à obtenir une valeur explicative du succès de gestation après transfert embryonnaire et la contribution de chacune des modalités à ce succès. Plusieurs modèles ont donc été comparés entre eux afin de choisir le modèle avec le meilleur équilibre entre sa qualité d'ajustement et sa simplicité. Pour ce faire, le critère d'Akaike (AIC) a été calculé. Cet AIC permet de choisir le modèle qui décrit le mieux les données sans être trop complexe. Le modèle avec le plus petit AIC a donc été sélectionné.

Dans le modèle sélectionné, pour chaque variable, une modalité a été sélectionnée comme référence, c'est-à-dire servant de base de comparaison. Pour la variable « résultat de gestation », la modalité « positive » a été sélectionnée comme référence, afin d'obtenir les comparaisons en fonction d'une gestation. Concernant les variables « parité » et « rang de vêlage » la modalité « génisse » a été sélectionnée. Les génisses sont en effet classiquement considérées comme des références dans les protocoles de transfert embryonnaire. La saison du printemps a été choisie comme modalité de référence pour la variable saison de pose. Le printemps a été choisi car il représente une période intermédiaire entre l'hiver et l'été, où des extrêmes climatiques peuvent avoir lieu. De même pour les modalités « montbéliarde », « Auvergne », « frais » et « avant 2016 », qui ont respectivement été sélectionnées comme modalité de référence pour les variables « race des receveuses », « région », « type d'embryon » et « année de pose ». La race montbéliarde a été choisie comme race référence car cette étude s'intéresse principalement à cette race. Les embryons frais constituent la catégorie la plus représentée dans l'échantillon et permettent donc une base de comparaison plus stable pour l'analyse. Les embryons posés avant 2016 ont été sélectionnés comme référence afin d'observer si les résultats se sont améliorés ou non au cours du temps. N'ayant pas d'étude de référence pour comparer les régions, l'Auvergne a été considérée comme région de référence dans une logique d'ordre alphabétique considéré par le logiciel.

Une fois les modalités de références choisies, les odds ratios (OR) des autres modalités expriment la variation du risque de survenue de l'événement, c'est-à-dire de la modalité en question, par rapport à la référence. Un OR supérieur à 1 indique ainsi une probabilité plus élevée de survenue de cet événement par rapport à la référence. A l'inverse, un OR inférieur à 1 indique une probabilité inférieure.

Dans notre étude, les résultats ont été exprimés par ces OR et leur intervalle de confiance à 95%. Les intervalles de confiance permettent en effet d'obtenir deux informations. D'une part, le calcul de l'intervalle de confiance permet de savoir si cette association est significative ou non. En effet, si l'intervalle de confiance comprend la valeur un, alors celui-ci est non significatif (absence d'association), tandis que, s'il ne comprend pas la valeur un, alors celui-ci est significatif. D'autre part, le calcul de l'intervalle de confiance permet également de connaître la précision de l'OR calculé.

Plus l'intervalle est grand et moins cette estimation est précise. À l'inverse si l'intervalle est petit, l'estimation est plus précise.

Enfin, deux derniers tests ont permis d'évaluer la qualité du modèle de régression logistique choisi dans notre étude. Tout d'abord, afin de vérifier si le modèle permettait d'avoir une forte valeur explicative ou non, une courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) a été réalisée. Cette courbe est une représentation graphique des performances d'un test binaire. A partir de cette courbe, l'aire sous celle-ci est calculée (AUC) : elle représente la capacité discriminante du modèle. Un AUC proche de 1 traduit une excellente performance de prédiction, tandis qu'une valeur proche de 0,5 indique une absence de pouvoir discriminant du modèle. D'autre part, la qualité de fiabilité du modèle a été évaluée grâce à plusieurs fonctions du package DHARMA (*Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models*). Tout d'abord, l'uniformité des résidus a été observée. La distribution des résidus simulés a été comparée à la distribution uniforme théorique, à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov. Une distribution homogène correspond à un bon ajustement du modèle. Les résidus correspondent à la différence observée entre les valeurs observées et celles prédites par le modèle. Ils sont analysés afin d'évaluer la qualité du modèle. Un deuxième test a été effectué pour vérifier la qualité du modèle : un test de dispersion. Ce test vérifie que la variabilité observée au sein des données correspond à celle qui est attendue pour un modèle binomial. Enfin, un dernier test a été effectué : un test permettant de détecter si des observations exercent une influence excessive sur le modèle. Il s'agirait alors de valeurs aberrantes (des *outliers*).

II. Résultats

Pour rappel, l'ensemble des données finales comprenait 20853 observations, réparties entre 2014 et 2024, collectées par plusieurs coopératives. La variable à expliquer était le résultat de gestation (positif ou négatif).

Tout d'abord, il est important de noter que cette étude rétrospective fait un état des lieux sur les pratiques de transfert d'embryon au cours des dernières années.

Certaines variables sont ainsi purement observationnelles et il est impossible pour un centre de transfert de les modifier pour améliorer les résultats de gestation. Par exemple l'année de collecte et de pose des embryons permet de voir l'évolution des résultats de gestation au cours du temps, mais il n'est pas possible de jouer dessus pour améliorer les résultats de gestation. Une autre variable est également inchangeable : il s'agit de la région de la receveuse. Objectiver la variabilité des résultats en fonction de la région permet ainsi d'observer s'il y a des disparités entre les régions. Elle permet de se poser de questions sur les origines des changements mais il n'est pas possible de modifier la région de la receveuse. Enfin, il y a des variables sur lesquelles une intervention ciblée peut permettre d'optimiser les résultats gestationnels, comme la saison de collecte et de pose, le type d'embryon qui est utilisé, la race de la receveuse, ou encore la parité de celle-ci.

1. Analyse descriptive de la population

a. Résultats de gestation globaux de l'étude

Parmi les 20853 observations, 11060 individus ont présenté un résultat positif de gestation, soit 53,04% (IC 95% : [0,5236 - 0,5372]) et 9793 individus ont présentés un résultat négatif, soit 46,96% (IC 95% : [0,4629-0,4764]). Cette répartition est illustrée par la figure 26 qui montre la différence de répartition de la population entre les transferts embryonnaire ayant conduit à une gestation et ceux ayant échoué. Cette différence est statistiquement significative ($p < 2.2e^{-16}$).

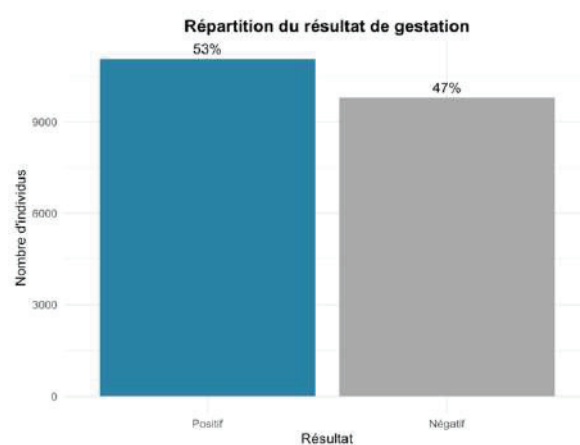


Figure 26 : Répartition du résultat de gestation
Exprimé en pourcentage (bleu : positif, gris : négatif)

b. Facteurs modulables, susceptibles d'influencer les performances de gestation

(1) Le type d'embryon (frais ou congelé) utilisé :

Les embryons utilisés pour le transfert sont de deux type : frais ou congelés. Parmi les individus, 14140 receveuses ont reçu un embryon frais (67,81%, IC 95% : [0,6717 - 0,6844]) et 6713 ont reçu des embryons congelés (32,19%, IC 95% : [0,3155 - 0,3283]). Cette différence de population entre les embryons frais et congelés est statistiquement significative.

Les taux de gestation diffèrent selon si les embryons sont frais ou congelés, avec respectivement 56% de gestation (IC 95% : [0,5519 - 0,5683], soit 7919 individus) contre 46,8% (IC 95% : [0,4559 - 0,4799], soit 3141 individus). Ces résultats sont illustrés par la figure 27 où les individus sont représentés selon le type d'embryon reçu (frais ou congelé) et le résultat de gestation (positif ou négatif). La différence de taux de gestation entre des transferts avec embryons frais ou congelé est statistiquement significative ($p < 2.2e^{-16}$).

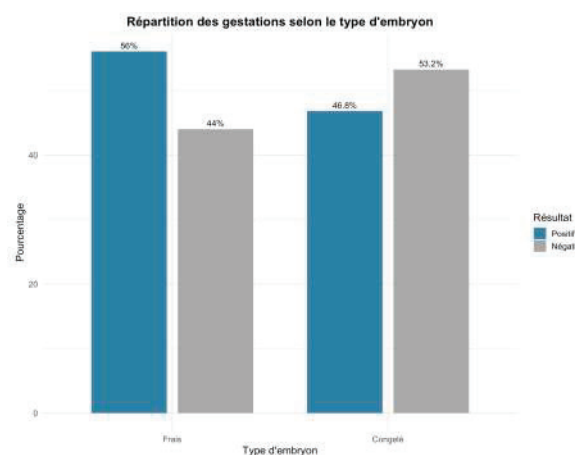


Figure 27 : Répartition des gestations selon le type d'embryon
Taux de gestations exprimés en pourcentage, en fonction du type d'embryon (frais ou congelé) et bleu : positif, gris : négatif

(2) La parité et le rang de vêlage de la receveuse

Dans un premier temps, seule la distinction entre les receveuses ayant déjà vêlé ou non a été prise en compte. Puis, dans un second temps le nombre total de mise-bas a été intégré à l'analyse.

Pour rappel, la variable « parité de la receveuse » permet de différencier les génisses des vaches, selon que l'animal a déjà vêlé ou non. Les receveuses d'embryons comptaient 12288 génisses et 8565 vaches, soit 58,9% de génisses (IC 95% : [0,5826 - 0,5960]) et 41,1% de vaches (IC 95% : [0,4040 - 0,4175]). Ces différences de population sont statistiquement significatives.

Les receveuses génisses présentaient un taux de gestation à 53,4% (IC 95% : [0,5247 - 0,5425]) contre 52,6% (IC 95% : [0,5151 - 0,5364]) pour les vaches. Cette tendance est illustrée par la figure 28, qui indique le résultat de gestation des receveuses selon leur statut de mise bas. Toutefois, ces résultats ne présentent pas de différence significative ($p = 0,2689$). Les génisses semblaient avoir de meilleures performances de gestation, mais cette tendance n'est pas significative.

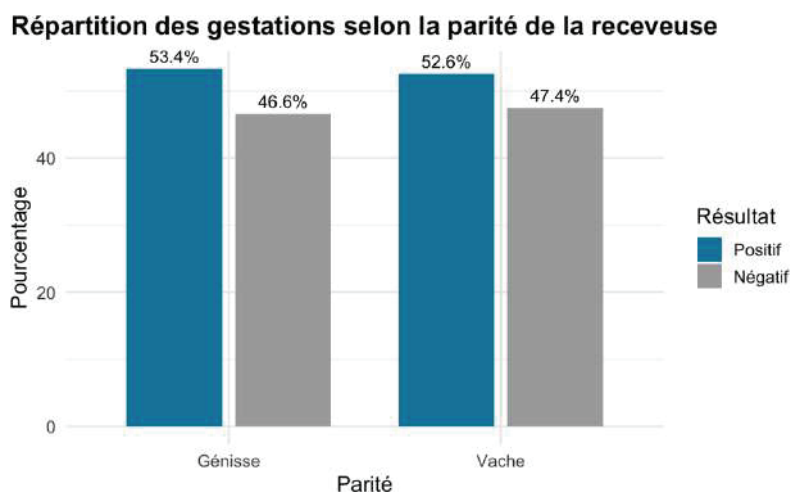


Figure 28 : Répartitions des gestations selon la parité de la receveuse
Taux de gestation exprimés en pourcentage, en fonction de la parité de receveuse (génisse ou vache) ; bleu : positif, gris : négatif

Lorsque le nombre de mises-bas était pris en compte, la population se caractérisait de la manière suivante : 12288 génisses, soit 58,9% de la population (IC 95% : [0,5826 - 0,5960]) étaient dénombrées, comme indiqué précédemment. Toutefois, parmi les animaux ayant déjà vêlés au moins une fois, la distribution était la suivante : 3863 vaches en 1^{ère} lactation (18,5%, IC 95% : [0,1799 - 0,1906]), 2163 vaches en 2^{ème} lactation (10,4%, IC 95% : [0,0996 - 0,1079]), 2106 vaches en 3^{ème} ou 4^{ème} lactation (10,1%, IC 95% : [0,0969 - 0,1052]) et enfin, 433 vaches en 5^{ème} lactation ou plus (2,1%, IC 95% : [0,0189 - 0,0288]). Les intervalles de confiances ne se recouvrent pas, sauf pour les vaches en 2^{ème} lactation et celles en 3^{ème} et 4^{ème}

lactation. Ces résultats suggèrent que la différence de répartition des animaux selon leur rang de lactation apparaît globalement significative, hormis pour ces deux catégories dont les valeurs sont statistiquement proches.

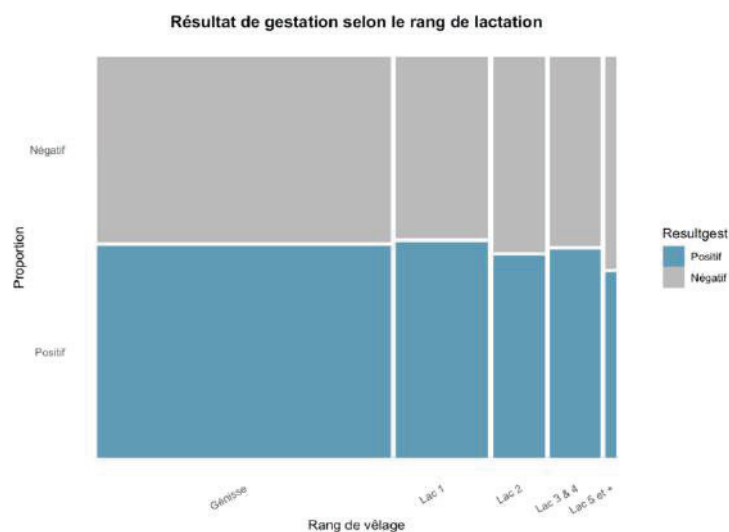


Figure 29 : Résultat de gestation selon le rang de lactation
Représentation des taux de gestation, en fonction du rang de lactation et du nombre de receveuse par catégorie (plus le nombre de receveuse est important, plus la case est grande), et bleu : positif, gris : négatif.

Parmi l'ensemble des receveuses gestantes, comme dit précédemment 53,4% des génisses ont permis l'obtention d'une gestation (IC 95% : [0,5247 - 0,5425]). Pour les vaches en première lactation, ce taux était de 54,3% (IC 95% : [0,5270 - 0,5586]), tandis que les vaches en deuxième lactation présentaient un taux de gestation de 50,8% (IC 95% : [0,4873 - 0,5298]). Les vaches en troisième ou quatrième lactation présentaient un taux de 52,4% (IC 95% : [0,5026 - 0,5457]). Enfin, 46,6% des vaches en cinquième lactation et plus ont permis l'obtention d'une gestation (IC 95% : [0,4187 - 0,5147]). La figure 29 illustre cette répartition entre résultat de gestation et statut de l'animal. Malgré une variation des taux de gestation entre les génisses et les vaches jusqu'en 4^{ème} lactation, ces différences ne sont pas significatives. En effet, les intervalles de confiance de ces modalités se chevauchent, traduisant que ces différences ne sont pas statistiquement significatives lorsqu'elles sont prises individuellement. Toutefois, les animaux en 5^{ème} lactation et plus présentaient un taux de gestation plus faible. Bien que certains intervalles se chevauchent, le test global du Chi² révèle une différence significative (p=0,005929), traduisant une association entre le rang de vêlage et le résultat de gestation. Cette différence globale semble

principalement liée à la diminution du taux de gestation chez les animaux plus avancés dans le nombre de lactation (5 et plus).

(3) La race de la receveuse

Parmi l'ensemble des receveuses, une grande majorité était composée de Montbéliarde (n = 18815, soit 90,2% de la population, IC 95% [0,8982 – 0,9063]). La seconde race principalement représentée était la Prim'Holstein (n = 471, soit 2,3% de la population, IC 95% [0,0206 – 0,0247]) et des receveuses issues d'un croisement de deux races non renseignées (n = 1015, soit 4,9% de la population, IC 95% [0,0458 – 0,0517]). Enfin, des plus petits échantillons de races ont été regroupés sous « Autre » (n = 552, soit 2,6% de la population, IC 95% [0,0243 – 0,0287]). La différence de répartition des races au sein de l'échantillon est statistiquement significative.

Parmi les races de receveuses, 58,1 % des receveuses croisées ont permis la mise en place d'une gestation (IC 95 % : [0,5502 – 0,6118]). Le taux de gestation observé était de 52,8 % chez les Montbéliardes (IC 95 % : [0,5207 – 0,5350]), de 52,4 % chez les Prim'Holstein (IC 95 % : [0,4782 – 0,5703]) et de 52,9 % chez les autres races (IC 95 % : [0,4864 – 0,5713]). Ces résultats sont présentés dans la figure 30 où les receveuses sont réparties selon leur race et leur statut gestationnel. Les taux de gestation variaient donc selon la race des receveuses. Les receveuses croisées ont présenté un taux de gestation significativement plus élevé que les Montbéliarde receveuses, alors que les receveuses de races Prim Holstein ou autres races ne présentaient pas de différences significatives avec les Montbéliardes. L'analyse global du test du Chi² confirme une différence significative (p=0,01108), ce qui indique que la race influence le résultat de gestation. Cette influence est principalement due au taux de gestation des receveuses de race croisées.

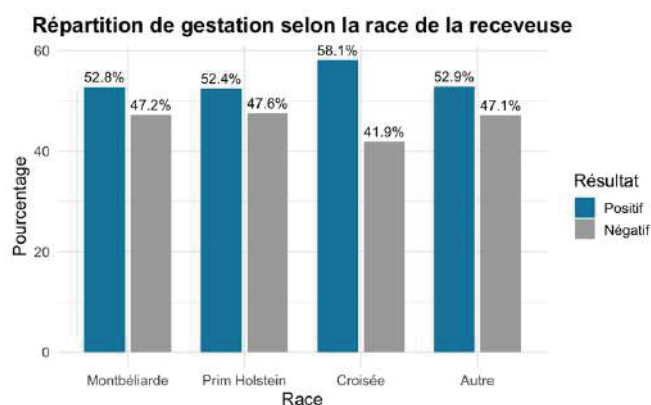


Figure 30 : Répartition de gestation selon la race de la receveuse
Exprimés en pourcentage

(4) Saison de collecte et de pose de l'embryon

Pour rappel, pour évaluer l'effet de la saison lors de la collecte et de la pose de l'embryon, les données ont été regroupées selon la saison durant laquelle l'embryon a été collecté ou transféré.

Ainsi, 29,8% des embryons ont été collectés au printemps, soit un total de 6218 embryons (IC 95% : [0,2920 – 0,3044]). L'été, une légère baisse a été observée avec 3752 embryons collectés, représentant 18,0% des embryons (IC 95% : [0,1747 – 0,1852]). A l'automne, 22,6% des embryons ont été collectés soit 4723 embryons (IC 95% : [0,2208 – 0,2322]). Enfin, l'hiver complète ces collectes avec 6160 embryons prélevés durant cette saison, représentant 29,5% de la population (IC 95% : [0,2892 – 0,3016]). Le printemps et l'hiver présentaient des distributions proches, sans différence significative entre ces deux saisons. En revanche, le nombre collecte était significativement plus faible en été, indiquant une baisse d'activité durant cette saison. L'automne montrait également une diminution du nombre de collecte, par rapport à l'hiver et au printemps, mais les valeurs restaient supérieures à celles observées en été.

Parmi les embryons collectés au printemps, 55,1% ont permis d'obtenir une gestation (IC 95% : [0,5390 – 0,5639]). Lorsque les embryons ont été prélevés en été, automne et hiver, 53,0% (IC 95% : [0,5138 – 0,5459]), 52,2 % (IC 95% : [0,5078 – 0,5365]) et 51,6% (IC 95% : [0,5032 – 0,5283]) de gestation ont été obtenus respectivement. L'ensemble de ces résultats est illustré sur la figure 31, mettant en avant la proportion de gestation et la répartition de la population selon la saison. Les taux de gestation étaient plus élevés pour les embryons collectés au printemps, et diminuaient légèrement jusqu'en hiver. Le test global du Chi² indique une différence significative entre les saisons ($p=0,0005099$), bien que les différences entre saisons consécutives ne montrent pas de différence significative lorsqu'elles sont analysées individuellement.

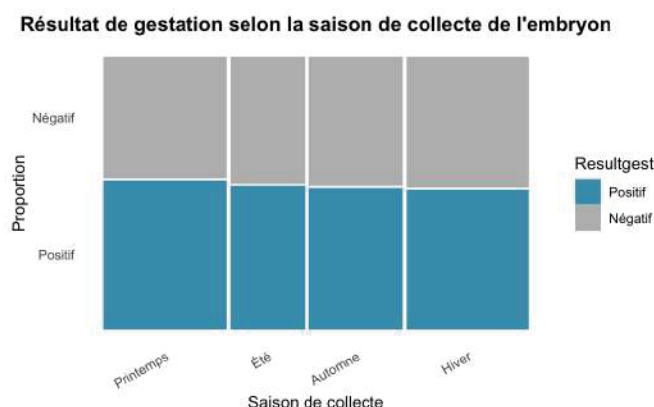
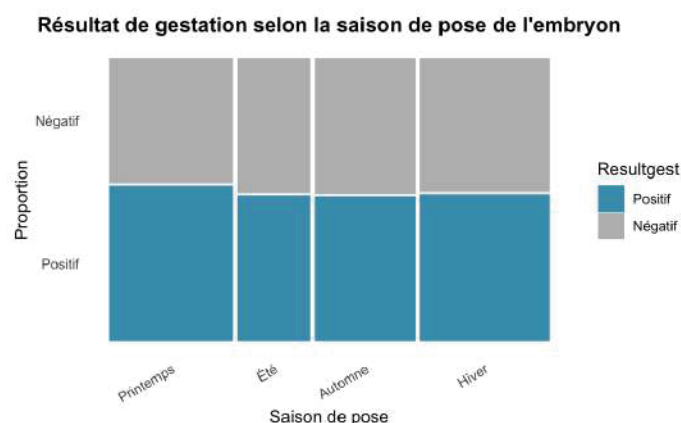


Figure 31 : Résultat de gestation selon la saison de collecte de l'embryon
 Exprimé en fonction du nombre de receveuse par catégorie (plus le nombre de receveuse est important dans la catégorie, plus la case est large).

Concernant les embryons transférés, le printemps représentait 29,0% des collectes posés, soit 6051 embryons posés durant cette saison (IC 95% : [0,2840 – 0,2964]). L'été, une légère baisse de transfert est observée avec 17,1% d'embryons posés, représentant un total de 3564 embryons (IC 95% : [0,1658 – 0,1761]). L'automne correspondait à 23,5% des transferts, soit 4906 embryons posés (IC 95% : [0,2295 – 0,2411]). Enfin, l'hiver les complétait, avec 30,4% d'embryons transférés durant cette saison, soit 6332 embryons (IC 95% : [0,2974 – 0,3099]). La différence de répartition entre les saisons est statistiquement significative, avec une majorité d'embryons posés en hiver, suivi par le printemps, l'automne et enfin l'été. Cinquante-cinq virgule cinq pourcents des embryons posés au printemps ont conduit à une gestation (IC 95% : [0,5428 – 0,5680]). L'été et l'hiver semblent avoir permis l'obtention de moins bons résultats avec, respectivement 51,9% et 51,6% de gestation (IC 95% : [0,5028 – 0,5359] et [0,5022 – 0,5304]). Enfin, en automne, 52,4% des embryons transférés ont conduit à une gestation (IC 95% : [0,5111 – 0,5359]). Bien que certaines saisons aient des intervalles de confiances qui se chevauchent, traduisant une différence non significative, comme entre l'été, l'automne et l'hiver, le test global du Chi² indique qu'il existe une influence significative de la saison de transfert sur le succès de gestation ($p = 6.235e^{-05}$). La répartition de la population et les résultats obtenus selon la saison de transfert de l'embryon sont illustrés dans la figure 32. Ainsi, même si certaines saisons ont des taux comparables, la variation globale au cours de l'année est statistiquement significative avec de meilleurs résultats au printemps.



*Figure 32 : Résultat de gestation selon la saison de collecte de l'embryon
Exprimé en fonction du nombre de receveuse par catégorie (plus le nombre de receveuse est important dans la catégorie, plus la case est large).*

De nombreux paramètres influencent le succès de gestation. Ceux présentés ci-dessus sont modulables et peuvent être pris en compte afin d'améliorer les succès de gestation lors d'un transfert embryonnaire. Toutefois d'autres paramètres existent, sur lesquels il est difficile d'intervenir pour favoriser la gestation.

c. Paramètres non ajustables ayant un impact sur le succès de gestation

(1) Année de collecte et de pose des embryons :

Les données sur les embryons collectés et posés sont disponibles depuis 2014, jusqu'à 2024. Concernant la collecte des embryons, 7,0% d'entre eux ont été collectés avant 2016 ($n = 1468$, IC 95% : [0,0670 – 0,0740]), 14,9% ont été collectés entre 2016 et 2018 ($n = 3104$, IC 95% : [0,1440 – 0,1537]), 39,5% ont été collectés entre 2019 et 2021 ($n = 8226$, IC 95% : [0,3878 – 0,4011]) et 38,6% ont été collectés entre 2022 et 2024 ($n = 8055$, IC 95 : [0,3797 – 0,3929]). La majorité des collectes a été effectuées entre 2019 et 2024, sans différence significative entre les années 2019-2021 et 2022-2024.

Concernant les embryons collectés avant 2016, 59,5% des embryons ont conduits à une gestation (IC 95% : [0,5697 – 0,6206]) et 58,0% des embryons collectés entre 2016 et 2018 ont permis d'obtenir un succès (IC 95% : [0,5623 – 0,5973]). Pour les embryons collectés entre 2019 et 2021, une baisse est observée, avec 49,2% des embryons collectés qui ont permis une gestation (IC 95% : [0,4816 – 0,5033]). Enfin, pour les embryons collectés de 2022 à 2024, une légère augmentation du taux de

gestation est observée avec 53,8% de gestation (IC 95% : [0,5272 – 0,5491]). Ces variations sont observées dans la figure 33, qui permet de mettre en avant la proportion de résultats de gestation positifs et négatifs par année de collecte et illustre également la répartition de la population au cours de ces années. Le taux de gestation était maximal lorsque les embryons ont été collectés avant 2016, puis une légère diminution a eu lieu entre 2016 et 2018. Cette diminution s'accroît fortement entre 2019 et 2021, puis une légère augmentation a eu lieu entre 2022 et 2024. Bien que certains intervalles de confiance se chevauchent, le test global met en évidence que ces variations sont statistiquement significatives ($p < 2.2e^{-16}$).

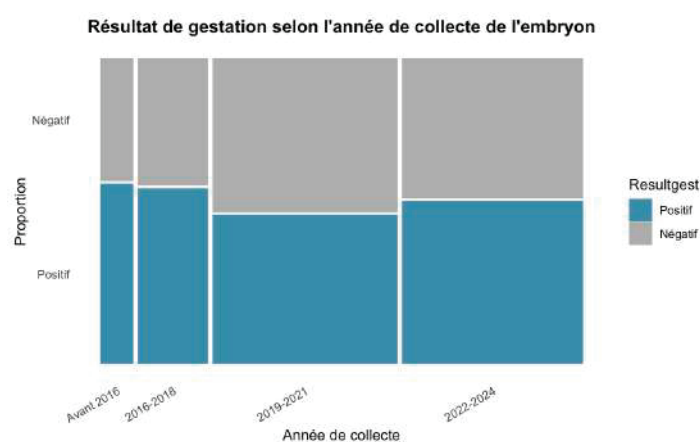


Figure 33 : Résultat de gestation selon l'année de collecte de l'embryon, en fonction du nombre de receveuses par catégorie. Plus le nombre de receveuses est important, plus la case est large.

Concernant le transfert des embryons, les périodes de pose des embryons se répartissent de la même manière que la collecte, entre 2014 et 2024. Avant 2016, 1312 embryons ont été transférés, soit 6,3% des embryons (IC 95 : [0,0597 – 0,0663], de 2016 à 2018, 2910 embryons ont été posés, ce qui correspond à 13,9% des embryons posés (IC 95% : [0,1349 – 0,1443]). De 2019 à 2021, 8318 embryons sont posés sur des receveuses, correspondant à 39,9% des embryons (IC 95% : [0,3922 – 0,4056]). Enfin, entre 2022 et 2024, 8313 embryons sont posés soit ce qui représente 39,9% des embryons (IC 95% : [0,3919 – 0,4053]). Tout comme pour les embryons collectés, le nombre d'embryon posés a augmenté fortement avec les années, jusqu'en 2021, de manière significative. Depuis 2022, le nombre d'embryons qui ont été transféré est stable.

Les taux de gestation diffèrent significativement selon l'année de pose des embryons ($< 2.2e^{-16}$). Avant 2016, 61,2% des embryons posés ont mené une gestation (IC 95% : [0,5854 – 0,6388]). Entre 2016 et 2018, ce taux baisse légèrement, avec 58,2% de gestation (IC 95% : [0,5639 – 0,6001]). Entre 2019 et 2021, la baisse des résultats est d'avantage marquée, avec 49,4% de gestation (IC 95% : [0,4829 – 0,5045]). Enfin, entre 2022 et 2024, une légère augmentation est objectivée (53,4% de gestation, IC 95% : [0,5251 – 0,5467]). Ces tendances sont illustrées par la figure 34, qui met en avant la proportion de gestation selon l'année de pose de l'embryon mais aussi la répartition de la population selon ces années. Bien que certains intervalles de confiance se chevauchent, le test global montre que les différences observées sont statistiquement significatives.

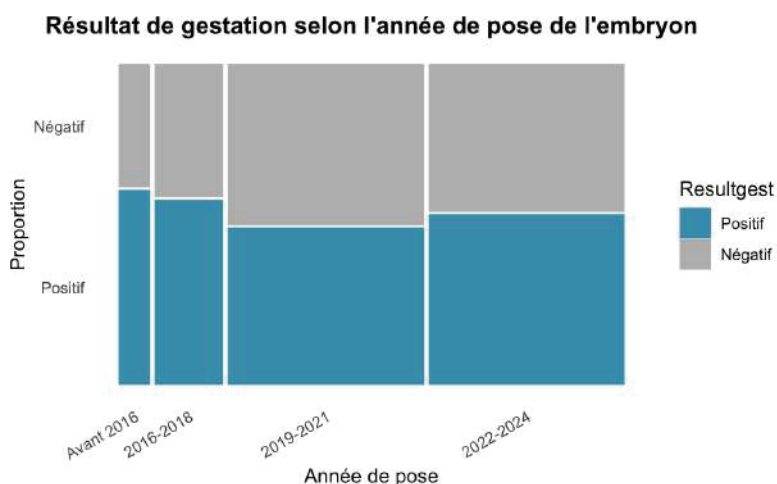


Figure 34 : Résultat de gestation selon l'année de pose de l'embryon, selon le nombre de receveuse par catégorie
Plus le nombre de receveuses est important, plus la case est large.

(2) Région des receveuses

Pour rappel, les receveuses ont été regroupées selon leur région. Elles se trouvent dans la région Auvergne, Rhône-Alpes, Bourgogne Franche-Comté, ou autres régions. Ainsi, 3624 receveuses sont présentes en Auvergne, soit 17,4% des individus (IC 95% : [0,1687 – 0,1790]). La région Bourgogne Franche-Comté représente 37,7% de la population soit 7861 receveuses (IC 95% : [0,3704 – 0,3836]). Quant à la région Rhône-Alpes, elle constitue 28,6% de l'échantillon, où 5960 receveuses sont présentes (IC 95% : [0,2797 – 0,2920]). Enfin, les 16,3% de la

population restant se trouvent dans d'autres régions (n = 3408, IC 95% : [0,1582 – 0,1683]). La majorité de la population de receveuses est issue de la région Bourgogne Franche-Comté, suivie par la région Rhône-Alpes, puis Auvergne et enfin d'autres localisations non spécifiées. Les intervalles de confiance ne se chevauchant pas et étant étroit, ces différences observées sont significativement différentes.

L'analyse des taux de gestation selon la région met en évidence certaines disparités. En Auvergne, le taux de gestation atteint 58,2 % (IC 95 % : [0,5654 – 0,5978]), un résultat proche de celui observé en Rhône-Alpes avec 57,8 % (IC 95 % : [0,5655 – 0,5908]). Les autres régions présentent un taux légèrement inférieur, à 53,5 % (IC 95 % : [0,5186 – 0,5524]). En revanche, la Bourgogne–Franche-Comté se distingue par un taux plus faible, de 46,8 % (IC 95 % : [0,4572 – 0,4794]). Ces différences sont statistiquement significatives ($< 2.2e^{-16}$). La figure 35 permet d'illustrer ces disparités en termes de répartition des receveuses au sein de région et des répartitions des résultats de gestation dans ces régions.

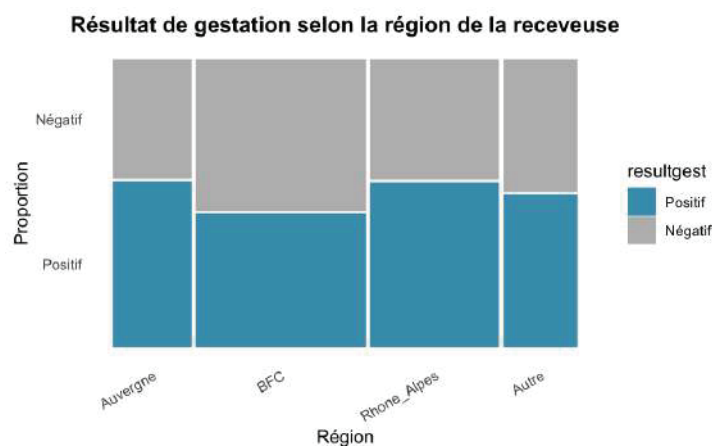


Figure 35 : Résultat de gestation selon la région de la receveuse, représenté selon le nombre de candidates par catégorie. Plus le nombre de receveuses est important, plus la case est large

La tableau 22 reprends l'ensemble des résultats de gestations (positifs et négatifs) selon chacune des modalités citées ci-dessus, ainsi que leur intervalle de confiance à 95%, et leur p-value du test global du Khi².

Variable	Taux de positif (%) Intervalle de confiance à 95%	Taux de négatif (%) Intervalle de confiance à 95%	p-value du test global de Khi ²
Résultat de gestation	53,0 [0,5236 - 0,5372]	46,9 [0,4629 - 0,4764]	< 2.2e ⁻¹⁶
Paramètres ajustables			
Type d'embryon :			< 2.2e ⁻¹⁶
Frais	56,0 [0,5519 - 0,5683]	44,0 [0,4318 - 0,4482]	
Congelé	46,8 [0,4559 - 0,4799]	53,2 [0,5201 - 0,5441]	
Parité :			0,2689
Génisse	53,4 [0,5247 - 0,5425]	46,6 [0,4575 - 0,4753]	
Vache	52,6 [0,5151 - 0,5364]	47,4 [0,4636 - 0,4849]	
Rang de vêlage :			0,005929
Génisse	53,4 [0,5247 - 0,5425]	46,6 [0,4575 - 0,4753]	
1 ^{ère} lactation	54,3 [0,5270 - 0,5586]	45,7 [0,4413 - 0,4730]	
2 ^{ème} lactation	50,8 [0,4873 - 0,5298]	49,2 [0,4702 - 0,5127]	
3 ^{ème} et 4 ^{ème} lactation	52,4 [0,5026 - 0,5457]	47,6 [0,4543 - 0,4973]	
5 ^{ème} lactation et plus	46,6 [0,4187 - 0,5147]	53,3 [0,4852 - 0,5812]	
Race de la receveuse :			0,01108
Montbéliarde	52,8 [0,5207 - 0,5350]	47,2 [0,4650 - 0,4793]	
Prim'Holstein	52,4 [0,4782 - 0,5703]	47,6 [0,4297 - 0,5218]	
Croisée	58,1 [0,5502 - 0,6118]	41,9 [0,3881 - 0,4498]	
Autre	52,9 [0,4864 - 0,5713]	47,1 [0,4287 - 0,5136]	
Saison de collecte :			=0,0005099
Printemps	55,1 [0,5390 - 0,5639]	44,9 [0,4361 - 0,4610]	
Été	53,0 [0,5138 - 0,5459]	47,0 [0,4541 - 0,4863]	
Automne	52,2 [0,5078 - 0,5365]	47,8 [0,4635 - 0,4922]	
Hiver	51,6 [0,5032 - 0,5283]	48,4 [0,4717 - 0,4968]	
Saison de pose :			=6.235e ⁻⁰⁵
Printemps	55,5 [0,5428 - 0,5680]	44,5 [0,4320 - 0,4572]	
Été	51,9 [0,5028 - 0,5359]	48,1 [0,4641 - 0,4972]	
Automne	51,6 [0,5022 - 0,5304]	48,4 [0,4696 - 0,4978]	
Hiver	52,4 [0,5111 - 0,5359]	47,6 [0,4641 - 0,4889]	
Paramètres non ajustables			
Année de collecte :			< 2.2e ⁻¹⁶
Avant 2016	59,5 [0,5697 - 0,6206]	40,5 [0,3794 - 0,4302]	
2016-2018	58,0 [0,5623 - 0,5973]	42,0 [0,4026 - 0,4377]	
2019-2021	49,2 [0,4816 - 0,5033]	50,8 [0,4967 - 0,5184]	
2022-2024	53,8 [0,5272 - 0,5491]	46,2 [0,4509 - 0,4728]	
Année de pose :			< 2.2e ⁻¹⁶
Avant 2016	61,2 [0,5854 - 0,6388]	38,8 [0,3607 - 0,4142]	
2016-2018	58,2 [0,5639 - 0,6001]	41,8 [0,3999 - 0,4360]	
2019-2021	49,4 [0,4829 - 0,5045]	50,6 [0,4954 - 0,5170]	
2022-2024	53,4 [0,5251 - 0,5467]	46,4 [0,4533 - 0,4749]	
Région des receveuses :			< 2.2e ⁻¹⁶
Auvergne	58,2 [0,5654 - 0,5978]	41,8 [0,4022 - 0,4346]	
BFC	46,8 [0,4572 - 0,4794]	53,2 [0,5206 - 0,5428]	
Rhône-Alpes	57,8 [0,5655 - 0,5908]	42,2 [0,4092 - 0,4345]	
Autres	53,5 [0,5186 - 0,5524]	46,5 [0,4476 - 0,4814]	

Tableau 22 : Résumé des taux de gestation (exprimés en pourcentages) pour chacune des modalités de l'étude, leur intervalle de confiance, ainsi que la p-value associée à chaque variable.

En rouge sont représentés les moins bons résultats par catégories, et en vert les meilleurs.

Les résultats obtenus montrent que la réussite d'un protocole de transfert embryonnaire résulte de plusieurs paramètres d'ordre biologiques ou encore

environnementaux. Des embryons frais, les receveuses de races croisées ou encore les embryons collectés et transféré au printemps conduisent vers des chances de succès augmentées. Tandis que les embryons congelés, les vaches accumulant plus de 5 lactations, les embryons collectés et posés récemment et notamment entre 2019 et 2021, ou encore les embryons posés sur les receveuses présentent en Bourgogne Franche-Comté sont autant de critères qui sont associés à une baisse du succès de gestation. Toutefois, ces résultats doivent être interprétés avec prudence parce qu'ils sont analysés de manière indépendante, sans prendre en compte les paramètres entre eux ou d'autres paramètres.

2. Recherche de corrélation dans les variables

Avant la réalisation de l'Analyse des Correspondances Multiples (AMC), une analyse de corrélation a été menée afin d'évaluer la redondance potentielle entre les variables explicatives. Une redondance de variables pourrait fausser l'analyse et l'interprétation des résultats.

a. Variables ordinales : parité et rang de vêlage

Les coefficients de corrélation de Spearman et de Kendall ont mis en évidence une relation monotone extrêmement forte entre parité et rang de vêlage ($\rho = 0,96$; $\tau = 0,90$; $p < 0,001$). Cela signifie que lorsque la parité augmente, c'est-à-dire lors du passage de génisse à vache, le rang de vêlage augmente également. Les variables sont associées entre elles,

Cette interdépendance très élevée indique que ces deux variables apportent une information redondante. Afin d'éviter un double comptage de cette information et de préserver la qualité de l'ACM, une seule des deux variables a été choisie pour l'analyse. Le choix s'est porté sur la variable « rang de vêlage ». Elle est jugée plus précise et plus informative que la variable « parité ». En effet, comme mentionné précédemment, la variable « parité » ne met en évidence aucune différence statistique significative.

b. Variables non ordinales

Pour mieux comprendre les interactions entre les différentes variables qualitatives de cette étude (saison, groupe d'année, région, type d'embryon, race du receveur, etc.), il est essentiel d'identifier les relations qui pourraient influencer les résultats. Le V de Cramer a été utilisé afin de mesurer la force de l'association entre ces variables explicatives. Le tableau 23 représente chacune des associations entre les variables. Il n'y a aucune association si V est inférieur à 0,1 (bleu très clair), une faible association si le V est compris entre 0,1 et 0,2 (bleu clair), une association modérée si le V est compris entre 0,2 et 0,6. Enfin il y a une forte association (orange) si le V est supérieur à 0,6.

	Type d'embryon	Race	Année de pose	Année de collecte	Saison pose	Saison collecte	Région
Type d'embryon	NA	0,0292	0,1136	0,0498	0,0078	0,0597	0,1173
Race	0,0292	NA	0,0228	0,0264	0,0298	0,0324	0,0821
Année de pose	0,1136	0,0228	NA	0,9436	0,0601	0,0556	0,2579
Année de collecte	0,0498	0,0264	0,9436	NA	0,0614	0,0608	0,2471
Saison de pose	0,0078	0,0298	0,0601	0,0614	NA	0,7272	0,0449
Saison de collecte	0,0597	0,0324	0,0556	0,0608	0,7271	NA	0,0512
Région	0,1173	0,0821	0,2579	0,2471	0,0449	0,0512	NA

Tableau 23 : V de Cramer entre chacune des variables, représentant chacune des associations entre ces variables.

De ce fait, quelques associations ont été mises en avant. L'année de collecte est fortement associée à l'année de pose, tout comme la saison de collecte est fortement associée à la saison de pose. En effet, comme indiqué dans le paragraphe II.1.b.(1) de la partie 2, une grande majorité des embryons utilisés sont frais (67,8%) ce qui implique qu'ils sont collectés puis transférés lors de la même période. Certaines variables semblaient avoir une association modérée (la région avec l'année de pose et de collecte). Cette association n'est pas prise en compte car la dépendance entre ces variables est partielle impliquant que d'autres facteurs peuvent intervenir dans cette variation.

Afin de prévenir la multi colinéarité dans les étapes ultérieures de l'analyse, seule la variable qui semblait la plus pertinente a été conservée, pour chaque paire. Dans

ce cadre, les variables relatant la pose de l'embryon (année de pose et saison de pose) ont été conservées, l'étude portant principalement sur cet aspect.

3. Analyses des correspondances multiples

Pour rappel, l'analyse des correspondances multiples est une méthode statistique multidimensionnelle qui permet d'étudier plusieurs variables qualitatives, permettant de visualiser les relations au sein de la population, sous forme d'un espace factoriel.

Dans le cadre de cette étude, une ACM a été réalisée sur 25 variables qualitatives pour 20 853 individus. La figure 36 présente le barplot associé à cette ACM. Il illustre la contribution des différentes dimensions de l'espace factoriel à l'explication de la variance globale de la population. Pour rappel, une dimension correspond à un axe factoriel, soit une combinaison linéaire des variables qualitatives de l'étude. Le choix du nombre de dimension permet de résumer la variabilité des données dans un espace réduit. Les résultats montrent que les deux premières dimensions permettent d'expliquer 16,32 % de la variance (Dimension 1 : 9,46 %, Dimension 2 : 6,91 %). Le choix du nombre de dimension repose sur un compromis entre lisibilité et pouvoir explicatif. Par conséquent, afin d'avoir une visualisation simple des données, seules ces 2 dimensions ont été conservées.

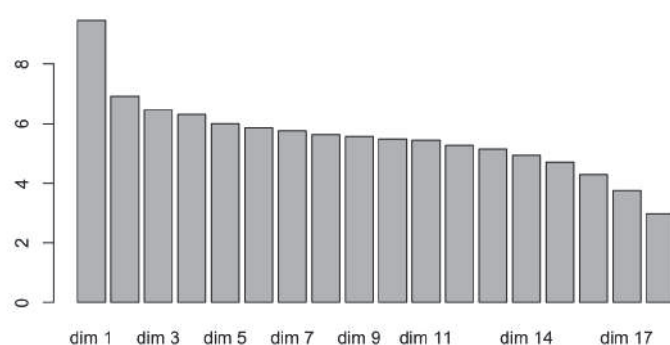


Figure 36 : Barplot associé à l'analyse en composante multiples, représentant la contribution des différents axes à chacune des dimensions (exprimé en pourcentage)

La figure 37 représente les résultats de l'ACM réalisée sur les variables citées précédemment. Les dimensions Dim 1 (9,5%) et Dim 2 (6,9%) représentent les deux

axes principaux sélectionnés, comme décrit précédemment. Chaque triangle correspond à une modalité d'une variable. La proximité entre les points indique une association ou similarité.

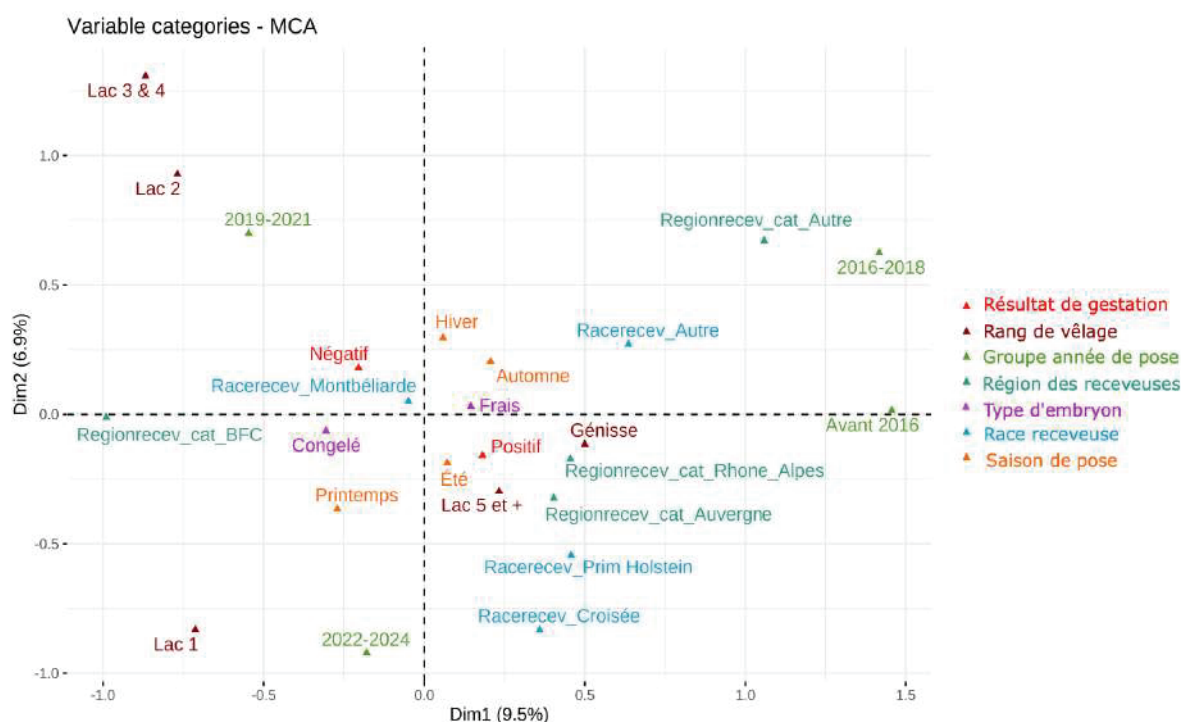


Figure 37 : représentation de l'analyse des correspondances multiples en fonction des 2 premières dimensions, avec représentation des modalités selon les variables explicatives

Cette figure révèle des associations entre les modalités en fonction de leur proximité et de leur position par rapport aux axes.

Pour rappel, lorsque deux modalités sont opposées l'une à l'autre selon l'un des deux axes, cela signifie que les individus associés à l'une des modalités ont tendance à ne pas être associés à l'autre. De plus, plus les modalités sont éloignées l'une de l'autre et de l'origine, plus leur opposition est marquée. A l'inverse, des modalités proches dans l'espace factoriel indiquent qu'elles sont fréquemment associées chez les mêmes individus.

Les résultats montraient que les modalités « positif » et « négatif » étaient diamétralement opposées sur les deux axes principaux, ce qui s'explique par la distinction entre les individus gestants et non gestants. De même, une opposition nette apparaissait entre les embryons « frais » et « congelés » : les embryons transférés à

l'état frais étaient plus fréquemment associés à des résultats de gestation positifs, tandis que les embryons congelés tendaient à être liés à des résultats négatifs.

L'analyse a également révélé un contraste selon les années de transfert des embryons. Les périodes antérieures à 2016 et celles de 2016 à 2018 s'opposaient fortement aux années 2019-2021 et 2022-2024, suggérant une évolution notable des résultats au fil du temps.

Concernant la variable région, l'Auvergne et la région Rhône-Alpes présentaient des profils similaires, alors que la Bourgogne Franche-Comté et les autres régions se distinguent nettement, notamment sur le premier axe. Les receveuses originaires de Bourgogne Franche-Comté ont été plus souvent associées à des résultats négatifs, tandis que celles d'Auvergne et de Rhône-Alpes ont obtenu davantage de gestations positives.

En ce qui concerne la race, la Montbéliarde se démarquait des autres races et se rapprochait du résultat négatif, indiquant une tendance à des gestations moins réussies pour cette race. L'analyse des saisons a montré une répartition plus hétérogène : le printemps s'opposait à l'été, l'automne et l'hiver sur le premier axe, tandis que le printemps et l'été s'opposaient à l'automne et l'hiver sur le second. Toutefois, l'été semblait favoriser les résultats positifs, alors que l'hiver se rapprochait du résultat négatif, bien que de façon moins prononcée.

Enfin, l'étude des rangs de lactation a indiqué que les génisses et les vaches en 5^{ème} lactation ou plus s'opposent aux autres catégories et étaient plus fréquemment associées à des gestations positives.

4. Régression logistique

Comme indiqué précédemment, une régression logistique a été réalisée dans le but d'estimer l'effet propre de chaque facteurs, toutes choses égales par ailleurs. Cette régression avait pour objectif de définir un modèle explicatif au succès de gestation.

La qualité d'ajustement des modèles a été comparée à l'aide du critère d'Akaike (AIC). L'objectif était d'obtenir un modèle avec un AIC le plus faible possible. Le modèle avec le plus petit AIC (AIC = 28410) était le modèle incluant toutes les variables. C'est pourquoi le modèle qui a été sélectionné est le modèle initial, c'est-à-dire intégrant l'ensemble des variables. Ceci implique également que chacune des modalités contribuait à l'explication de la variable observée.

Dans un premier temps, les résultats obtenus seront présentés, puis leurs implications pratiques seront présentées dans un second temps.

a. Résultats bruts

Pour rappel, des modalités de référence pour chacune des variables ont été sélectionnées. Ces modalités ont servi de base pour évaluer l'effet des différentes modalités évaluées par rapport aux modalités de référence, exprimé par les Odds Ratio (OR).

Concernant le type d'embryon, les embryons congelés étaient associés à une diminution significative de la probabilité de succès, par rapport aux embryons frais (OR = 0,73, IC 95% [0,69 – 0,78], $p < 0,005$). À propos de la race de la receveuse, les receveuses croisées avaient une meilleure probabilité de succès que les Montbéliardes (OR = 1,23, IC 95% [1,08 – 1,40], $p = 0,002$). Les Prim'Holstein et autres races semblaient avoir une moins bonne probabilité de succès (OR = 0,92 et 0,95, IC 95% [0,76 – 1,11] et [0,80 – 1,13]) mais cet effet n'était pas statistiquement significatif ($p = 0,4151$ et $p = 0,5953$). Par rapport aux années avant 2016, les années de pose récentes, 2019 à 2021 et 2022 à 2024, ont fait l'objet d'une baisse significative de la probabilité de succès (OR = 0,71 et OR = 0,83, IC 95% [0,63 – 0,81] et [0,74 – 0,94], $p < 0,001$). Les années de 2016 à 2018 ont généralement fait l'objet d'une baisse, mais de manière non significative. La saison influençait également la probabilité de succès. L'été, l'automne et l'hiver ont fait l'objet de succès moindre que le printemps, et ceci de manière significative (OR = 0,84, IC95% [0,77-0,91] pour l'été ; OR = 0,82, IC95% [0,76-0,89] pour l'automne et OR = 0,86, IC95% [0,81-0,93] pour l'hiver ; $p < 0,001$). Des différences régionales ont également été objectivées. Les régions Bourgogne Franche-Comté et autres ont été à l'origine de chances de succès diminuées par rapport à la région Auvergne, de manière significative (avec respectivement OR = 0,65

et 0,81, et IC95% [0,58-0,71] et [0,74-0,90] ; $p < 0,001$). La région Rhône Alpes semblait également être à l'origine de chances de succès diminuées mais de façon non significative (OR = 0,98 et IC95% [0,90-1,07] ; $p = 0,6990$). Enfin, concernant le rang de lactation, les receveuses en 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} lactations semblaient avoir des chances de succès augmentées par rapport aux génisses (avec respectivement OR = 1,19 et IC95% [1,10-1,29], OR = 1,06 et IC95% [0,96-1,16] et OR = 1,16 et IC95% [1,05-1,28]), de manière significative pour les receveuses en 1^{ère} lactation et celles en 3^{ème} ou 4^{ème} lactation ($p < 0,05$) et non significative pour les receveuses en 2^{ème} lactation ($p = 0,2348$). Toutefois, les receveuses en 5^{ème} lactation et plus étaient associées à une baisse de succès (OR = 0,73 et IC95% [0,73-0,89]) de manière significative ($p < 0,001$).

La figure 40 représente graphiquement les OR de chacune des modalités, ainsi que leur intervalle de confiance. Les modalités sont triées selon leur impact sur le succès de gestation, allant des modalités avec un impact positif jusqu'aux modalités ayant un impact négatif. Au centre se trouvent les modalités qui ont effet non significatif (IC 95% contenant 1).

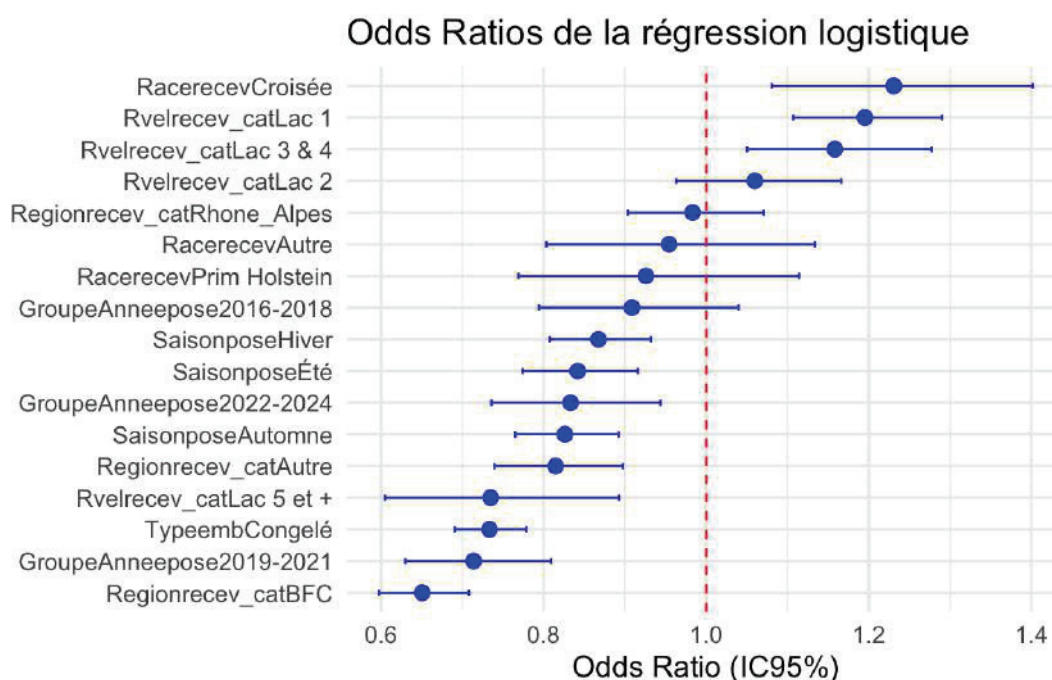


Figure 38 : Représentation des Odds ratios et de leur intervalle de confiance pour chacune des modalités de comparaison de la régression logistique

Les points bleus représentent l'Odds ratios de chacune des modalités, et leur intervalle de confiance est représenté par la ligne bleue. La ligne rouge verticale représente le chiffre un représentant un impact nul sur la variable. Si l'intervalle de confiance comprend cette ligne, alors cet OR n'est pas significatif.

b. Implications pratiques de ce modèle

Ce modèle de régression logistique a donc permis de démontrer l'implication d'un certain nombre de facteurs dans les chances de succès de gestation. Ainsi, comme dit précédemment, deux types de facteurs se retrouvent dans cette étude : les facteurs sur lesquels il est possible d'apporter une modification dans les pratiques pour améliorer les résultats, et d'autres sur lesquelles il n'est pas possible d'ajuster les pratiques. Parmi ces derniers, l'année de transfert ainsi que la région de la receveuse sont deux facteurs où il n'est pas possible de modifier les pratiques. Toutefois, un impact sur le succès de gestation est révélé. Ainsi, les années avant 2016 restent les années où les résultats ont été les meilleurs observés, puis une baisse des performances est constatée après 2016. Cette baisse est d'autant plus marquée durant la période 2019 à 2021. Les années 2016 à 2018 semblent être meilleures que ces dernières années (2022 à 2024) mais de manière non significative. De plus, la région de la receveuse impacte le succès de gestation, avec une baisse importante des chances de réussite en région Bourgogne Franche-Comté par rapport à la région Auvergne. La région Rhône-Alpes est légèrement moins performante également, mais de manière non significative. Concernant les facteurs modulables, des ajustements de pratiques permettent d'améliorer les chances de réussite, notamment par l'utilisation d'embryon frais, en effet les chances de réussite avec un embryon congelé diminuent comparativement à l'utilisation d'embryon frais. Les receveuses issues d'un croisement de races augmentent également les chances de réussite par rapport aux receveuses de race Montbéliarde. Les Prim Holstein ou les autres races (non spécifiées) semblent diminués très légèrement les résultats, comparativement aux Montbéliardes mais de manière non significative. Le choix de la saison de pose des embryons est également un critère à prendre en compte. En effet les chances de réussite sont dégradées si le transfert n'a pas lieu au printemps, avec une perte d'efficacité en été, à l'automne et en hiver, par rapport au printemps. Enfin, le choix de la receveuse peut également se porter sur son rang de lactation. Dans ce modèle, les receveuses ayant déjà mis bas semblent présentées de meilleurs résultats, du moins jusqu'à leur 4^{ème} mise bas, comparativement aux génisses. Cependant, bien que les résultats soient améliorés pour les vaches en 2^{ème} lactation, ceux-ci ne semblent pas être significatif. Enfin, les animaux étant à plus de 5 lactations voient leur chance de réussite fortement dégradées.

Pour conclure, des facteurs exercent donc une influence plus importante que d'autres. En effet, l'impact de la région Bourgogne Franche-Comté sur le succès de gestation est le plus important, il diminue le plus fortement les chances de réussite. Suivi par l'utilisation de receveuses en fin de carrière (plus de 5 lactations) et l'utilisation d'embryon congelé, enfin les années 2019 à 2021 ont fortement impacté négativement ces résultats également. À l'inverse, l'utilisation de receveuses croisées impacte le plus fortement les chances de succès suivi par le transfert réalisé sur des receveuses en début de carrière, ou encore lorsque ce transfert est réalisé au printemps.

c. Vérification du pouvoir explicatif et de la fiabilité du modèle

Sur le plan explicatif, le modèle présente une capacité de prédiction assez faible, comme le montre l'aire sous la courbe ROC (AUC = 0,59), ce qui signifie que d'autres facteurs peuvent influencer le résultat. La figure 41 représente cette courbe ROC. Ainsi, l'ensemble de ce qui est décrit ci-avant est fiable mais des paramètres sont manquants pour augmenter le pouvoir explicatif du modèle.

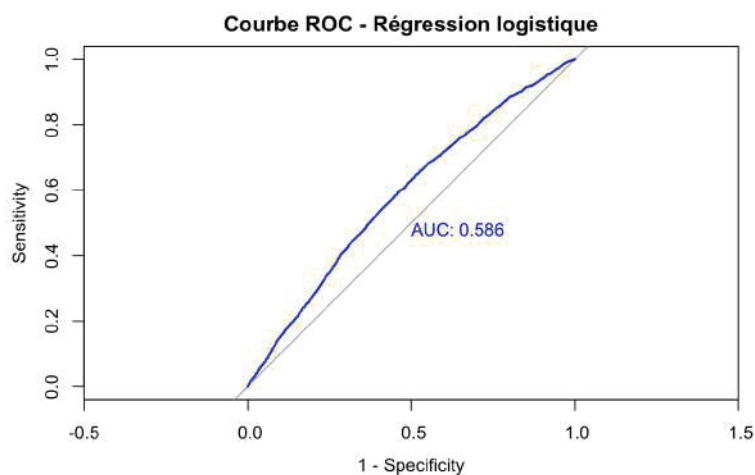


Figure 39 : Représentation de la courbe ROC associée à la régression logistique
Sensitivity = sensibilité ; Specificity = spécificité

Enfin, dans l'objectif de tester la fiabilité de ce modèle logistique, celui-ci a été évalué à l'aide du package DHARMA afin de vérifier son adéquation aux données. Trois diagnostics ont été réalisés :

- **Uniformité des résidus** : le test de Kolmogorov-Smirnov (KS test) n'est pas significatif ($p = 0,940$) et le graphique des résidus simulés montre une distribution homogène le long de la diagonale, indiquant un bon ajustement global du modèle. La figure 42 représente le QQ plot des résidus simulés. Les points suivent la diagonale, indiquant que les résidus sont uniformément distribués. Le modèle ne présente donc pas de biais dans les résidus.
- **Dispersion** : le test non paramétrique de dispersion donne une statistique de 1,0001 avec $p = 0,888$, confirmant l'absence de sur-dispersion ou sous-dispersion. La variance observée correspond donc à celle attendue pour un modèle binomial.
- **Valeurs extrêmes (outliers)** : le test d'outliers n'est pas significatif ($p = 0,350$), suggérant qu'aucune observation ne pèse excessivement sur le modèle.

En résumé, les diagnostics indiquent que le modèle logistique est bien ajusté, fiable et que les estimations des OR et de leurs intervalles de confiance peuvent être interprétées avec confiance. Les graphiques associés (Figures 42, 43 et 44) permettent de visualiser ces résultats : uniformité des résidus, dispersion correcte et absence d'outliers influents.

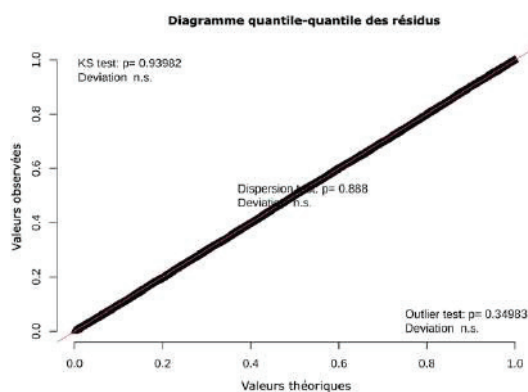


Figure 40 : Graphique Quantile-Quantile des résidus (test de normalité)
 Comparaison des résidus observés aux résidus attendus sous une distribution normale (vérification de la normalité)
 KS test : test de Kolmogorov-Smirnov, compare une distribution empirique à une distribution théorique.
 Dispersion : écartement des données à la moyenne
 Outlier test : test des valeurs aberrantes.

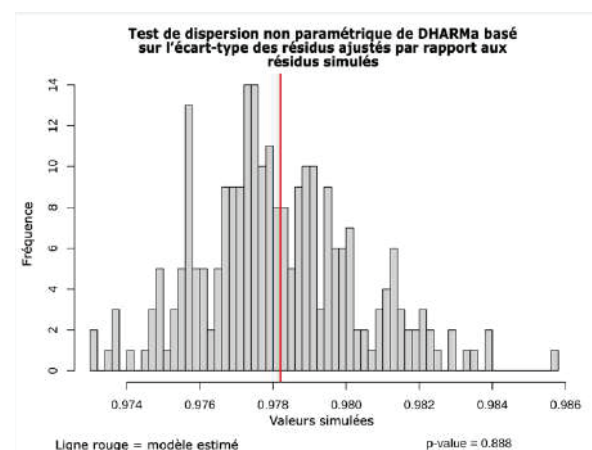


Figure 41 : test de dispersion non paramétrique
 Distribution simulée de l'écart-type des résidus, comparé à la valeur observée (ligne rouge).

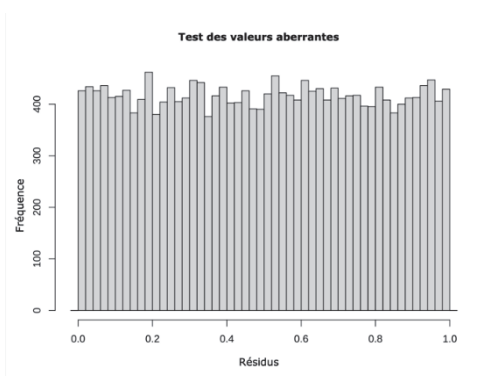


Figure 42 : test des valeurs aberrantes (outliers)
Vérification de la présence éventuelles de valeurs aberrantes dans les résidus (représentées en rouge si elles sont présentes).

La figure 45 présente la dispersion des résidus comparativement aux prédictions. Le graphique montre la ligne de lissage (ligne rouge) horizontale, indiquant qu'il n'y a pas de relation entre les résidus et les prédictions. De plus, les résidus sont centrés autour de 0,5.

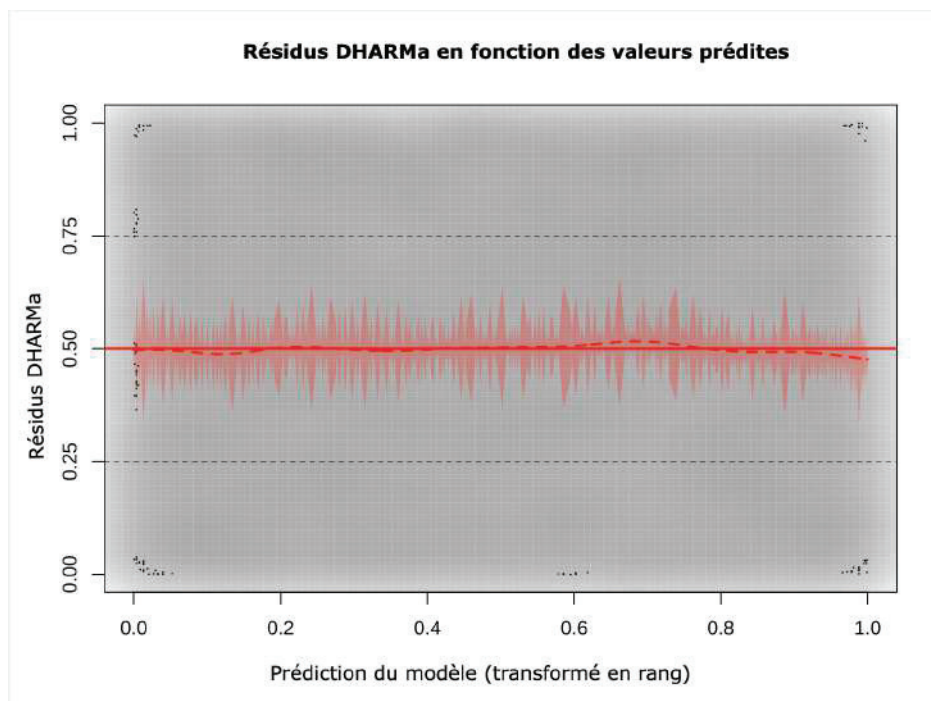


Figure 43 : Graphique des résidus DHARMA en fonction des valeurs prédites

La ligne rouge montre la moyenne des résidus, pour un modèle bien ajusté elle doit restée proche de 0,5.

d. Conclusion sur le pouvoir explicatif et la fiabilité du modèle

La courbe ROC montre que le pouvoir explicatif de ce modèle est faible, mais les diagnostics réalisés à l'aide des outils DHARMA indiquent que le modèle est statistiquement fiable. Les résidus sont uniformément distribués, sans sur-dispersion ni outliers significatifs, et ne présentent pas de biais systématique par rapport aux

prédictions. Ces résultats suggèrent que le modèle respecte les principales hypothèses de validité, ce qui renforce la confiance dans ses estimations et ses inférences. Ainsi malgré sa faible capacité de pouvoir explicatif, le modèle reste fiable, et il faudrait intégrer d'autres paramètres dans l'analyse pour augmenter le pouvoir explicatif.

III. Discussions

1. Discussion des résultats

Cette étude menée sur plus de 20 000 transferts embryonnaires issus de donneuses Montbéliardes, a permis de mettre en évidence plusieurs facteurs influençant la réussite de la gestation à l'issue de ces transferts. Les résultats mettent en avant l'importance du type d'embryon, de la saison et de l'année de collecte, le rang de lactation mais aussi la région de la receveuse. Toutefois, ces données peuvent être évaluées selon qu'elles sont modifiables, ajustables ou non.

a. Facteurs modifiables et impactant les taux de gestation

Dans cette étude, la race de la receveuse semble avoir un fort impact sur la mise en place de la gestation (OR = 1,23). En effet les receveuses de races croisées semblent avoir 23% de chances supplémentaires d'être gestantes, comparativement aux Montbéliardes. Toutefois, les résultats sont moins probants concernant les autres races pures (Prim'Holstein et autres) avec des tendances à diminuer la probabilité d'être gestantes, mais de manière non significative. Ce résultat semble concordant avec l'étude de Xie et al (2024), où la race ne semblait pas avoir d'impact sur les chances de réussite d'un transfert embryonnaire. Toutefois, il est intéressant de remarquer que, contrairement à notre étude, peu d'étude ont porté sur l'utilisation de receveuses issues d'un croisement de race. L'augmentation des chances par l'utilisation de receveuses issues de ce croisement peut s'expliquer par l'effet d'hétérosis. Cet effet pourrait leur conférer une meilleure fertilité, et une robustesse face aux maladies ou encore au stress thermique (Bunning et al., 2019; Wakchaure et al., 2015). Ces observations rejoignent celles de (Dezetter et al., 2015), qui observaient également de meilleures performances de reproduction pour les animaux issus de croisements entre les races Montbéliarde, Prim Holstein et Normande.

La parité, et particulièrement le rang de vêlage, semble également avoir un impact sur les chances de succès d'un transfert embryonnaire. Bien que l'ACM ait suggéré une association entre les résultats positif et les génisses ou les vaches en 5^{ème} lactation et plus, la régression logistique la contredit. L'ACM représente dans un espace factoriel les données sans contrôler les autres variables. Tandis que la régression logistique neutralise les autres variables permettant d'estimer l'effet propre de chaque variable, toute chose égale par ailleurs. Ainsi, la régression logistique permet d'objectiver un effet propre négatif des génisses et des vaches en 5^{ème} lactation et plus sur les résultats de gestation. Afin d'objectiver l'impact propre du rang de lactation sur les résultats de gestation, nous nous référerons donc aux résultats de la régression logistique. Les meilleures chances de réussite reposeraient sur l'utilisation de receveuses en 1^{ère} lactation, avec une augmentation des chances de réussite de 19%, et de 15% si les receveuses sont en 3^{ème} ou 4^{ème} lactation, comparativement aux génisses. Les chances augmentent de 5% avec des vaches en 2^{ème} lactation, mais cet effet n'est pas significatif. Enfin, le taux de réussite est fortement dégradé, avec une diminution de 27%, lorsque les animaux sont en 5^{ème} lactation et plus. Il convient de souligner que les résultats issus de l'analyse descriptive diffèrent partiellement de ceux obtenus grâce à la régression logistique. En effet, bien que les taux de gestation brutes ne montrent pas de différences significatives entre certaines catégories (du fait du chevauchement des intervalles de confiance), la régression logistique révèle des effets significatifs pour les vaches en 1^{ère}, 3^{ème} et 4^{ème} lactation, une fois les autres variables contrôlées. Cette divergence apparente s'explique par la nature des deux approches : l'analyse descriptive fournit une vision brute non ajustée, tandis que la régression logistique permet d'estimer l'effet propre du rang de lactation, en tenant compte des facteurs de confusion. Ceci permet de renforcer la robustesse des conclusions. Toutefois, les résultats obtenus restent discutables, selon les études.

Il est intéressant de remarquer que nos résultats ne vont pas dans le sens des recommandations classiquement formulées pour le transfert embryonnaire. En effet, comme indiqué dans le paragraphe III.1.A, nombreux sont les auteurs qui recommandent l'utilisation de génisses comme receveuses (Ferraz et al., 2016; Hasler, 2001, 2006; Xie et al., 2024). Toutefois, d'autres recommandent l'utilisation de receveuses déjà en lactation car celles-ci sont connues pour leur fertilité, mais aussi

leur facilité de vêlage (Broadbent et al., 1991; Lamb & Mercadante, 2014). Dans notre étude, les bons résultats obtenus avec des vaches en lactation pourraient s'expliquer parce que les receveuses sont issues de région où se trouve de nombreux signes de qualités. En effet, 46% des receveuses étaient issues de la région Auvergne Rhône-Alpes où de nombreux fromages labellisés sont présent (Saint Nectaire, Fourme d'Ambert, Cantal, Bleu de Gex, Reblochon, etc) et 37,7% des receveuses étaient issues de Bourgogne Franche-Comté où se trouvent d'autres fromages sous appellation d'origine protégée (Comté, Morbier, Mont d'Or, Emmental). Ces fromages sous signes de qualité sont régis par des cahier des charges qui contrôlent les pratiques d'élevage, afin de limiter l'intensification et qui, généralement, conduisent les vaches à avoir une production laitière diminuée par rapport aux vaches qui produisent du lait conventionnel (Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (DRAAF) Auvergne-Rhône-Alpes, 2024; Parguel et al., 2005). Or, la production laitière peut influencer sur les capacités reproductives des animaux, et, par conséquent sur les chances de succès d'un transfert embryonnaire. En effet, une production laitière élevée, peut induire un déficit énergétique, lui-même étant à l'origine d'une baisse des performances de reproduction par une altération des cycles, un environnement utérin non réceptif à une gestation par exemple (Berry et al., 2016; Martens, 2023; Mekuriaw, 2023). Dans notre étude, les Prim Holstein semblaient ainsi avoir des chances de réussite diminuées à la suite d'un transfert embryonnaire (de manière non significative). Outre la génétique, cette tendance pourrait s'expliquer par des niveaux de production laitière supérieurs aux Montbéliardes. En effet, en 2024, sur le territoire national, les Prim Holstein avaient une production moyenne de 8564 kg de lait sur une référence de 305 jours contre 7011 kg de lait en moyenne sur la même durée pour les Montbéliardes (Institut de l'élevage, 2025).

Enfin, bien que l'utilisation de vaches en lactation semble être intéressante dans notre étude, les animaux étant en 5^{ème} lactation ou plus ont permis l'obtention de résultats fortement diminués, avec une baisse de 27% des chance de réussite par rapport à l'utilisation de génisses. Le vieillissement des animaux semble impacter la physiologie de la reproduction, ce qui pourrait aller dans le sens d'une altération des performances de reproduction (Lacroix, 2020). Par conséquent, les animaux comptant un nombre élevé de lactations pourraient être moins performants dans un programme de transfert embryonnaire. À noter tout de même que ce groupe ne représentait que

2% de l'échantillon et l'intervalle de confiance est étendu ([0,6045 – 0,8924]), ce qui traduit un sous-groupe de faible taille, réduisant la fiabilité de l'estimation, et un intervalle de confiance large, traduisant une forte incertitude autour de la valeur estimée. Pour conclure, les vaches ayant mis bas semblent être un choix judicieux dans la sélection des receveuses. Toutefois, il est important de prendre en compte le niveau production laitière et l'alimentation afin d'éviter de choisir un animal en déficit énergétique. Ce déficit énergétique entraînerait des perturbations métaboliques responsables de troubles de la reproduction et donc d'échec de transfert embryonnaire.

En ce qui concerne le type d'embryon utilisé, l'utilisation d'embryons congelés a provoqué une baisse des chances de succès par rapport à l'utilisation d'embryon frais. Ces différences de réussite se retrouvent dans de nombreuses études. En effet, dans son étude Hansen (2020) s'est appuyé sur plusieurs études, et a observé que, dans tous les cas (pour des embryons produits *in vivo* ou *in vitro*), les résultats étaient meilleurs lorsque les embryons sont transférés frais. Dans le cas d'embryons produits *in vivo*, comme c'est le cas dans notre étude, selon les auteurs décrits dans l'étude de Hansen, la différence de succès évoluait entre 3 et 12%. De même, dans leur étude, Ferraz et al. (2016), ont observé que l'utilisation d'embryons frais permettait d'augmenter les chances de succès de 12,5 points. De ce fait, l'utilisation d'embryon frais augmente considérablement les chances de réussite lors de l'implantation d'un embryon. Les techniques de conservations des embryons sont ainsi utiles mais détériorent la qualité des embryons et leur capacité d'implantation. En effet, la cryoconservation peut provoquer des lésions membranaires, réduisant la viabilité embryonnaire. De plus, les embryons congelés ont une sensibilité accrues aux conditions utérines, c'est-à-dire qu'ils sont plus sensibles au stress utérin induit par une inflammation, un stress thermique ou encore un léger déséquilibre hormonal (Estrada-Cortés et al., 2019).

En ce qui concerne la saison, notre étude a permis de mettre en évidence que le printemps semblait être la saison optimale pour réaliser des transferts d'embryon. En effet, la régression logistique a mis en avant des chances de succès dégradées lorsque les embryons étaient posés à d'autres saisons, l'automne étant la saison la

moins propice avec une baisse plus importante des chances de succès, suivi par l'été puis l'hiver. Ceci est partiellement en accord avec l'étude de Martínez et al. (2021) où l'été semblait être la saison où la qualité des embryons était dégradée. Leur étude, s'intéressaient principalement au prélèvement des embryons, et donc à la saison au cours de laquelle avait lieu ce prélèvement, et non la saison à laquelle les embryons étaient posés. Mais, étant donné que près de 68% des embryons ont été posés frais dans notre étude, la majorité des embryons posés en été ont également été produits lors de cette saison. Ainsi, la qualité dégradée des embryons produits en été pourrait en partie expliquer la baisse de réussite en été. Une autre explication tient dans les conditions souvent défavorables pour la mise en place et le maintien de gestation, en particulier lors de stress thermiques. Comme indiqué au paragraphe III.3.a.(2), le stress thermique induit des répercussions sur l'ovaire et ses fonctionnalités, ainsi qu'une augmentation de la température utérine, induisant des conditions défavorables à l'implantation de l'embryon (Rensis & Scaramuzzi, 2003; Roth, 2016). De plus, les effets de ce stress thermique peuvent être délétères tout au long du développement folliculaire. L'impact peut donc se répercuter sur des embryons produits quelques temps après le stress thermique (Torres-Júnior et al., 2008), ce qui peut expliquer les baisses de performance en automne voire en hiver selon les années. La baisse de succès en hiver peut aussi être corrélée avec un changement alimentaire, et une ration moins riche aboutissant à un déficit énergétique. Pour rappel, une grande partie des receveuses se trouvent dans des régions où le lait est destiné à la fabrication de fromage labellisés, en Auvergne Rhône-Alpes et Bourgogne Franche-Comté principalement, avec des fromages comme le comté, le Saint Nectaire, le Bleu de Gex, le Cantal, etc. Les cahiers des charges imposent un pâturage des animaux lors de la belle saison puis, lors de la rentrée en bâtiment, une alimentation à base de fourrages secs. Ces fourrages, selon les années, peuvent être de plus ou moins bonne qualité, induisant parfois des carences. De plus, les changements de ration, s'ils ne sont pas maîtrisés, peuvent induire un stress métabolique pour les animaux. Ces composantes peuvent affecter la qualité des embryons, mais aussi les capacités d'implantations (Daly et al., 2020). Ainsi, les chances de succès sont meilleures lorsque les embryons sont posés au printemps. Il est donc recommandé d'éviter les périodes de stress thermique (été) ou les périodes qui suivent ces stress thermiques (automne en particulier). Bien qu'il ne soit pas possible de modifier les saisons, il est possible de mettre en place des pratiques qui permettent de limiter l'impact saisonnier sur les

succès de gestation. Il est ainsi possible de privilégier le printemps pour la collecte et la pose d'embryon et de limiter ces pratiques pendant et après une période de stress thermique pour les animaux (été et automne notamment).

b. Facteurs non modifiables et impactant les taux de gestation

Concernant l'année de collecte, les résultats sont meilleurs avant 2016. Depuis 2016, les résultats de gestation à l'issu d'un transfert embryonnaire semblent être à la baisse. Entre 2016 et 2018 les chances de réussite ont été dégradées, bien que cette variation ne soit pas significative. En revanche, une chute de performance significative a été observée entre 2019 et 2021, avec une forte baisse du taux de succès de gestation. Il semble important de noter que durant cette période a eu lieu la pandémie de COVID-19, perturbant fortement l'ensemble des secteurs, agricoles y compris. Les réductions de personnels, de déplacements, les perturbations d'approvisionnement ont pu impacter l'efficacité et la rigueur des éleveurs, des techniciens. De plus, les années 2019 et 2020 ont été deux années particulièrement chaudes les plaçant en haut du classement des années les plus chaudes (Météo France, 2020, 2021). Comme rappelé précédemment, ces fortes chaleurs peuvent influencer la qualité des embryons et les capacités implantatoires de ceux-ci dans l'environnement utérin des receveuses. Enfin, ces dernières années (de 2022 à 2024), les résultats ont semblé s'améliorer par rapport aux années 2019 à 2021, mais restent tout de même dégradés par rapport aux résultats obtenus avant 2016. Cette dégradation se traduit par une baisse de succès de 17%. Ces trois années se placent dans les cinq années les plus chaudes en France (Duchesne, 2025). A nouveau, les fortes chaleurs et le stress thermique associé ont pu constituer un facteur explicatif de cette diminution des performances. Toutefois, la fin de la crise sanitaire et la reprise des échanges semblent également avoir contribué à l'amélioration des chances de succès de gestation après 2021.

Pour finir, la région d'appartenance de la receveuse semble avoir eu un impact non négligeable sur les chances de réussite des transferts d'embryons. Parmi les régions, l'Auvergne semble avoir permis l'obtention des meilleures chances de réussite, suivi par la région Rhône-Alpes. Dans cette dernière, la probabilité de succès a été légèrement diminuée par rapport à la région Auvergne, mais de manière non significative. Les résultats sont donc approximativement similaires dans ces deux

régions. La région Bourgogne Franche Comté semble avoir fait l'objet de résultats fortement dégradés par rapport à ces dernières, avec une dégradation des probabilités de réussite par rapport à la région Auvergne. Enfin, dans les autres régions de France, les chances de succès ont été dégradées, mais de manière moins importante que la région Bourgogne Franche-Comté. À ce jour, aucune étude ne s'est intéressée aux différences de taux de gestation, après un transfert embryonnaire, spécifiquement dans ces régions.

Il semble important de noter que les données disponibles en Bourgogne Franche-Comté sont principalement présentes à partir de 2019. En effet, avant 2019, les données de cette région représentent moins de 5% des données de cette région, tandis que de 2019 à 2021 et de 2022 à 2024, ces données représentent respectivement 44% et 45% des données de Bourgogne Franche-Comté. Ces deux derniers groupes d'années présentent des résultats fortement diminués par rapport aux années ultérieures. Nous avons donc vérifié s'il y avait une interaction entre ces variables. Pour ce faire, nous avons réalisé un nouveau modèle en ne sélectionnant que les embryons transférés à partir de 2019. Ce nouveau modèle a mis à nouveau en avant des résultats dégradés en région Bourgogne Franche-Comté. Malgré la baisse des résultats de gestation depuis 2019, la différence sur les résultats de gestation dans cette région ne peut pas s'expliquer exclusivement par les mauvais résultats obtenus de manière généralement entre 2019 et 2021. Plusieurs autres hypothèses peuvent toutefois être avancées pour expliquer ces variations : des pratiques distinctes mises en œuvre au sein des coopératives, des niveaux de formation et d'expérience variables entre les techniciens, ou encore des différences dans la technique employée et dans la qualité du matériel utilisé. Comme rappelé précédemment, la région Bourgogne Franche-Comté compte de très nombreuses productions laitières sous signe de qualité. Ces AOP imposent des cahiers des charges stricts impactant l'alimentation. Cette alimentation à base de fourrages secs pourrait induire un déficit énergétique plus prononcé dans cette région et impacterait ainsi les résultats de reproduction. D'autres facteurs pourraient également intervenir, tel que les pratiques d'élevages, les conditions environnementales locales ou encore la gestion des receveuses lors de la période de transfert (le protocole utilisé et la rigueur avec laquelle les éleveurs le respecte). Il semble très compliqué à l'heure actuelle de préciser les facteurs responsables des différences observées.

2. Critiques des méthodes statistiques

L'approche statistique de cette étude repose sur une combinaison d'analyses, descriptives, exploratoires et explicatives, visant à identifier les facteurs influençant les succès de gestation à l'issue d'un transfert embryonnaire. Bien que ces méthodes soient globalement adaptées à la nature des données, il est important de discuter et nuancer certains points.

a. Justification des méthodes employées

L'analyse descriptive ainsi que le test du Khi² ont été utilisés afin d'évaluer l'association globale des variables avec le résultat de gestation. Ce test a permis de détecter une hétérogénéité dans la distribution des fréquences, même lorsque les intervalles de confiance se chevauchaient. Ce test évalue en effet l'ensemble des écarts entre les fréquences observées et attendues. Ainsi, les écarts cumulés suffisent à rejeter l'hypothèse d'indépendance, sans que cela soit visible lors des comparaisons individuelles. Ce fut le cas de nombreuses fois avec les variables de rang de vêlage, de race, de saison par exemple.

Les coefficients de corrélation ont été employés afin de mesurer la force des relations entre les variables. Ces coefficients ont permis d'identifier des variables très fortement corrélées, impliquant une redondance de l'information. C'est pourquoi certaines variables (parité, saison et année de collecte) ont été retirées du reste de l'analyse.

L'ACM a été retenue pour sa capacité exploratoire des données, permettant une visualisation intuitive des relations entre les modalités de l'étude. Le taux de variance expliqué par les deux premiers axes (16,32%) peut sembler modeste mais est classique en ACM parce que les variables qualitatives sont composées de nombreuses modalités, dispersant la variance. En pratique, il est rare que les deux premiers axes d'une ACM expliquent plus de 20% de la variance.

Enfin, une régression logistique a été réalisée afin d'identifier les variables qui ont un effet significatif sur la probabilité de succès d'une gestation à l'issue d'un transfert embryonnaire, tout en contrôlant les autres variables. Cette méthode fournit

des coefficients interprétables d'odds ratio (OR). De plus, les tests de colinéarités et la vérification des résidus du modèle logistique (via le diagnostic statistique DHRAMA utilisé sur R) ont permis de conclure sur la justesse et la robustesse du modèle.

b. Divergence entre les analyses descriptives et explicatives

Des divergences ont été objectivées entre les résultats descriptifs (test du χ^2 , taux de succès par modalités) et la régression logistique. La régression permet d'estimer l'effet propre de chaque variable, en contrôlant les autres variables, permettant de révéler des effets masqués dans l'analyse univariée. Cette méthode permet d'ajuster les relations entre variable et résultat de gestation, en limitant les biais d'interprétation. Il est donc préférable de se fier à la régression logistique pour l'analyse des résultats.

c. Divergence entre l'ACM et la régression logistique

L'ACM et la régression logistique reposent sur des approches méthodologiques différentes, ce qui peut conduire à des résultats parfois divergents. L'ACM, en tant qu'approche descriptive, met en évidence les associations globales entre les modalités et les individus, sans tenir compte des effets croisés ou du contrôle des autres variables. À l'inverse, la régression logistique permet d'estimer l'effet propre de chaque variable sur la probabilité d'obtenir un résultat positif ou négatif, en ajustant pour l'ensemble des facteurs inclus dans le modèle. Ainsi, il peut arriver qu'une modalité apparaisse associée à un résultat positif dans l'ACM, alors que la régression logistique révèle, après ajustement, une association négative. Dans notre étude, ce phénomène est illustré par le cas des génisses et des vaches en cinquième lactation ou plus : bien que l'ACM suggère une tendance favorable, la régression logistique met en évidence un effet défavorable une fois les autres variables prises en compte. Ces différences rappellent la nécessité d'interpréter avec prudence les résultats des analyses descriptives et de privilégier les méthodes explicatives pour tirer des conclusions robustes.

3. Limites générales de l'étude

Comme toute étude scientifique, certaines limites sont à prendre en considération lors de l'interprétation des résultats. Bien que la taille de l'échantillon soit importante,

la nature rétrospective de l'étude ne permet pas de contrôler le choix et la standardisation des données, impliquant une certaine hétérogénéité dans les données. De cette manière, certaines variables, jugées importantes (état corporel, protocoles de synchronisation des chaleurs utilisés, variables relatant les conditions d'élevage par exemple), sont absentes dans cette étude, pouvant impliquer un biais de confusion. Le choix d'une régression logistique permet de s'affranchir en partie de ce biais de confusion. Bien que le modèle logistique se soit révélé fiable, avec des indicateurs de fiabilité très bons (résidus bien répartis, gestion des outliers), sa capacité prédictive est restée tout de même limitée ($AUC = 0,59$). Ce résultat suggère que les variables présentes sont associées au succès de gestation, mais ne permettent pas une discrimination très efficace entre les receveuses gestantes ou non.

4. Perspectives et recommandations

Afin d'améliorer le modèle et de préciser le pouvoir explicatif de la régression logistique, il serait recommandé d'homogénéiser la prise d'information sur la collecte et le transfert des embryons afin que les variables soient uniformes et complètes. De cette manière cela permettrait de prendre en compte de nouvelles variables non présentes jusqu'à présent. C'est l'objectif que s'est fixé l'entreprise avec la mise en place d'une application utilisable par tous les techniciens de transfert d'embryon. Cette application a pour but de prendre en compte les conditions d'élevages d'un point de vue alimentaire, de juger la receveuse sur sa qualité en tant que receveuse au moment du transfert (état corporel, présence de corps jaune, manifestation ou non des chaleurs à l'issue du protocole). Enfin, le technicien devra confirmer ou non la mise en place d'une gestation à l'issue du transfert.

CONCLUSION

L'amélioration génétique constitue un enjeu majeur pour l'élevage bovin, afin de produire des animaux performants, et adaptés à leur environnement. Dans ce cadre, des dispositifs innovants, tels que la sélection assistée par la génomique et le transfert embryonnaire, permettent une diffusion rapide et ciblée du progrès génétique. Néanmoins, la baisse récente des taux de gestation dans certaines coopératives de transfert françaises a mis en évidence la nécessité de mieux comprendre les facteurs influençant la réussite du transfert embryonnaire.

Le travail présenté dans cette thèse a permis, d'une part, de synthétiser les connaissances disponibles sur les facteurs influençant la réussite du transfert embryonnaire et, d'autre part, d'analyser des données de terrain afin d'identifier les pratiques actuelles et leurs impacts. Les déterminants du succès de gestation sont multiples et concernent à la fois la production des embryons, la sélection et la préparation des receveuses, ainsi que leur environnement. Plusieurs leviers d'amélioration existent, parmi lesquels l'utilisation préférentielle d'embryons frais, produits et transférés en dehors des périodes de stress thermique. La sélection des receveuses, basée sur leur état corporel, leur statut métabolique et sanitaire, apparaît également déterminante.

Afin de construire un modèle prédictif plus robuste, de nouvelles collectes de données intégrant davantage de critères zootechniques seraient nécessaires. Une telle démarche est déjà amorcée au sein d'Umotest, grâce à la mise en place d'une application commune destinée aux techniciens de transfert, leur permettant de renseigner systématiquement les informations relatives aux receveuses et aux conditions d'intervention. L'analyse future de ces données devrait permettre d'élaborer un modèle explicatif plus fiable et d'uniformiser les pratiques entre coopératives et élevages. Enfin, les résultats de cette thèse constituent déjà une base intéressante pour la formation et l'accompagnement des techniciens de transfert embryonnaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, G. P., & Singh, J. (2021). Ovarian Follicular and Luteal Dynamics in Cattle. In *Bovine Reproduction* (p. 292-323). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119602484.ch25>
- Aerts, J., & Bols, P. (2010). Ovarian Follicular Dynamics : A Review with Emphasis on the Bovine Species. Part I: Folliculogenesis and Pre-antral Follicle Development. *Reproduction in Domestic Animals*, 45(1), 171-179. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2008.01302.x>
- Agabriel, J. (2010). *Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments : Tables Inra 2010. Édition remaniée*. Quae.
- Alkan, H., Karaşahin, T., Dursun, Ş., Satılmış, F., Erdem, H., & Güler, M. (2020). Evaluation of the factors that affect the pregnancy rates during embryo transfer in beef heifers. *Reproduction in Domestic Animals*, 55(4), Article 4. <https://doi.org/10.1111/rda.13623>
- Alvarez, R., Meneghel, M., Martinez, A., Pires, R., & Schammass, E. (2008). Transfer of Bovine Blastocysts Derived from Short-term In Vitro Culture of Low Quality Morulae Produced In Vivo. *Reproduction in Domestic Animals*, 43(3), 257-260. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2007.00884.x>
- Armstrong, D. V. (1994). Heat Stress Interaction with Shade and Cooling. *Journal of Dairy Science*, 77(7), 2044-2050. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77149-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77149-6)
- Arosh, J. A., Banu, S. K., & McCracken, J. A. (2016). Novel concepts on the role of prostaglandins on luteal maintenance and maternal recognition and establishment of pregnancy in ruminants. *Journal of Dairy Science*, 99(7), 5926-5940. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10335>
- Banos, G., Wall, E., Coffey, M. P., Bagnall, A., Gillespie, S., Russell, G. C., & McNeilly, T. N. (2013). Identification of Immune Traits Correlated with Dairy Cow Health, Reproduction and Productivity. *PLOS ONE*, 8(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065766>
- Baruselli, P. S., Ferreira, R. M., Sales, J. N. S., Gimenes, L. U., Sá Filho, M. F., Martins, C. M., Rodrigues, C. A., & Bó, G. A. (2011). Timed embryo transfer programs for management of donor and recipient cattle. *Theriogenology*, 76(9), 1583-1593. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2011.06.006>
- Bastidas, P., & Randel, R. D. (1987). Seasonal effects on embryo transfer results in Brahman cows. *Theriogenology*, 28(4), 531-540. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(87\)90258-5](https://doi.org/10.1016/0093-691X(87)90258-5)
- Bényei, B., Komlósi, I., Pécsi, A., Pollott, G., Marcos, C. H., de Oliveira Campos, A., & Lemes, M. P. (2006). The effect of internal and external factors on bovine embryo transfer results in a tropical environment. *Animal Reproduction Science*, 93(3), 268-279. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2005.07.012>
- Bernabucci, U., Lacetera, N., Baumgard, L. H., Rhoads, R. P., Ronchi, B., & Nardone, A. (2010). Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal*, 4(7), 1167-1183. <https://doi.org/10.1017/S175173111000090X>
- Berry, D. P., Friggens, N. C., Lucy, M., & Roche, J. R. (2016). Milk Production and Fertility in Cattle. *Annual Review of Animal Biosciences*, 4(Volume 4, 2016), 269-290. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-021815-111406>

- Bó, G. A., & Mapletoft, R. J. (2014). Historical perspectives and recent research on superovulation in cattle. *Theriogenology*, 81(1), 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2013.09.020>
- Bonacker, R. C., Gray, K. R., Breiner, C. A., Anderson, J. M., Patterson, D. J., Spinka, C. M., & Thomas, J. M. (2020). Comparison of the 7 & 7 Synch protocol and the 7-day CO-Synch + CIDR protocol among recipient beef cows in an embryo transfer program. *Theriogenology*, 158, 490-496. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.09.033>
- Bonnes, G., Desclauze, J., Montméas, L., Drogoul, C., Gadoud, R., Jussiaud, R., Le Loc'h, A., & Robin, G. (2013). *Reproduction des animaux d'élevage* (Troisième). Educagri.
- Bridges, G. A., Kruse, S. G., Funnell, B., Perry, G. A., Gunn, P. J., Arias, R. P., & Lake, S. L. (2012, décembre). *CHANGES IN BODY CONDITION ON OOCYTE QUALITY AND EMBRYO SURVIVAL*. Applied Reproductive Strategies in Beef Cattle, Sioux Falls.
- Brisson, J. (2003, mars 30). *Nutrition, alimentation et reproduction*. Symposium sur les bovins laitiers, Sainte-Anne-de-Bellevue.
- Broadbent, P. J., Stewart, M., & Dolman, D. F. (1991). Recipient management and embryo transfer. *Theriogenology*, 35(1), 125-139. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(91\)90152-4](https://doi.org/10.1016/0093-691X(91)90152-4)
- Bunning, H., Wall, E., Chagunda, M. G. G., Banos, G., & Simm, G. (2019). Heterosis in cattle crossbreeding schemes in tropical regions : Meta-analysis of effects of breed combination, trait type, and climate on level of heterosis1. *Journal of Animal Science*, 97(1), 29-34. <https://doi.org/10.1093/jas/sky406>
- Butler, W. R. (2003). Energy balance relationships with follicular development, ovulation and fertility in postpartum dairy cows. *Livestock Production Science*, 83(2), 211-218. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(03\)00112-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(03)00112-X)
- Cardona, J. C. A., Patino, H. O., Hernandez, M. M. R., Pereira, C. H., & Swanson, K. (2016). Effects of supplementation with protected polyunsaturated fatty acids on productive and hormonal parameters of embryo recipient heifers. *Boletim de Indústria Animal*, 73(2), 150-158. <https://doi.org/10.17523/bia.v73n2p150>
- Chagas e Silva, J., Lopes da Costa, L., & Robalo Silva, J. (2002). Plasma progesterone profiles and factors affecting embryo-fetal mortality following embryo transfer in dairy cattle. *Theriogenology*, 58(1), 51-59. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(02\)00906-8](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(02)00906-8)
- Chastant-Maillard, S. (2016, janvier 1). *Nutrition : Les grandes pannes de la reproduction chez la vache laitière*. SNGTV. <https://www2.sngtv.org/article-bulletin/nutrition-les-grandes-pannes-de-la-reproduction-chez-la-vache-laitiere/>
- Choi, W., Ro, Y., Choe, E., Hong, L., Lee, W., & Kim, D. (2023). Evaluation of Corpus Luteum and Plasma Progesterone the Day before Embryo Transfer as an Index for Recipient Selection in Dairy Cows. *Veterinary Sciences*, 10(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/vetsci10040262>
- Cozler, Y. L., Peccatte, J. R., Porhiel, J. Y., Brunschwig, P., & Disenhaus, C. (2009). Pratiques d'élevages et performances des génisses laitières : État des connaissances et perspectives. *INRAE Productions Animales*, 22(4), Article 4. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2009.22.4.3356>
- Daly, J., Smith, H., McGrice, H. A., Kind, K. L., & van Wettere, W. H. E. J. (2020). Towards Improving the Outcomes of Assisted Reproductive Technologies of Cattle and Sheep, with Particular Focus on Recipient Management. *Animals*, 10(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/ani10020293>

- Delaby, L., Nozière, P., & Sauvant, D. (2018). *Alimentation des ruminants : INRA 2018*. Editions Quae.
- Delteil, L., Bréchet, C., Fournier, E., & Leborgne, M.-C. (2018). *Nutrition et alimentation des animaux d'élevage : Tome 1*. Educagri Editions.
- Dezetter, C., Leclerc, H., Mattalia, S., Barbat, A., Boichard, D., & Ducrocq, V. (2015). Inbreeding and crossbreeding parameters for production and fertility traits in Holstein, Montbéliarde, and Normande cows. *Journal of Dairy Science*, 98(7), 4904-4913. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8386>
- Diniz, J., Ochoa, J., Montoya, L., Satrapa, R., Okuda, L., Pituco, E., Marcelino, R., & Oba, E. (2016). Immune-serological identification of infectious agents with influence on bovine embryo transfer in the north of Brazil. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 48(2), 145-152. <https://doi.org/10.4067/S0301-732X2016000200003>
- Direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (DRAAF) Auvergne-Rhône-Alpes. (2024). *Recensement agricole 2020 : Les exploitations produisant sous signes officiels de la qualité et de l'origine (hors bio) en Auvergne-Rhône-Alpes*. https://draaf.auvergne-rhone-alpes.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/01_dossier_ra_siqo-2.pdf
- Doyle, D. N., Lonergan, P., Diskin, M. G., Pierce, K. M., Kelly, A. K., Stanton, C., Waters, S. M., Parr, M. H., & Kenny, D. A. (2019). Effect of dietary n-3 polyunsaturated fatty acid supplementation and post-insemination plane of nutrition on systemic concentrations of metabolic analytes, progesterone, hepatic gene expression and embryo development and survival in beef heifers. *Theriogenology*, 127, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.12.037>
- Dubois, S. (2016). *Le transfert embryonnaire chez les bovins*. [Thèse de doctorat vétérinaire]. VetAgro Sup.
- Duchesne, C. (2025). *Année 2024 en France : Au 5ème rang des plus chaudes depuis 1900 - Actualités La Chaîne Météo*. <https://actualite.lachainemeteo.com/actualite-meteo/2024-12-31/annee-2024-en-france-au-5eme-rang-des-plus-chaudes-depuis-1900-74210>
- Edmonson, A. J., Lean, I. J., Weaver, L. D., Farver, T., & Webster, G. (1989). A Body Condition Scoring Chart for Holstein Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 72(1), 68-78. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(89\)79081-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(89)79081-0)
- Ennuyer, M., & Laumonnier, G. (2013). *Vade Mecum de gestion de l'élevage bovin laitier* (Med'com).
- Erdem, H., Karasahin, T., Alkan, H., Dursun, S., Satilmis, F., & Guler, M. (2020). Effect of embryo quality and developmental stages on pregnancy rate during fresh embryo transfer in beef heifers. *Tropical Animal Health and Production*, 52(5), Article 5. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02287-6>
- Esterman, R. D., Alava, E. N., Austin, B. R., Hersom, M. J., & Yelich, J. V. (2016). Select Synch and Co-Synch protocols using a CIDR yield similar pregnancy rates after a fixed-time insemination in suckled *Bos indicus* × *Bos taurus* cows. *Theriogenology*, 85(5), 870-876. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2015.10.035>
- Estrada-Cortés, E., Ortiz, W. G., Chebel, R. C., Jannaman, E. A., Moss, J. I., De Castro, F. C., Zolini, A. M., Staples, C. R., & Hansen, P. J. (2019). Embryo and cow factors affecting pregnancy per embryo transfer for multiple-service, lactating Holstein recipients. *Translational Animal Science*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.1093/tas/txz009>
- Fernandes, C. A. D. C., Palhao, M. P., Figueiredo, A. C. S., Ribeiro, J. R., E Silva, F. F., & Viana, J. H. M. (2016). Weight gain potential affects pregnancy rates in bovine embryo recipients raised under

pasture conditions. *Tropical Animal Health and Production*, 48(1), 103-107.
<https://doi.org/10.1007/s11250-015-0926-0>

Ferraz, P. A., Burnley, C., Karanja, J., Viera-Neto, A., Santos, J. E. P., Chebel, R. C., & Galvão, K. N. (2016). Factors affecting the success of a large embryo transfer program in Holstein cattle in a commercial herd in the southeast region of the United States. *Theriogenology*, 86(7), Article 7.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.05.032>

Forde, N., Beltam, N. E., Lonergan, P., Diskin, M., Roche, J. F., & Crowe, M. A. (2011). Oestrous cycles in *Bos taurus* cattle. *Animal Reproduction Science*, 124(3-4), 163-169.
<https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2010.08.025>

Frade, M. C., Frade, C., Cordeiro, M. B., Sá Filho, M. F. D., Mesquita, F. S., Nogueira, G. D. P., Binelli, M., & Membrive, C. M. B. (2014). Manifestation of estrous behavior and subsequent progesterone concentration at timed-embryo transfer in cattle are positively associated with pregnancy success of recipients. *Animal Reproduction Science*, 151(3-4), Article 3-4.
<https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.09.005>

Funston, R. N., Lipsey, R. J., Geary, T. W., & Ansotegui, R. P. (2004). Evaluation of Three Estrous Synchronization Protocols in Beef Heifers¹. *The Professional Animal Scientist*, 20(5), 384-387.
[https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)31335-8](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)31335-8)

Gamarra, G., Ponsart, C., Lacaze, S., Le Guienne, B., Deloche, M.-C., Monniaux, D., & Ponter, A. A. (2014). Short term dietary propylene glycol supplementation affects circulating metabolic hormones, progesterone concentrations and follicular growth in dairy heifers. *Livestock Science*, 162, 240-251.
<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.01.015>

Hansen, P. J. (2020). The incompletely fulfilled promise of embryo transfer in cattle—Why aren't pregnancy rates greater and what can we do about it? *Journal of Animal Science*, 98(11), Article 11.
<https://doi.org/10.1093/jas/skaa288>

Hanzen, C. (2008, 2009). *La production d'embryons in vitro dans l'espèce bovine*.
http://www.therioruminant.ulg.ac.be/notes/200809/R30_Embryons_invivo_2009_PWP.pdf

Hanzen, C., Lourtie, O., & Drion, P. V. (2000). Le développement folliculaire chez la vache Aspects morphologiques et cinétiques. *Annales de Médecine Vétérinaire*, 144(4), 225-235.

Hasler, J. F. (2001). Factors affecting frozen and fresh embryo transfer pregnancy rates in cattle. *Theriogenology*, 56(9), 1401-1415. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(01\)00643-4](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(01)00643-4)

Hasler, J. F. (2006). The Holstein cow in embryo transfer today as compared to 20 years ago. *Theriogenology*, 65(1), 4-16. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.10.002>

Herbut, P., Angrecka, S., & Walczak, J. (2018). Environmental parameters to assessing of heat stress in dairy cattle—A review. *International Journal of Biometeorology*, 62(12), 2089-2097.
<https://doi.org/10.1007/s00484-018-1629-9>

Hidalgo, C. O., Gómez, E., Prieto, L., Duque, P., Goyache, F., Fernández, L., Fernández, I., Facal, N., & Díez, C. (2004). Pregnancy rates and metabolic profiles in cattle treated with propylene glycol prior to embryo transfer. *Theriogenology*, 62(3), Article 3.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2003.11.006>

Hurley, W. L., & Doane, R. M. (1989). Recent Developments in the Roles of Vitamins and Minerals in Reproduction. *Journal of Dairy Science*, 72(3), 784-804. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(89\)79170-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(89)79170-0)

Institut de l'élevage. (2025). *Résultats du contrôle laitier Espèce bovine_France 2024*.

Islam, R. (2011). Synchronization of Estrus in Cattle : A Review. *Veterinary World*, 4(3), 136-141. <https://doi.org/10.5455/vetworld.2011.136-141>

Jaśkowski, B. M., Herudzińska, M., Gehrke, M., & Nizański, W. (2022). The impact of the cavitary corpus luteum on the blood progesterone concentration and pregnancy rate of embryo recipient heifers. *Theriogenology*, 178, 73-76. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2021.11.003>

Jaśkowski, B. M., Opałka, A., Gehrke, M., Herudzińska, M., Czeladko, J., Baumgartner, W., & Jaśkowski, J. M. (2021). A Critical Overview on Prostaglandin Inhibitors and Their Influence on Pregnancy Results after Insemination and Embryo Transfer in Cows. *Animals : an Open Access Journal from MDPI*, 11(12), 3368. <https://doi.org/10.3390/ani11123368>

Jussiau, R., & Papet, A. (2015). *Croissance des animaux d'élevage; Bases scientifiques, itinéraires zootechniques et qualité des viandes*.

Karashin, T., Alkan, H., Satilmis, F., Dursun, S., & Erdem, H. (2021). Effect of flunixin meglumine treatment during and after embryo transfer on the pregnancy rate in cattle. *Reproduction in Domestic Animals*, 56(12), Article 12. <https://doi.org/10.1111/rda.14019>

Karisch, B., & Parish, J. (2024). *Estrous Synchronization in Cattle* (No. P2614; p. 8). Mississippi State University Extension Service. <http://extension.msstate.edu/publications/estrous-synchronization-cattle>

Kasimanickam, R. K., Hall, J. B., Estill, C. T., Kastelic, J. P., Joseph, C., Abdel Aziz, R. L., & Nak, D. (2018). Flunixin meglumine improves pregnancy rate in embryo recipient beef cows with an excitable temperament. *Theriogenology*, 107, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2017.10.043>

Kasimanickam, R., Kasimanickam, V., Gold, J., Moore, D., Kastelic, J. P., Pyrdok, D., & Ratzburg, K. (2019). Injectable or transdermal flunixin meglumine improves pregnancy rates in embryo transfer recipient beef cows without altering returns to estrus. *Theriogenology*, 140, 8-17. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2019.08.011>

Kesler, D. J. (2005). *ESTRUS SYNCHRONIZATION SYSTEMS: GnRH*. Proceedings, Applied Reproductive Strategies in Beef Cattle, Texas A&M University.

Kesler, D. J. (2023). Synchronization of Estrus in Heifers. *The Professional Animal Scientist*, 19(2), 96-108. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)31388-7](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)31388-7)

Lacroix, S. (2020). *Influence du vieillissement sur la physiologie de la reproduction de la vache âgée [Thèse d'exercice]*. Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort.

Lamb, G. C., & Mercadante, V. R. G. (2014). Selection and Management of the Embryo Recipient Herd for Embryo Transfer. In *Bovine Reproduction* (p. 723-732). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118833971.ch78>

Lamb, G. C., Stevenson, J. S., Kesler, D. J., Garverick, H. A., Brown, D. R., & Salfen, B. E. (2001). Inclusion of an intravaginal progesterone insert plus GnRH and prostaglandin F2 α for ovulation

- control in postpartum suckled beef cows. *Journal of Animal Science*, 79(9), 2253-2259.
<https://doi.org/10.2527/2001.7992253x>
- Le Cozler, Y. (2015). Reproduction chez la génisse laitière. *Repromag*, 2015, 12-23. HAL-01210956.
- Lindner, G. M., & Wright, R. W. (1983). Bovine embryo morphology and evaluation. *Theriogenology*, 20(4), 407-416. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(83\)90201-7](https://doi.org/10.1016/0093-691X(83)90201-7)
- Long, N. M., Burns, T. A., Duckett, S. K., & Schafer, D. W. (2014). Reproductive performance and serum fatty acid profiles of underdeveloped beef heifers supplemented with saturated or unsaturated rumen bypass fat compared to an isocaloric control. *The Professional Animal Scientist*, 30(5), 502-509. <https://doi.org/10.15232/pas.2014-01311>
- Looney, C. R., Nelson, J. S., Schneider, H. J., & Forrest, D. W. (2006). Improving fertility in beef cow recipients. *Theriogenology*, 65(1), Article 1. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.09.023>
- Madureira, A. M. L., Burnett, T. A., Marques, J. C. S., Moore, A. L., Borchardt, S., Heuwieser, W., Guida, T. G., Vasconcelos, J. L. M., Baes, C. F., & Cerri, R. L. A. (2022). Occurrence and greater intensity of estrus in recipient lactating dairy cows improve pregnancy per embryo transfer. *Journal of Dairy Science*, 105(1), 877-888. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20437>
- Mann, G. E., & Lamming, G. E. (2001). Relationship between maternal endocrine environment, early embryo development and inhibition of the luteolytic mechanism in cows. *Reproduction*, 121(1), 175-180. <https://doi.org/10.1530/rep.0.1210175>
- Marques, O., Veronese, A., Merenda, V. R., Bisinotto, R. S., & Chebel, R. C. (2020). Effect of estrous detection strategy on pregnancy outcomes of lactating Holstein cows receiving artificial insemination and embryo transfer. *Journal of Dairy Science*, 103(7), 6635-6646. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17892>
- Martens, H. (2023). Invited Review : Increasing Milk Yield and Negative Energy Balance: A Gordian Knot for Dairy Cows? *Animals: An Open Access Journal from MDPI*, 13(19), 3097. <https://doi.org/10.3390/ani13193097>
- Martínez, J. F., Galina, C. S., Ortiz, P., Maquivar, M. G., & Romero-Zúñiga, J. J. (2021). Effects of Season on Donor and Recipient Cows and Calf Performance from Birth to Weaning in Embryo Transfer Programs in the Tropics. *Animals : an Open Access Journal from MDPI*, 11(12), 3596. <https://doi.org/10.3390/ani11123596>
- Mekuriaw, Y. (2023). Negative energy balance and its implication on productive and reproductive performance of early lactating dairy cows : Review paper. *Journal of Applied Animal Research*, 51(1), 220-228. <https://doi.org/10.1080/09712119.2023.2176859>
- Meschy, F. (2023). *Nutrition minérale des ruminants. (Nouvelle édition)* (Deuxième édition). Editions Quae.
- Météo France. (2020). *Bilan climatique de l'année 2019 sur la France métropolitaine*. <https://meteofrance.fr/sites/meteofrance.fr/files/files/editorial/Bilan-climatique-annee2019.pdf>
- Météo France. (2021). *Bilan climatique de l'année 2020 sur la France métropolitaine*. https://meteofrance.fr/sites/meteofrance.fr/files/files/editorial/Bilan_annuel_2020_d%C3%A9finitif_140121.pdf

- Meyer, C. (2009). *INFLUENCE DE L'ALIMENTATION SUR LA REPRODUCTION DES BOVINS DOMESTIQUES* (p. 52) [Document de travail]. CIRAD. <https://agritrop.cirad.fr/549746/>
- Millar, R. P. (2005). GnRHs and GnRH receptors. *Animal Reproduction Science*, 88(1), 5-28. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2005.05.032>
- Morrow, D. A. (1976). Fat Cow Syndrome. *Journal of Dairy Science*, 59(9), 1625-1629. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(76\)84415-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(76)84415-3)
- Mounier, L., Ledoux, D., & Aubé, L. (2021, novembre 2). Le froid arrive : Il faut vite mettre les vaches à l'abri ! VRAI ou FAUX - Chaire bien-être animal. *Chaire bien être animal*. <https://chaire-bea.vetagro-sup.fr/le-froid-arrive-il-faut-vite-mettre-les-vaches-a-labri-vrai-ou-faux/>
- Murgue, P., Hermant, A., Lamonica, J., Lapointe, S., Foucher, E., Forgue, I., Mairot, S., & Bligny, C. (2022). *Guide de l'abreuvement*.
- Parguel, P., Perrot, C., & Pfimlin, A. (2005, décembre 18). Diversité des systèmes laitiers en France et en Europe. Les atouts des zones défavorisées pour les produits de qualité. *Fourages*, 493-512.
- Pate, J. L. (2020). Roadmap to pregnancy during the period of maternal recognition in the cow : Changes within the corpus luteum associated with luteal rescue. *Theriogenology*, 150, 294-301. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.01.074>
- Patterson, D. J., Stegner, J. E., Perry, G. A., Kojima, F. N., & Smith, M. F. (2001, décembre). *Emerging Protocols to Synchronize Estrus in Replacement Beef Heifers and Postpartum Cows*. Proceedings, The Range Beef Cow Symposium XVII, Casper, Wyoming. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1083&context=rangebeefcowsymp>
- Pereira, M. H. C., Cooke, R. F., Alfieri, A. A., & Vasconcelos, J. L. M. (2013). Effects of vaccination against reproductive diseases on reproductive performance of lactating dairy cows submitted to AI. *Animal Reproduction Science*, 137(3), 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2012.12.011>
- Pereira, M. H. C., Wiltbank, M. C., & Vasconcelos, J. L. M. (2016). Expression of estrus improves fertility and decreases pregnancy losses in lactating dairy cows that receive artificial insemination or embryo transfer. *Journal of Dairy Science*, 99(3), 2237-2247. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9903>
- Phillips, P. E., & Jahnke, M. M. (2016). Embryo Transfer (Techniques, Donors, and Recipients). *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 32(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2016.01.008>
- Picard-Hagen, N., & Gayrard. (2008). La physiologie ovarienne chez la vache : Nouveautés et applications. *Bulletin des Groupements Techniques Vétérinaires*, 43-54.
- Pinaffi, F. L. V., Santos, É. S., Silva, M. G. da, Maturana Filho, M., Madureira, E. H., & Silva, L. A. (2015). Follicle and corpus luteum size and vascularity as predictors of fertility at the time of artificial insemination and embryo transfer in beef cattle. *Pesquisa Veterinária Brasileira*, 35(5), 470-476. <https://doi.org/10.1590/S0100-736X2015000500015>
- Pugliesi, G., Dalmaso de Melo, G., Silva, J. B., Carvalhêdo, A. S., Lopes, E., de Siqueira Filho, E., Silva, L. A., & Binelli, M. (2019a). Use of color-Doppler ultrasonography for selection of recipients in timed-embryo transfer programs in beef cattle. *Theriogenology*, 135(1), 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2019.06.006>

- Pugliesi, G., Dalmaso de Melo, G., Silva, J. B., Carvalhêdo, A. S., Lopes, E., de Siqueira Filho, E., Silva, L. A., & Binelli, M. (2019b). Use of color-Doppler ultrasonography for selection of recipients in timed-embryo transfer programs in beef cattle. *Theriogenology*, 135, 73-79.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2019.06.006>
- Pugliesi, G., de Melo, G. D., Ataíde, G. A., Pellegrino, C. A. G., Silva, J. B., Rocha, C. C., Motta, I. G., Vasconcelos, J. L. M., & Binelli, M. (2018). Use of Doppler ultrasonography in embryo transfer programs : Feasibility and field results. *Animal Reproduction*, 15(3), 239-246.
<https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR2018-0059>
- Putney, D. J., Thatcher, W. W., Drost, M., Wright, J. M., & DeLorenzo, M. A. (1988). Influence of environmental temperature on reproductive performance of bovine embryo donors and recipients in the southwest region of the united states. *Theriogenology*, 30(5), 905-922.
[https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(88\)80053-0](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(88)80053-0)
- Rabaglino, M. B., Sánchez, J. M., Mc Donald, M., Crowe, M. A., O’Callaghan, E., & Lonergan, P. (2023). Transfer of bovine embryos into a uterus primed with high progesterone concentrations positively impacts fetal development at 42 days of gestation. *Theriogenology*, 200, 25-32.
<https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2023.01.020>
- Rensis, F. D., & Scaramuzzi, R. J. (2003). Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow—A review. *Theriogenology*, 60(6), 1139-1151. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(03\)00126-2](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(03)00126-2)
- Ribeiro, E. S., Lima, F. S., Greco, L. F., Bisinotto, R. S., Monteiro, A. P. A., Favoreto, M., Ayres, H., Marsola, R. S., Martinez, N., Thatcher, W. W., & Santos, J. E. P. (2013). Prevalence of periparturient diseases and effects on fertility of seasonally calving grazing dairy cows supplemented with concentrates. *Journal of Dairy Science*, 96(9), 5682-5697. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6335>
- Robert, C. (2022). *Spécificités de l'alimentation lors de la mise à la reproduction des génisses [Thèse d'exercice]*. VetAgro Sup.
- Rodrigues, M., Bonotto, A., Acosta, D., Boligon, A., Corrêa, M., & Brauner, C. (2018). Effect of oestrous synchrony between embryo donors and recipients, embryo quality and state on the pregnancy rate in beef cattle. *Reproduction in Domestic Animals*, 53(1), Article 1.
<https://doi.org/10.1111/rda.13084>
- Roper, D. A., Schrick, F. N., Edwards, J. L., Hopkins, F. M., Prado, T. M., Wilkerson, J. B., Saxton, A. M., Young, C. D., & Smith, W. B. (2018). Factors in cattle affecting embryo transfer pregnancies in recipient animals. *Animal Reproduction Science*, 199, 79-83.
<https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2018.11.001>
- Roth, Z. (2016). Effect of Heat Stress on Reproduction in Dairy Cows : Insights into the Cellular and Molecular Responses of the Oocyte. *Annual Review of Animal Biosciences*, 8(5), 151-170.
<https://doi.org/10.1146/annurev-animal-022516-022849>
- Sales, J. N. S., Pereira, R. V. V., Bicalho, R. C., & Baruselli, P. S. (2011). Effect of injectable copper, selenium, zinc and manganese on the pregnancy rate of crossbred heifers (Bos indicus × Bos taurus) synchronized for timed embryo transfer. *Livestock Science*, 142(1), 59-62.
<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.06.014>
- Santos, G. M. G. D., Junior, L. B., Silva-Santos, K. C., Ayres Dias, J. H., Dias, I. D. S., Seneda, M. M., & Morotti, F. (2023). Conception rate and pregnancy loss in fixed-time cattle embryo transfer programs

are related to the luteal blood perfusion but not to the corpus luteum size. *Theriogenology*, 210, 251-255. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2023.07.039>

Say, E., Özmen, M. F., & Sağırkaya, H. (2021). The Influence of Corpus Luteum Size on the Conception in Embryo Transfer Recipient Cows. *Livestock Studies*, 61(2), 77-81. <https://doi.org/10.46897/livestockstudies.610205>

Schneider, H. J., Castleberry, R. S., & Griffin, J. L. (1980). Commercial aspects of bovine embryo transfer. *Theriogenology*, 13(1), 73-85. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(80\)90016-3](https://doi.org/10.1016/0093-691X(80)90016-3)

Siqueira, L. G. B., Torres, C. A. A., Souza, E. D., Monteiro, P. L. J., Arashiro, E. K. N., Camargo, L. S. A., Fernandes, C. A. C., & Viana, J. H. M. (2009). Pregnancy rates and corpus luteum-related factors affecting pregnancy establishment in bovine recipients synchronized for fixed-time embryo transfer. *Theriogenology*, 72(7), 949-958. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2009.06.013>

Šmigoc, J., Pavšič Vrtač, K., Jakovac Strajn, B., Stvarnik, M., & Mrkun, J. (2023). Preventive Supplementation of Vitamin E and Selenium as a Factor in Improving the Success Rate of Embryo Transfer in Cattle. *Acta Veterinaria*, 73(1), 87-101. <https://doi.org/10.2478/acve-2023-0007>

Stroud, B., & Hasler, J. F. (2006). Dissecting why superovulation and embryo transfer usually work on some farms but not on others. *Theriogenology*, 65(1), 65-76. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.10.007>

Thibier, M. (1988). Le recours à la Gonadolibérine (GnRH) ou analogues en médecine vétérinaire. Analyse pharmacologique et thérapeutique chez les bovins. *Annales de Recherches Vétérinaires*, 19(3), 153-167.

Thomson, S. P., Holmes, R. J., Landes, P. T., & Allworth, M. B. (2021). Assessment and selection of the recipient cows' corpus luteum at the time of embryo transfer, and its influence on conception rate. *Australian Veterinary Journal*, 99(7), 288-292. <https://doi.org/10.1111/avj.13068>

Torres-Júnior, J. R. de S., Pires, M. de F. A., de Sá, W. F., Ferreira, A. de M., Viana, J. H. M., Camargo, L. S. A., Ramos, A. A., Folhadella, I. M., Polisseni, J., de Freitas, C., Clemente, C. A. A., de Sá Filho, M. F., Paula-Lopes, F. F., & Baruselli, P. S. (2008). Effect of maternal heat-stress on follicular growth and oocyte competence in *Bos indicus* cattle. *Theriogenology*, 69(2), 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.06.023>

Valadao, L., Moreira da Silva, H., & Moreirada Silva, F. (2019). Bovine Embryonic Development to Implantation. In B. Wu & H. L. Feng (Éds.), *Embryology : Theory and Practice* (p. 1-10). IntechOpen. <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/130825>

Vasconcelos, J. L. M., Demétrio, D. G. B., Santos, R. M., Chiari, J. R., Rodrigues, C. A., & Filho, O. G. S. (2006). Factors potentially affecting fertility of lactating dairy cow recipients. *Theriogenology*, 65(1), 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2005.09.030>

Wakchaure, R., Ganguly, S., Praveen, P. K., Sharma, S., Kumar, A., Mahajan, T., & Qadri, K. (2015). Importance of Heterosis in Animals : A Review. *Nternational Journal of Advanced Engineering Technology and Innovative Science*, 1(2), 1-5.

Xie, C., Huang, C., Yan, L., Yao, R., Xiao, J., Yang, M., Chen, H., Tang, K., Zhou, D., Lin, P., Wang, A., & Jin, Y. (2024). Recipients' and Environmental Factors Affecting the Pregnancy Rates of a Large, Fresh In Vitro Fertilization-Embryo Transfer Program for Dairy Cows in a Commercial Herd in China. *Veterinary Sciences*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/vetsci11090410>

Yasothai, R. (2014). Importance of minerals on reproduction in dairy cattle. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 3(6), 2051-2057.

Zimbelman, R., Rhoads, R., Rhoads, M., Duff, G., Baumgard, L., & Collier, R. (2009, janvier 1). *A Re-evaluation of the Impact of Temperature Humidity Index (THI) and Black Globe Humidity Index (BGHI) on Milk Production in High Producing Dairy Cows*. Proceedings of the Western Dairy Management Conference, Reno, Nevada, Etats-Unis.

ANNEXES

Annexe 1 : Grille de notation de l'état corporel des bovins (NEC)

	SCORE	Spinous processes (SP) (anatomy varies)	Spinous to Transverse processes	Transverse processes	Overhanging shelf (care - rumen fill)	Tuber coxae (hooks) & Tuber ischia (pins)	Between pins and hooks	Between the hooks	Tailhead to pins (anatomy varies)
SEVERE UNDERCONDITIONING (emaciated)	1.00	individual processes distinct, giving a saw-tooth appearance	deep depression	very prominent, > 1/2 length visible	definite shelf, gaunt, tucked	extremely sharp, no tissue cover	severe depression, devoid of flesh	severely depressed	bones very prominent with deep "V" shaped cavity under tail
	1.25			1/2 length of process visible					
	1.50								
	1.75								
FRAME OBVIOUS	2.00	individual processes evident	obvious depression		prominent shelf	prominent	very sunken		bones prominent "U" shaped cavity formed under tail
	2.25			between 1/2 to 1/3 of processes visible			thin flesh covering	definite depression	first evidence of fat
	2.50	sharp, prominent ridge		1/3 - 1/4 visible			depression	moderate depression	bones smooth, cavity under tail shallow & fatty tissue lined
	2.75			< 1/4 visible			slight depression	slight depression	
FRAME & COVERING WELL BALANCED	3.00			appears smooth, TP's just discernable		covered	sloping	flat	bones rounded with fat and slight fat-filled depression under fat
	3.25			distinct ridge, no individual processes discernable		rounded with fat	flat		
	3.50	smooth ridge, the SP's not evident	smooth slope	smooth, rounded edge	none				
	3.75	flat, no processes discernable	nearly flat	edge barely discernable	bulging				
FRAME NOT AS VISIBLE AS COVERING	4.00								
	4.25								
	4.50								
	4.75								
SEVERE OVERCONDITIONING	5.00	buried in fat	rounded (convex)	buried in fat			rounded	rounded	

Annexe 2 : Besoins, en énergie, protéines, phosphore et calcium des génisses laitières (d'après Agabriel, 2010)

Poids vif (kg)	GMQ (g)	Apports journaliers			
		UFL	PDI (g)	Ca _{abs} (g)	P _{abs} (g)
150	600	2,8	286	11,0	7,8
	800	3,2	329	13,9	8,4
	1 000	3,7	372	16,8	9,0
200	400	3,0	282	8,5	8,0
	600	3,4	330	11,2	8,6
	800	3,8	373	13,9	9,2
	1 000	4,3	412	16,7	9,9
250	400	3,5	319	9,0	8,7
	600	3,9	367	11,6	9,3
	800	4,4	410	14,2	10,0
	1 000	5,0	448	16,8	10,8
300	200	3,5	299	7,0	8,7
	400	3,9	355	9,5	9,3
	600	4,4	404	12,0	10,0
	800	5,0	446	14,5	10,8
	1 000	5,6	483	17,0	11,7
350	200	3,9	333	7,7	9,3
	400	4,4	391	10,1	9,9
	600	4,9	441	12,5	10,7
	800	5,5	482	14,9	11,6
	1 000	6,2	516	17,3	12,5
400	200	4,3	367	8,3	9,9
	400	4,8	428	10,7	10,5
	600	5,4	479	13,0	11,4
	800	6,1	518	15,4	12,3
	1 000	6,9	552	17,7	13,4
450	200	4,7	401	9,0	10,4
	400	5,2	465	11,3	11,1
	600	5,9	515	13,6	12,0
	800	6,7	550	15,9	13,1
	1 000	7,5	600	18,2	14,4
500	200	5,1	436	9,7	10,9
	400	5,7	505	12,0	11,7
	600	6,4	553	14,2	12,7
	800	7,2	583	16,4	14,0
	1 000	8,2	664	18,7	15,3
550	200	5,5	478	10,4	11,4
	400	6,1	552	12,6	12,3
	600	6,9	598	14,8	13,5
	800	7,9	632	17,0	14,8
	1 000	9,0	720	19,2	16,4
600	200	5,8	530	11,1	12,0
	400	6,5	612	13,3	13,0
	600	7,5	648	15,4	14,3
	800	8,6	687	17,6	15,8
	1 000	9,9	792	19,7	17,7

GMQ = gain moyen quotidien, Ca_{abs}= calcium absorbé, P_{abs}= phosphore absorbé

Poids vif (kg)	GMQ (g)	Apports journaliers			
		UFL	PDI (g)	Ca _{abs} (g)	P _{abs} (g)*
250	400	3,4	315	9,0	7,4
	600	3,8	366	11,6	8,1
	800	4,2	413	14,2	8,8
	1 000	4,6	458	16,8	9,6
300	200	3,5	294	7,0	7,5
	400	3,8	350	9,5	8,2
	600	4,2	402	12,0	8,9
	800	4,7	451	14,5	9,7
	1 000	5,1	496	17,1	10,5
350	200	3,9	326	7,7	8,3
	400	4,3	384	10,1	8,9
	600	4,7	438	12,5	9,7
	800	5,1	487	15,0	10,6
	1 000	5,6	533	17,4	11,5
400	200	4,3	357	8,4	9,0
	400	4,7	418	10,7	9,7
	600	5,1	473	13,1	10,5
	800	5,6	524	15,4	11,4
	1 000	6,1	570	17,8	12,4
450	200	4,7	389	9,0	9,7
	400	5,1	452	11,3	10,4
	600	5,5	510	13,6	11,3
	800	6,1	561	15,9	12,2
	1 000	6,6	607	18,2	13,3
500	200	5,0	421	9,7	10,3
	400	5,5	488	12,0	11,1
	600	6,0	548	14,2	12,0
	800	6,5	600	16,5	13,1
	1 000	7,2	646	18,7	14,2
550	200	5,4	454	10,4	11,0
	400	5,8	526	12,6	11,8
	600	6,4	589	14,8	12,8
	800	7,0	642	17,0	13,9
	1 000	7,7	687	19,2	15,2
600	200	5,7	489	11,2	11,6
	400	6,2	568	13,3	12,5
	600	6,8	634	15,5	13,6
	800	7,5	688	17,6	14,8
	1 000	8,3	729	19,8	16,2

Annexe 4 : Besoins en énergie, protéines et calcium, phosphore des vaches laitières, d'après (Delaby, Nozière, Sauvant 2018).

2016/7

Besoins		UFL (/j)			PDI ² (g/j)			Ca _{abs} ³ (g/j)		P _{abs} ³ (g/j)			
Entretien	Poids vif (kg)	Situation ¹			MSI (kg/j)			MSI (kg/j)					
		A1	A2	A3	15	20	25						
	500	5,4	5,7	6,2	464	563	661	10	11,4	9,5			
	550	5,8	6,1	6,7	481	579	678	13	13,4	12,0			
	600	6,2	6,5	7,1	497	595	694	16	15,4	14,5			
	650	6,6	6,9	7,6	513	612	710	19	17,4	17,0			
	700	6,9	7,3	8,0	529	628	727	22	19,4	19,5			
	750	7,3	7,7	8,4	54	644	743	25	21,4	22,0			
Lactation	Lait (kg/j)	Taux butyreux (g/kg)					Taux protéique (g/kg)				Lait (kg/j)		
		32	36	40	44	48	28	30	32	34			
	10	3,7	3,9	4,2	4,5	4,7	418	448	478	507	10	12,1	8,7
	15	5,5	5,9	6,3	6,7	7,1	627	672	716	761	15	18,2	13,1
	20	7,4	7,9	8,4	8,9	9,4	836	896	955	1015	20	24,2	17,4
	25	9,2	9,9	10,5	11,1	11,8	1045	1119	1194	1269	25	30,3	21,8
	30	11,1	11,8	12,6	13,4	14,1	1254	1343	1433	1522	30	36,3	26,1
	35	12,9	13,8	14,7	15,6	16,5	1463	1567	1672	1776	35	42,4	30,5
	40	14,8	15,8	16,8	17,8	18,8	1672	1791	1910	2030	40	48,4	34,8
	45	16,6	17,8	18,9	20,0	21,2	1881	2015	2149	2284	45	54,5	39,2
	50	18,5	19,7	21,0	22,3	23,5	2090	2239	2388	2537	50	60,5	43,5
	55	20,3	21,7	23,1	24,5	25,9	2299	2463	2627	2791	55	66,6	47,9
	60	22,2	23,7	25,2	26,7	28,2	2507	2687	2866	3045	60	72,6	52,2

Ces besoins sont exprimés en fonction des besoins d'entretien et de lactation. Les besoins d'entretien dépendent de la stabulation (A1 = stabulation entravée, A2 = stabulation libre, A3 = pâturage), de la matière sèche ingérée (MSI) exprimé en kg/j. Les besoins de lactation dépendent de la production laitière quotidienne mais aussi des taux butyreux et protéiques.

Annexe 5 : Valeurs d'Indice de Température et d'Humidité selon l'humidité et la température selon (d'après Collier et al. 2012).

Température	Humidité relative (%)																				
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
22.0	64	65	65	65	66	66	67	67	67	68	68	69	69	69	70	70	71	71	72	72	72
23.0	65	65	66	66	66	67	67	68	68	68	69	69	70	70	71	71	71	72	72	73	73
23.5	65	66	66	67	67	67	68	68	69	69	70	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74
24.0	66	66	67	67	68	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75
24.5	66	67	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75	76	76
25.0	67	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75	76	76	77
25.5	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	73	73	74	74	75	75	76	76	77	77	78
26.0	67	68	69	69	70	70	71	71	72	73	73	74	74	75	76	76	77	77	78	78	79
26.5	68	69	69	70	70	71	72	72	73	73	74	75	75	76	76	77	78	78	79	79	80
27.0	68	69	70	70	71	72	72	73	73	74	75	75	76	77	77	78	78	79	80	80	81
28.0	69	69	70	71	71	72	73	73	74	75	75	76	77	77	78	79	79	80	81	81	82
28.5	69	70	71	71	72	73	73	74	75	75	76	77	78	78	79	80	80	81	82	82	83
29.0	70	70	71	72	73	73	74	75	75	76	77	78	78	79	80	80	81	82	83	83	84
29.5	70	71	72	72	73	74	75	75	76	77	78	78	79	80	81	81	82	83	84	84	85
30.0	71	71	72	73	74	74	75	76	77	78	78	79	80	81	81	82	83	84	84	85	86
30.5	71	72	73	73	74	75	76	77	78	79	80	81	81	82	83	84	85	85	86	87	87
31.0	72	72	73	74	75	76	76	77	78	79	80	81	81	82	83	84	85	86	87	87	88
31.5	72	73	74	75	75	76	77	78	79	80	80	81	82	83	84	85	86	86	87	88	89
32.0	72	73	74	75	76	77	78	79	79	80	81	82	83	84	85	86	86	87	88	89	90
33.0	73	74	75	76	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	86	87	88	89	90	91
33.5	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	85	86	87	88	89	90	91	92
34.0	74	75	76	77	78	79	80	80	81	82	83	85	85	86	87	88	89	90	91	92	93
34.5	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	86	86	87	88	89	90	91	92	93	94
35.0	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
35.5	75	76	77	78	79	80	81	82	83	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
36.0	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	91	92	93	94	95	96	97
36.5	76	77	78	80	80	82	83	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	98	98
37.0	76	78	79	80	81	82	83	84	85	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	98	99
38.0	77	78	79	81	82	83	84	85	86	87	88	90	91	92	93	94	95	96	98	99	100
38.5	77	79	80	81	82	83	84	86	87	88	89	90	92	93	94	95	96	98	99	100	101
39.0	78	79	80	82	83	84	85	86	87	89	90	91	92	94	95	96	97	98	100	101	102
39.5	78	79	81	82	83	84	86	87	88	89	91	92	93	94	96	97	98	99	101	102	103
40.0	79	80	81	83	84	85	86	88	89	90	91	93	94	95	96	98	99	100	101	103	104
40.5	79	80	82	83	84	86	87	88	89	91	92	93	95	96	97	99	100	101	102	103	105
41.0	80	81	82	84	85	87	88	89	90	91	93	94	95	97	98	99	101	102	103	104	106
41.5	80	81	83	84	85	87	88	89	91	92	94	95	96	98	99	100	102	103	104	106	107
42.0	81	82	83	85	86	88	89	90	92	93	94	95	97	98	100	101	103	104	105	107	108
43.0	81	82	84	85	87	89	89	91	92	94	95	96	98	99	101	102	103	105	106	108	109
43.5	81	83	84	86	87	89	90	91	93	94	96	97	99	100	101	103	104	105	107	109	110
44.0	82	83	85	86	88	90	91	92	94	95	96	98	99	101	102	104	105	107	108	110	111
44.5	82	84	85	87	88	90	91	93	94	96	97	99	100	102	103	105	106	108	109	111	112
45.0	83	84	86	87	89	91	92	93	95	96	98	99	101	102	104	105	107	108	110	111	113
45.5	83	85	86	88	89	92	92	94	96	97	99	100	102	103	105	106	108	109	111	112	114
46.0	84	85	87	88	90	92	93	95	96	98	99	101	102	104	106	107	109	110	112	113	115
46.5	84	86	87	89	90	93	94	95	97	98	100	102	103	105	106	108	110	111	113	114	116
47.0	85	86	88	89	91	93	94	96	98	99	101	102	104	106	107	109	111	112	114	115	117
48.0	85	87	88	90	92	94	95	97	98	100	102	103	105	106	108	110	111	113	115	116	118
48.5	85	87	89	90	92	94	96	97	99	101	102	104	106	107	109	111	112	114	116	117	119
49.0	86	88	89	91	93	95	96	98	100	101	103	105	106	108	110	111	113	115	117	118	120

- THI < 68 : aucun stress thermique
- **THI entre 68 et 71** : seuil à partir duquel on observe les premiers signes de stress thermique : la fréquence respiratoire passe à 60 inspirations par minute, la température rectale dépasse les 38,5°C, la production laitière et les performances de reproduction commencent à être impactées
- **THI entre 72 et 79** : stress thermique léger à modéré : la fréquence respiratoire dépasse les 75 inspirations par minute, la température rectale dépasse les 39°C
- **THI entre 80 et 89** : stress thermique modéré à sévère : la fréquence respiratoire dépasse les 85 inspirations par minute, la température rectale dépasse les 40°C
- **THI entre 90 et 98** : stress thermique sévère : la fréquence respiratoire atteint 120 à 140 inspirations par minute, la température rectale dépasse les 41°C
- THI supérieur à 99 : risque de mort

CRITERES DE REUSSITE LORS DE TRANSFERTS EMBRYONNAIRES BOVINS : ANALYSE DES DONNEES RELATIVES AUX VACHES RECEVEUSES ISSUES DE PLUSIEURS CENTRES DE TRANSFERT

Auteur

BOUCARD Lucine

Résumé

Le transfert embryonnaire s'impose aujourd'hui comme une technique majeure d'amélioration génétique. En réduisant l'intervalle entre les générations, il permet d'accélérer la diffusion du progrès génétique au sein des élevages. Son efficacité repose cependant sur la réussite de la gestation à l'issue du transfert. Pour optimiser ce démarrage, plusieurs facteurs doivent être pris en compte. La qualité de l'embryon est déterminante : un prélèvement réalisé au bon stade, sur un embryon frais et viable, augmente nettement les chances d'implantation. Du côté de la femelle receveuse, les conditions d'élevage jouent un rôle essentiel. L'alimentation doit couvrir l'ensemble de ses besoins, afin d'éviter toute carence ou déséquilibre métabolique, et garantir un état corporel satisfaisant. Le logement doit quant à lui favoriser l'expression des comportements naturels, tout en protégeant les animaux du froid et surtout des fortes chaleurs, sources de stress thermique particulièrement néfaste à la reproduction. Le respect strict du protocole choisi par la coopérative est également un facteur clé. Les périodes de chaleur estivale doivent être évitées, tant pour la pose que pour la collecte des embryons, le stress ayant un effet globalement négatif sur les performances reproductives. Enfin, la maîtrise technique des opérateurs conditionne directement le succès de l'intervention. Ainsi, le transfert embryonnaire, s'il est conduit dans des conditions optimales, constitue un outil efficace et prometteur pour accélérer le progrès génétique dans les élevages et ainsi améliorer la race dans le but d'améliorer sa productivité et sa résistance.

Mots-clés

Transfert, Embryon, Receveuse, Gestation, Génétique, Amélioration

Jury

Président du jury : Pr **BECKER Claire**

Directeur de thèse : Pr **BRUYERE Pierre**

2ème assesseur : Pr **CHALVET-MONFRAY Karine**