



HAL
open science

Vers un outil d'aide à la décision : modélisation des co-infections respiratoires lors de l'engraissement des jeunes bovins en France pour mieux les contrôler

Théo Salles

► To cite this version:

Théo Salles. Vers un outil d'aide à la décision : modélisation des co-infections respiratoires lors de l'engraissement des jeunes bovins en France pour mieux les contrôler. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04919667

HAL Id: dumas-04919667

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04919667v1>

Submitted on 29 Jan 2025

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

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

ANNEE 2024 - Thèse n° 140

**VERS UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION :
MODÉLISATION DES CO-INFECTIONS RESPIRATOIRES
LORS DE L'ENGRAISSEMENT DES JEUNES BOVINS EN
FRANCE POUR MIEUX LES CONTRÔLER**

THÈSE

pour l'obtention du diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant l'UFR de

la Faculté de Médecine de l'Université de Nantes

le 06/12/2024

par

Théo Patrick SALLES

Sous la direction de

Pauline EZANNO

Président du jury : Monsieur Madouasse Aurélien.....Maître de conférences

Membres du jury : Monsieur Assié Sébastien.....Maître de conférences

Madame, Ezanno Pauline.....Directrice de recherche

ONIRIS – VetAgroBio Nantes

ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE,

AGROALIMENTAIRE ET DE L'ALIMENTATION

Site de la Chantrerie
101 route de Gachet
44307 Nantes Cedex 3



ANNEE 2024 - Thèse n° 140

**VERS UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION :
MODÉLISATION DES CO-INFECTIONS RESPIRATOIRES
LORS DE L'ENGRAISSEMENT DES JEUNES BOVINS EN
FRANCE POUR MIEUX LES CONTRÔLER**

THÈSE

pour l'obtention du diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant l'UFR de

la Faculté de Médecine de l'Université de Nantes

le 06/12/2024

par

Théo Patrick SALLES

Sous la direction de

Pauline EZANNO

Président du jury : Monsieur Madouasse Aurélien.....Maître de conférences

Membres du jury : Monsieur Assié Sébastien.....Maître de conférences

Madame, Ezanno Pauline.....Directrice de recherche

ONIRIS – VetAgroBio Nantes

ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE,

AGROALIMENTAIRE ET DE L'ALIMENTATION

Site de la Chantrerie
101 route de Gachet
44307 Nantes Cedex 3



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

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

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

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

- Nom et prénoms de l'auteur : Théo SALLES
- Année de soutenance : 2024
- Titre de la thèse : Vers un outil d'aide à la décision : Modélisation des co-infections respiratoires lors de l'engraissement des jeunes bovins en France pour mieux les contrôler
- Intitulé du diplôme : Thèse de doctorat vétérinaire
- Université de soutenance : Faculté de Médecine de Nantes.
- École de soutenance : VetAgroBio Nantes Oniris
- Nombre de pages : 139 p.

Remerciements

Au docteur Aurélien MADOUASSE

VetAgroBio Nantes, Oniris

Élevage, nutrition et santé des animaux domestiques,

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de la soutenance de ma thèse,

Hommages respectueux

Au docteur Sébastien ASSIE

VetAgroBio Nantes, Oniris

Médecine des animaux d'élevage

Pour votre aide, votre disponibilité, votre intérêt pour ma thèse,
Sincères remerciements

À la directrice de recherche Pauline EZANNO

INRAE, unité BIOEPAR, équipe DYNAMO

Pour avoir accepté d'être ma maître de thèse et pour votre encadrement,
Pour m'avoir fait découvrir le monde de la recherche,
Pour votre gentillesse,
Un grand merci

À l'ensemble de l'équipe DYNAMO, pour votre accueil, et tout particulièrement à Guita NIANG et Baptiste SORIN, pour le travail que vous avez effectué pour ma thèse,
Toute ma gratitude

Aux stagiaires que j'ai pu côtoyer, Sacha, Angélique, Yvann et Pierre,
Bonne continuation.

Sommaire

Liste des Annexes.....	10
Liste des Tableaux.....	11
Liste des Figures.....	12
Liste des Abréviations.....	14
Introduction.....	16
Partie 1 : Bibliographie sur les maladies respiratoires contagieuses des jeunes bovins à l'engraissement.....20	
I/ Généralités.....	20
A) Prévalence des maladies respiratoires chez les jeunes bovins à l'engraissement.....	20
B) Épidémiologie des maladies respiratoires contagieuses des jeunes bovins à l'engraissement.....	21
1/ Les voies de contamination et de transmission des agents pathogènes du BRD.....	21
2/ Les co-infections d'un individu par différents agents pathogènes.....	23
3/ Les facteurs de risque de la BRD.....	24
II/ Impact économique des maladies respiratoires contagieuses des jeunes bovins à l'engraissement.....	25
A) Impact de la mortalité due aux maladies respiratoires.....	25
B) Les répercussions économiques des maladies respiratoires des jeunes bovins à l'engraissement sur la production.....	25
C) Les pénalités à l'abattoir lors de BRD du vivant de l'animal.....	26
D) Impact économique des traitements contre la BRD.....	28
1/ Les impacts économiques de la vaccination contre la BRD.....	28
a) Le coût de la vaccination contre la BRD.....	28
b) Diminution de l'impact économique de la BRD sur les animaux vaccinés.....	29
2/ Les impacts économiques des traitements curatifs des animaux atteints de la BRD.....	30
a) Le coût des traitements curatifs des animaux atteints de la BRD.....	30
b) Diminution de l'impact économique de la BRD sur les animaux lors de traitements.....	32
3/ Les impacts économiques d'un traitement métaphylactique.....	33
a) Le coût d'un traitement métaphylactique.....	33
b) Diminution de l'impact économique de la BRD sur les animaux lors de traitements métaphylactiques.....	33
4/ Impact des traitements contre la BRD sur l'antibiorésistance des bactéries respiratoires.....	34
E) Temps consacré par les éleveurs aux animaux pour lutter contre la BRD.....	36
F) Valorisation des animaux en fonction de leur immunité à l'achat.....	37
III) Les agents pathogènes des maladies respiratoires bovines.....	38
A) Les virus.....	38
1/ Étiologies des virus impliqués dans la BRD.....	38
2/ Pathogénie générale des virus de la BRD.....	42
3/ Particularités des espèces.....	44
a) Latence et réactivation du BHV.....	44
b) Animaux infectés persistants immunotolérants lors de BVD.....	44
c) La réglementation de l'IBR et de la BVD.....	44
4/ Prévalences et distributions des virus de la BRD.....	46

B) Les bactéries.....	48
1/ Les PASTEURELLACEAE.....	48
a) Étiologies des PASTEURELLACEAE de la BRD.....	48
b) Pathogénie générale des PASTEURELLACEAE de la BRD.....	49
c) Prévalences et distributions des PASTEURELLACEAE de la BRD.....	49
2/ Les Mycoplasmes.....	50
a) Étiologies des Mycoplasmes de la BRD.....	50
b) Pathogénie générale des Mycoplasmes de la BRD.....	50
c) Prévalences et distributions des Mycoplasmes de la BRD.....	50
IV/ Le diagnostic de la BRD.....	51
A) Les symptômes lors de la BRD.....	51
B) Les examens complémentaires possibles lors de BRD.....	52
C) Diagnostic post-mortem de la BRD.....	54
V/ Les traitements de la BRD.....	54
A) Les traitements préventifs de la BRD.....	54
1/ Par modification des conditions d'élevages.....	54
2/ Par la vaccination contre les agents pathogènes.....	55
a) Définition et utilisation de la vaccination chez les JB.....	55
b) Diminution de la BRD et amélioration des performances lors de vaccination chez les JB.....	55
B) Les traitements curatifs ou de soutien de la BRD.....	56
1/ Les traitements individuels.....	56
a) Les traitements antibiotiques.....	56
b) Les traitements de soutien.....	57
2/ Les traitements de groupe : la métaphylaxie.....	57
a) Définition et utilisation de la métaphylaxie chez les JB.....	57
b) Diminution de la BRD et amélioration des performances lors de traitements métaphylactiques chez les JB.....	58
C) La réforme ou l'euthanasie des animaux.....	58
 Partie 2 : Modélisation économique lors de co-infections respiratoires chez les jeunes bovins en France.....	 59
I/ Cadre et objectifs de l'étude.....	59
II/ Matériels et Méthodes.....	59
A) Généralités sur la modélisation en épidémiologie.....	59
1/ Objectifs de la modélisation en épidémiologie.....	59
2/ Les différents types de modèle en épidémiologie.....	60
3/ Le logiciel EMULSION.....	61
B) Le modèle de propagation BRDcoinfmodel.....	62
1/ Objectifs de modélisation du modèle BRDcoinfmodel.....	62
2/ Définitions des processus du modèle BRDcoinfmodel.....	63
a) La machine à états « BRSV ».....	64
b) La machine à états « <i>M. haemolytica</i> ».....	64
c) La machine à états « Vaccination ».....	64
d) La machine à états « Clinical signs ».....	65
e) La machine à états « Hyperthermia ».....	65
f) La machine à états « Detection ».....	65
g) La machine à états « Treatment ».....	66
3/ Entrées et sorties du modèle BRDcoinfmodel.....	66
a) Entrées du modèle BRDcoinfmodel.....	66

b) Sorties su modèle BRDcoinfmodel.....	66
C) Adaptation du modèle à une application de développement d'outils ergonomiques....	67
1/ Le logiciel PASTE.....	67
2/ Création du code yaml de PASTE afin de réaliser les simulations.....	68
a) Structure du code yaml de PASTE.....	68
b) Définitions des scénarios.....	69
3/ Calculs économiques sur les sorties du modèles BRDcoinfmodel.....	72
a) Prix d'achats des broutards.....	72
b) Coûts de l'alimentation des JB.....	73
c) Gain des ventes des JB à l'abattoir.....	74
d) Coûts des traitements.....	75
e) Coûts du travail.....	75
f) Résultats nets.....	77
4/ Modifications nécessaires du modèle et de l'outil généré par PASTE.....	77
D) Calculs statistiques.....	78
III/ Résultats.....	79
A) Ergonomie de l'outil.....	79
B) Description de résultats préliminaires du modèle économique.....	82
1/ Résultats économiques sans BRD.....	82
2/ Résultats économiques sans maîtrise.....	83
3/ Résultats économiques tous scénarios confondus.....	85
C) Coûts, gain et résultats par composant de scénario.....	86
1/ Impact de la métaphylaxie sur les résultats de l'engraissement.....	86
2/ Impact de la composition des lots sur les résultats de l'engraissement.....	88
3/ Impact du type de vaccin utilisé sur les résultats de l'engraissement.....	89
4/ Impact de la couverture vaccinale sur les résultats de l'engraissement.....	91
D) Interactions des différents composants de scénario entre eux.....	93
1/ Comparaison des résultats en fonction des différents scénarios.....	93
2/ Comparaison de la charge de travail en fonction des différents scénarios.....	95
3/ Impact des composants de scénario dans la survie des animaux en fonction de l'intensité des traitements.....	96
4/ Valorisation des broutards vaccinés.....	96
IV/ Discussion.....	98
A) Puissance de calcul et production des simulations.....	98
B) Validité du modèle économique.....	99
1/ Les hypothèses des modèles.....	99
a) Les hypothèses du modèle BRDcoinfmodel.....	99
b) Les hypothèses du modèle économique.....	99
2/ Confrontation du modèle au terrain.....	100
C) Discussion des résultats obtenus.....	101
D) Création d'un outil d'aide à la décision.....	103
E) Perspectives.....	104
1/ Vers un outil d'aide à la décision ?.....	104
2/ Création d'autres modèles économiques ?.....	105
Conclusions.....	106
Bibliographie.....	107
Annexe.....	126

Liste des Annexes

Annexe 1 : Caractéristiques des vaccins respiratoires bovins disponibles en France (245).....	126
Annexe 1A : Technologies et commercialisation des vaccins respiratoires bovins disponibles en France.....	126
Annexe 1B : Caractéristiques immunologiques des vaccins respiratoires bovins disponibles en France.....	127
Annexe 2 : Organigramme de la nomenclature des bovins (95).....	127
Annexe 3 : Calcul du coût de l'équarrissage en France.....	128
Annexe 4 : Calculs des pertes lors de dépréciation des carcasses (12).....	128
Annexe 4A : Note attribuée à chaque sous-classe de conformation de carcasse dans la thèse de Joly (12).....	128
Annexe 4B : Définition des notions de statut respiratoire de la thèse de Joly (12).....	129
Annexe 4C : Résultat des note de conformation en fonction du statut respiratoire présenté dans la thèse de Joly (12).....	129
Annexe 4D : Formules de calculs des pertes lors de dépréciation des carcasses pour les animaux selon le statut respiratoire.....	129
Annexe 5 : Calculs d'uniformisations des coûts en prenant en compte l'inflation du pays et du cours de la monnaie.....	130
Annexe 6: Les traitements métaphylactiques utilisés par les élevages engraisseurs plaines du sud des États-Unis (107).....	130
Annexe 7 : Définitions des statuts des élevages et des bovins par rapport à l'IBR.....	131
Annexe 7A : Définitions des différents statut d'un bovin par rapport à l'IBR selon la réglementation (152).....	131
Annexe 7B : Conditions à respecter pour devenir un élevage indemne par rapport à l'IBR (152).....	132
Annexe 7C : Condition à respecter pour garder le statut indemne par rapport à l'IBR (152).....	132
Annexe 8 : Résumé du score clinique développé par les chercheurs de l'University of Wisconsin-Madison (251).....	133
Annexe 9 : Tableau récapitulatif des antibiotiques utilisés pour la BRD et de leur classe pharmacologique.....	133
Annexe 10 : Calcul de la DE pour l'élevage type engraisseur charolais du grand Ouest de inosys réseaux d'élevage (86).....	133
Annexe 11 : Calcul de la diminution du GMQ en fonction du GMQ d'un animal sain.....	134
Annexe 12 : Tableaux des moyennes des résultats économiques pour les 164 scénarios.....	134
Annexe 12A : Légendes.....	134
Annexe 12B : Tableaux.....	134
Annexe 13 : Résultats par argent investi des différents scénarios réalisés par Sorin-Dupont (222)	138

Liste des Tableaux

Tableau I : Classification nominative des étiquetages des viandes issues de la production bovine hors veaux (2).....	17
Tableau II : Répartition des races de vaches allaitantes en France (7).....	19
Tableau III : Proportion des morts de bovins par des causes différentes de la prédation aux États-Unis en 2015.....	20
Tableau IV : Modalités de transmission inter et intra-troupeaux des agents pathogènes de la BRD.	23
Tableau V : Synthèse des articles sur les proportions du nombre d'agents pathogènes trouvés lors d'un épisode de la BRD.....	24
Tableau VI : Contribution relative dans les co-infections des agents pathogènes lors de la BRD (71).....	24
Tableau VII : Synthèse bibliographique de l'incidence et de la proportion de traitement réalisé en fonction du temps d'engraissement.....	25
Tableau VIII : Caractéristiques et performances moyennes par race (87).....	27
Tableau IX : Catégorisation selon la conformation de la carcasse des bovins à l'abattoir (91).....	28
Tableau X : Prix moyens annuels des gros bovins (en €/kg de carcasse) (92).....	29
Tableau XI : Synthèse bibliographique des coûts des vaccins pour la BRD.....	30
Tableau XII : Synthèse bibliographique des coûts des traitements curatifs pour la BRD.....	32
Tableau XIII: Synthèse bibliographique de l'impact économique des JB cliniques en fonction du nombre de traitements reçu.....	33
Tableau XIV : Synthèse bibliographique des coûts des traitements métaphylactiques pour la BRD	34
Tableau XV : Récapitulatif simplifié des protéines des VRS et de leurs principales fonctions.....	40
Tableau XVI : Récapitulatif simplifié des protéines du BPi-3 et de leurs principales fonctions.....	40
Tableau XVII : Récapitulatif simplifié des protéines du BCoV et de leurs principales fonctions (60,135).....	41
Tableau XVIII : Récapitulatif simplifié des protéines des virus de la BVD et de leurs fonctions....	42
Tableau XIX : Récapitulatif simplifié des protéines de l'IDV et de leurs fonctions (33).....	43
Tableau XX : Les différents systèmes atteints par Mycoplasma bovis et les maladies associées.....	51
Tableau XXI : Synthèse des signes cliniques lors de BRD chez les JB.....	52
Tableau XXII : Paramètres d'entrées modifiés avec les composants de scénario du modèle BRDcoinfmodel.....	68
Tableau XXIII : Variables de sorties dans le tableur csv du modèle BRDcoinfmodel.....	68
Tableau XXIV : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec métaphylaxie et sans.....	88
Tableau XXV : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec des lots triés ou non.....	90
Tableau XXVI : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec des vaccins réalisés avant l'arrivée ou à l'arrivée.....	92
Tableau XXVII : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec des vaccins divalents ou monovalents.....	92
Tableau XXVIII : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec des couvertures vaccinales de 10 % et de 50 %.....	94
Tableau XXIX : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec des couvertures vaccinales de 50 % et de 100 %.....	94
Tableau XXX : Différence de résultats par animal vacciné par couverture vaccinale entre vaccin réalisé avant l'arrivée en élevage et après.....	99

Liste des Figures

Figure 1 : Schéma de la filière allaitante française.....	17
Figure 2 : Répartition nationale française des JB.....	17
Figure 3 : Diagramme des résistances aux antibiotiques de <i>Pasteurella multocida</i> chez les jeunes bovins en 2022 (118).....	35
Figure 4 : Diagramme des résistances aux antibiotiques de <i>Mannheimia haemolytica</i> chez les jeunes bovins en 2022 (118).....	36
Figure 5 : Schémas vaccinaux acceptés par le cahier des charges de préparation sanitaire des broutards (124).....	38
Figure 6 : Organigramme de la classification de BHV-1 et des systèmes infectés en fonction de l'espèce.....	41
Figure 7 : Schéma simplifié du cycle viral des Influenzavirus (141).....	43
Figure 8 : diversité génétique relative de la protéine S du BCoV en fonction du temps (135).....	43
Figure 9 : Campagne de mise en place d'un plan de surveillance et de lutte contre la BVD en France par département (156).....	45
Figure 10 : Programme simplifié d'éradication de la BVD mis en place sur la zone SANITEA depuis 2017 (158).....	46
Figure 11 : Distribution du BCoV dans le monde (159).....	46
Figure 12 : Distribution du virus de la BVD dans le monde avant et après 2008 en fonction (A) de la présence d'anticorps ou (B) de la présence d'IPI (160).....	47
Figure 13 : Distribution par départements des bovins infectés par le BHV-1 en France en 2022 (163).....	48
Figure 14 : Aire de projection du poumon à droite d'une vache en autopsie (193).....	53
Figure 15 : Images de remaniements pulmonaires à l'échographie (192).....	53
Figure 16 : Structure d'une machine à 2 états (226).....	61
Figure 17 : Diversité des formalismes de modélisation possible avec EMULSION (226).....	62
Figure 18 : Evolution dans le temps du nombre d'animaux pas statut clinique pour le scénario « no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis ».....	63
Figure 19 : Schéma simplifié des différents états du modèle BRDcoinfmodel (222).....	64
Figure 20 : Vue d'ensemble des étapes successives de création des fichiers par PASTE (223).....	68
Figure 21 : Structure du code yaml de PASTE.....	69
Figure 22 : Définitions du composant « different_vax » et de ses sous-composants.....	70
Figure 23 : Définitions du composant « coverage » et de ses sous-composants.....	70
Figure 24 : Définitions du composant « batch_composition » et de ses sous-composants.....	71
Figure 25 : Définitions du composant « metaphylaxis_use » et de ses sous-composants.....	71
Figure 26 : Création du nom d'un scénario à partir des composants de scénario.....	72
Figure 27 : Distribution de la variable net gain pour le scénario « no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis ».....	78
Figure 28 : Description des variables dans le code yaml de PASTE.....	80
Figure 29 : Formulaire d'initialisation des variables dans l'outil web généré par PASTE.....	81
Figure 30 : Formulaire de sélection des scénarios dans l'outil web généré par PASTE.....	81
Figure 31 : Affichage des graphes par l'outil web généré par PASTE.....	82
Figure 32 : Coûts, gain et résultats du scénario « no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis ».....	84
Figure 33 : Différences de coûts et de gain entre la situation idéale et le scénario « no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis ».....	84
Figure 34 : Coûts, gain et résultats de tous les scénarios confondus associés à la visualisation des moyennes du scénario sans BRD et du scénario sans contrôle hors traitement individuel.....	85
Figure 35 : Coûts, gain et résultats des scénarios en fonction de l'utilisation de la métaphylaxie....	87

Figure 36 : Coûts, gain et résultats des scénarios en fonction de la composition des lots.....	88
Figure 37 : Coûts, gain et résultats des scénarios en fonction des types et du moment de la vaccination.....	90
Figure 38 : Coûts, gain et résultats des scénarios en fonction de la couverture vaccinale des lots....	92
Figure 39 : Résultat net en fonction de la couverture vaccinale par type de vaccin et composition des lots.....	94
Figure 40 : Charge de travail en fonction de la couverture vaccinale par type de vaccin et composition des lots.....	95
Figure 41 : Comparaison du nombre de morts en fonction du nombre d'antibiotiques utilisés pour tous les scénarios.....	97

Liste des Abréviations

AINS : Anti-inflammatoire non stéroïdien

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

AIS : Anti-inflammatoire stéroïdien

B2E : Broutard d'Excellence ELVEA

BCoV : Bovine coronavirus

BHV : Bovine herpesvirus

BHV-1 : Bovine alphaherpesvirus 1

BHV-5 : Bovine alphaherpesvirus 5

BPI : Bronchopneumonie infectieuse

BPI-3 : Bovine para-influenza de type 3

BRD : Bovine respiratory disease

BVD : Bovine viral diarrhea

BVDV : Bovine viral diarrhea virus

DE : Durée d'engraissement

DSL : domain-specific-language

EIC : Espace inter-costal

GDS : Groupements de

GMQ : Gain moyen quotidien

H. somni : *Histophilus somni*

IDV : Influenza D virus

interbev : interprofession bovin & bétail

IPI : Infecté persistant immunotolérant

IBR : Infectious bovine rhinotracheitis

INRAE : Institut national de recherches pour l' agronomie, l'alimentation et l'environnement

JB: Jeune bovin

M. bovis : *Mycoplasma bovis*

M. haemolytica : *Mannheimia haemolytica*

OMSA : Organisation mondiale de la santé animale

P. multocida : *Pasteurella multocida*

PAC : Politique Agricole Commune

PASTE : Platform for Automated Simulation and Tools in Epidemiology

PCR : Polymerase chain reaction

RESAPATH : Réseau de surveillance de l'antibiorésistance des bactéries pathogènes animales

RSV : Respiratory syncytial virus

UBE : Unité bétail équarrissage

UGB : Unité gros bétail

USDA : United states departement of agriculture

VRSB : Virus respiratoire syncytiale bovin

Introduction

L'élevage bovin français présente deux grandes filières : la filière laitière avec 3,5 millions de vaches (soit 48% de la filière bovine) et la filière allaitante avec 3,8 millions de vaches (soit 52% de la filière bovine) (1). La filière allaitante a pour finalité la production de viande bovine, soit de jeunes bovins, soit de taureaux, soit de bœufs (Tableau I). En France, il y a 93 000 exploitations possédant des vaches allaitantes, avec une moyenne de 38 vaches par exploitation (1). Il s'agit donc essentiellement de petits élevages familiaux, avec peu de main d'œuvre.

Tableau I : Classification nominative des étiquetages des viandes issues de la production bovine hors veaux (2)

CATÉGORIES	ÉTIQUETAGE
Bovin mâle ou femelle de 8 à 12 mois	« Jeune bovin » + étiquetage : âge à l'abattage entre 8 et 12 mois
Bovin mâle non castré de 12 à 24 mois	Jeune bovin
Bovin mâle non castré de plus de 24 mois	Taureau
Bovin mâle castré de plus de 12 mois	Bœuf
Bovin femelle ayant déjà vêlé	Vache
Bovin femelle de plus de 12 mois n'ayant jamais vêlé	Génisse

L'élevage allaitant est destiné à la production de veaux sous la mère. Les veaux sont élevés jusqu'à leur sevrage, entre 6 à 9 mois, dans les pâtures avec leurs mères (3-5). Les veaux ont alors 4 destinations différentes possibles (Figure 1). Un quart des veaux permettent le renouvellement du troupeau, avec principalement des femelles. Quelques taureaux sont vendus/achetés pour la reproduction, afin de diminuer la consanguinité de la descendance, pour assurer la pérennité des troupeaux. La reproduction dans ces élevages se fait principalement par monte naturelle. Deux tiers des veaux sont engraisés pour être abattus entre 1 et 3 ans dont la moitié est exportée vers d'autres pays d'Europe (6). Ce sont les jeunes bovins et les génisses. 6 % des veaux sont destinés à la production de veaux de boucherie, abattus avant l'âge de 6 mois. Les 3 % restants sont castrés et engraisés pour la production de bœufs. (3)

L'élevage allaitant se répartit en 3 formes différentes d'élevages: les naisseurs (49 700 exploitations) qui s'occupent de la reproduction et des veaux jusqu'à 6-9 mois ; les engraisseurs (12 700 exploitations) qui achètent des broutards (différenciation entre broutard et jeune bovin explicitée en Annexe 2) et s'occupent des jeunes bovins (JB) entre 6-9 mois et 12-24 mois (âge d'abattage) ; et les élevages mixtes naisseurs-engraisés (11 900 exploitations) qui font de la naissance à l'abattage, avec parfois quelques achats de broutards (5). 82 % des élevages naisseurs-engraisés n'achètent pas d'animaux (5). Les broutards sont d'abord achetés par un service d'opérateurs commerciaux intermédiaires permettant de les regrouper sur un même marché, pour être ensuite achetés par les élevages engraisés. Ces intermédiaires sont nécessaires car il y a une production plus faible de broutards dans un élevage naisseur que le besoin en élevage engraisseur (5). Dans ce processus, les animaux sont transportés sur de longues distances (5). Les éleveurs n'ont que peu d'informations sur les animaux qu'ils achètent. En effet, 70 % des engraisés ne

connaissent pas l'élevage de provenance de leurs animaux, et 57 % ne connaissent pas le statut vaccinal ou les traitements antibiotiques et antiparasitaires réalisés des animaux qu'ils achètent (5). Les élevages de JB sont majoritairement dans l'ouest de la France (Figure 2). Les JB sont engraisés en bâtiment et mis en lots de taille réduite afin de diminuer les contacts entre les animaux (5). En France, trois races dominent le marché en représentant environ 80 % des allaitants: la charolaise, la limousine et la blonde d'aquitaine (Tableau II) (7).

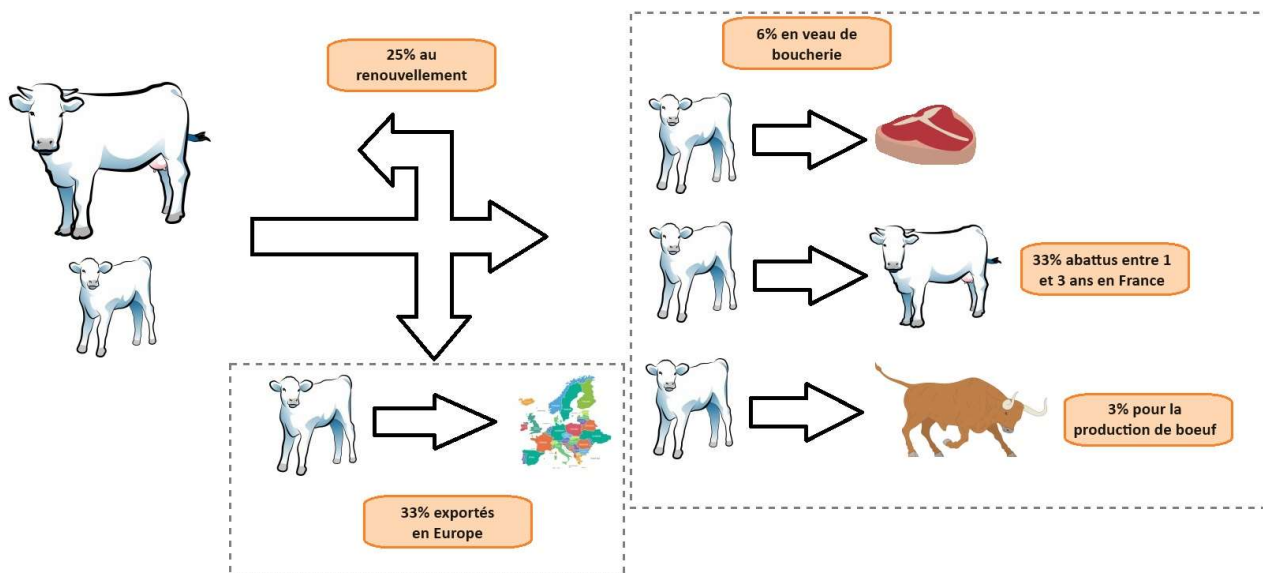


Figure 1 : Schéma de la filière allaitante française

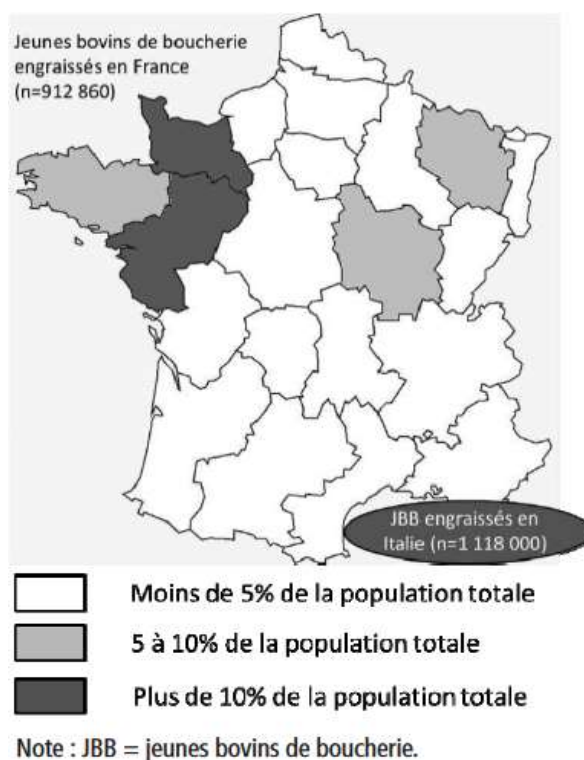


Figure 2 : Répartition nationale française des JB (5)

Tableau II : Répartition des races de vaches allaitantes en France (7)

Races	Nombres de vaches	Proportion
Charolaise	741 982	37,5 %
Limousine	577 292	29,2 %
Blonde d'aquitaine	309 904	15,7 %
Aubrac	156 653	7,9 %
Salers	82 696	4,2 %
Parthenaise	57 799	2,9 %
Rouge des Prés	34 609	1,8 %
Gasconne des Pyrénées	16 270	0,8 %

Une des principales maladies affectant les JB sont celles touchant le système respiratoire (Tableau III) (8,9), et particulièrement le complexe des bronchopneumonies infectieuses (BPI) qui causent le plus de mortalité de jeunes bovins aux États-Unis (10). Dans les études, la mortalité varie entre 0,7 % et 2,88 % (8,11–14). Cependant, l'objectif des études est souvent d'observer des cas de BPI, avec un suivi poussé des animaux. A l'échelle d'un élevage ou d'un lot, il est possible d'avoir entre 0 et 80 % de mortalité (8,12). Dans la littérature anglo-saxonne, la notion de BPI est retranscrite par « bovine respiratory disease (BRD) » ou « bovine respiratory disease complex (BRDC) ». Cette pathologie touche les différents systèmes de production. Dans cette thèse, nous allons surtout nous intéresser aux allaitants et particulièrement aux jeunes bovins pendant la phase d'engraissement.

La modélisation de la dynamique de propagation d'agents pathogènes et de la maîtrise des maladies associées permet de mettre à l'épreuve certaines théories épidémiologiques (par exemple de hiérarchiser les voies de transmission impliquées) et d'évaluer des plans de surveillance, de maîtrise ou d'éradication des maladies en testant différents scénarios (15–17). De tels travaux requièrent une grande quantité d'informations de terrain sur la maladie, les agents pathogènes impliqués, l'espèce hôte atteinte, et ceci afin de créer un modèle réaliste et robuste (16,17).

L'équipe DYNAMO, intégrée à l'unité de recherche BIOEPAR (INRAE / Oniris), a pour objectif de contribuer à mieux comprendre et anticiper les dynamiques d'infection des animaux, dans des situations sanitaires contrastées, en mobilisant des approches de modélisation épidémiologique. Cette équipe a mené de nombreux travaux notamment sur des maladies bovines telles que la BRD (18,19) ou la diarrhée virale bovine (BVD, (20–23)) en collaboration avec des vétérinaires cliniciens ou épidémiologistes de l'École Nationale Vétérinaire de Nantes (VetAgroBio, Oniris Nantes).

Tableau III : Proportion des morts de bovins par des causes différentes de la prédation aux États-Unis en 2015 (10)

Causes hors prédation	Cattle		Calves	
	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
Maladies digestives ¹	134 240	7,9 %	293 670	15,4 %
Maladies respiratoires ²	404 410	23,9 %	512 680	26,9 %
Maladies métaboliques ³	42 590	2,5 %	23 150	1,2 %
Mammites	71 720	4,2 %	9 220	0,5 %
Blessures ou boiteries	108 710	6,4 %	36 110	1,9 %
Autres maladies	91 943	5,4 %	80 950	4,3 %
Intempéries ⁴	157 400	9,3 %	261 900	13,7 %
Maladies lors du jeune âge	152 800	9,0 %	339 730	17,8 %
Intoxications ⁵	23 810	1,4 %	8 820	0,5 %
Vieillessement	200 270	11,8 %	NA	NA
Volées	10 940	0,7 %	13 150	0,7 %
Autres causes hors prédation	58 040	3,4 %	55 150	2,9 %
Causes inconnues	237 750	14,0 %	269 920	14,2 %
Total	1 694 620	100,0 %	1 904 810	100,0 %

¹Comme les parasites, l'entérotoxémie, l'acidose, la météorisation ou les diarrhées

²Comme les pneumonies ou les fièvres du transport

³Comme la fièvre de lait ou la tétanie de l'herbage

⁴Comme la noyade, la foudre ou de froid

⁵Comme par les nitrates, les aliments nocifs ou les foin nocifs

Ma thèse a pour objectif de réaliser un prototype d'outil d'aide à la décision à partir d'une analyse coût/bénéfice sur un modèle de contrôle de la BRD lors de co-infections dans un élevage de jeunes bovins à l'engraissement pour les différents contrôles du modèle. Pour cela, j'ai utilisé le modèle individu-centré développé par DYNAMO pour représenter la propagation de la BRD dans un élevage engraisseur multi-lots (18), dans sa version la plus récente tenant compte de la circulation concomitante et des possibles interactions entre deux agents pathogènes (un virus et une bactérie) impliqués dans la BRD. Sur la base d'une revue de la littérature, j'ai raffiné le choix des valeurs de paramètres du modèle et j'ai ajouté des paramètres économiques pour permettre la comparaison de scénarios sur la base d'un critère financier résumant pertes (mortalité, impact sur la croissance, etc.), coûts (traitement, alimentation, etc.) et gains (vente, etc.). J'ai comparé sur la base de ce critère plusieurs scénarios en termes d'organisation de l'élevage, de risque individuel de déclarer une BRD, et de type de traitement (individuel vs. collectif). Ce modèle pourra à terme être décliné comme un outil d'aide à la décision pour favoriser la communication entre les vétérinaires et les éleveurs pour raisonner les traitements et les choix en termes de pratiques d'élevage.

Partie 1 : Bibliographie sur les maladies respiratoires contagieuses des jeunes bovins à l'engraissement

I/ Généralités

A) Prévalence des maladies respiratoires chez les jeunes bovins à l'engraissement

La prévalence de la BRD chez les jeunes bovins (JB) à l'engraissement est hétérogène. Certains articles estiment que les maladies respiratoires comptent pour environ 75% des maladies des JB (8,9,24), et une prévalence entre 15 et 59,4% dans les élevages atteints (8,25–27). En France, la prévalence semble plutôt être estimée entre 15 et 20% (24,28,29). La prévalence est souvent définie comme le nombre de bovins atteints présentant des signes cliniques sur le nombre de bovins étudiés. Certaines études choisissent volontairement d'être plus spécifiques, et ne choisissent que des animaux avec des signes cliniques (30), traités et présentant des lésions pulmonaires à l'abattoir ; quand d'autres choisissent d'être plus sensibles, et comptabilisent tous les animaux présentant des signes cliniques ou des lésions pulmonaires (8,13,31). Cette dissonance entre prévalence clinique et prévalence lésionnelle, suggère qu'il existe des cas sub-cliniques non détectés, présentant des troubles respiratoires observables à l'autopsie ou à l'abattoir, sans signe clinique du vivant de l'animal. (8,25).

De nombreux agents pathogènes sont impliqués dans la bronchopneumonie infectieuse bovine (BPI), répartis en pathogènes viraux et pathogènes bactériens. Les virus de la BRD les plus consensuels sont le virus respiratoire syncytial bovin (VRSB), le coronavirus bovin (BCoV), le virus de la rhinotrachéite infectieuse bovine (IBR), le virus de la diarrhée virale bovine (BVDV), et le para-influenza bovin de type 3 (BPI-3), auquel on peut rajouter le virus influenza bovin de type D (IDV) découvert en 2011 (32). Certains articles incluent aussi d'autres virus comme l'Influenza de type C (33) ou l'adénovirus bovin (27) dont leur implications dans la BRD sont discutées. Les bactéries les plus consensuelles sont les PASTEURELLACEAE avec *Pasteurella multocida*, *Histophilus somni*, et *Mannheimia haemolytica* et les Mycoplasmes avec principalement *Mycoplasma bovis* (ou *Mycoplasma mycoides subsp. bovis* (34,35)) (26,36–40). Certaines autres bactéries sont parfois incluses dans les études, mais il est souvent difficile de distinguer entre bactéries infectieuses (citées précédemment), bactéries commensales (*Mycoplasma bovirhinis*, *Mycoplasma dispar*, *Streptococcus spp.*, *Moraxella spp.*) (39) et bactéries opportunistes infectant secondairement à une première infection bactérienne (*Trupurella pyogenes*, *Bibersteinia spp.*) (39)

En plus des virus et des bactéries, d'autres types d'agents pathogènes peuvent être à l'origine de troubles respiratoires profonds, comme les levures tel que *Aspergillus spp.*, ou les parasites, notamment *Dictyocaulus viviparus*, provoquant la dictyocolose. Dans les articles parlant de BRD, ces maladies sont souvent exclues, mais la notion de BRD peut changer d'un article à l'autre. Pour les levures, les infections concernent préférentiellement les voies respiratoires supérieures, mais des cas d'infections pulmonaires sont aussi décrits (41,42). Lors de BRD, il y a une modification du microbiome fongique des cavités nasales, avec notamment une augmentation de *Fusarium sporotrichioides* et une diminution de *Mortierella indohii* (43). Les infections par des champignons ont peu d'importance et d'influence sur l'épidémiologie et l'impact économique de la

BRD, et ne sera pas approfondie ici. Concernant la dictyocolose, elle a deux présentations cliniques : la forme sur-aiguë, allergique, et la forme aiguë, obstructive. Dans les deux formes, la maladie présente un contexte anamnestique et clinique reconnaissable. De plus une coproscopie permet d'identifier les parasites, et donc de poser un diagnostic étiologique sur la maladie et de mettre en place un traitement anti-parasitaire (44). Il est probable que la contamination d'un bovin par des parasites favorise l'infection virale et/ou bactérienne (45), mais la gestion spécifique de cette pathologie ne présente pas d'intérêt d'approfondissement dans la gestion de la BRD et ne sera pas abordée ci-après.

Les maladies respiratoires sont responsables de nombreuses morts chez les bovins. Aux États-Unis, la BRD représentaient 28% des morts (hors prédation) chez les bovins en 2011, et 26,4% en 2015 (10,46). La proportion des morts par les maladies respiratoires varie en fonction du stade de vie de l'animal. En France, une enquête menée en 2011 estimait une mortalité des veaux allaitants de 29,7%, des jeunes bovins allaitants de 28,8% et des bovins adultes allaitants de 2,9% (47). C'est aussi une maladie qui induit de fortes pertes pour l'industrie, avec des estimations de pertes de 643 millions de dollars aux États-Unis en 2010 (46).

B) Épidémiologie des maladies respiratoires contagieuses des jeunes bovins à l'engraissement

1/ Les voies de contamination et de transmission des agents pathogènes du BRD

Il faut distinguer deux échelles de transmission différentes : l'échelle intra-troupeau et l'échelle inter-troupeaux.

La première source de contamination inter-troupeaux est l'introduction d'animaux excréteurs, notamment dans le cas des JB, où les troupeaux sont constitués d'un mélange d'animaux provenant de troupeaux naisseurs différents. À l'échelle inter-troupeaux, il peut y avoir une contamination entre troupeaux rapprochés, par exemple par propagation d'agents pathogènes via des aérosols sur quelques mètres (48,49), et une contamination entre troupeaux éloignés de plusieurs kilomètres ou centaines de kilomètres, par exemple par propagation des agents pathogènes par contact indirect (ex : transmis par des bottes d'un élevage à un autre). La transmission inter-troupeaux par contact indirect concerne principalement les virus et, moins fréquemment, les Mycoplasmes (48,50). La notion de transmission pour les PASTEURELLACEAE est plus complexe puisque ces bactéries font partie du microbiote nasale (51).

Les modes de transmission intra-troupeau principaux sont via les aérosols et par contact direct, dit nasaux à nasaux (48–50,52–56). Dans le Tableau IV sont synthétisés, par agent pathogène, les modalités de transmission connues en fonction de leur importance et de l'échelle de transmission. La persistance de la contamination est favorisée par la persistance de l'infection (BHV (57,58), BVDV, mécanismes explicités en **Partie 1.III.A**), par la présence de cas sub-cliniques, et par de possibles réinfections (55).

Tableau IV : Modalités de transmission inter et intra-troupeaux des agents pathogènes de la BRD

Les modes de transmissions	Les agents pathogènes							
	Virus						Bactéries	
	VRSB	BPI-3	BCoV	BVDV	BHV	IDV	PASTEUR-ELLACEAE	Mycoplasmes
Transmission strictement intra-troupeau								
Transmission via le lait								
Transmission congénital								
Transmission intra-troupeau et inter-troupeaux sur de courtes distances								
Transmission par ingestion								
Transmission par des aérosols/inhalation	**	**	**			**	**	
Transmission par contact nasaux à nasaux				**	**			
Transmission par des vecteurs				Mouches			Mouches	
Transmission vénérienne								
Transmission inter-troupeaux sur de longues distances								
Contamination par des ruminants sauvages								
Contamination zoonotique								
Transmission par insémination artificielle								
Transmission par contact indirect			2 semaines					
Introduction d'animaux excréteurs								
Sources								
	(49,50, 53-55)	(55,59)	(56,60)	(49,61,62)	(49,57, 58,63)	(32,64)	(51,65-67)	(68,69)
Légende								
Mode de transmission de l'agent pathogène fréquent								
Principal mode de transmission							**	
Mode de transmission de l'agent pathogène peu fréquent								
Mode de transmission de l'agent pathogène non connu								
Mécanisme du mode de transmission existe, mais n'est pas rapporté								

2/ Les co-infections d'un individu par différents agents pathogènes

Lors de signes cliniques de BRD, quand on fait des prélèvements des cavités nasales, on trouve dans la majorité des cas plusieurs agents pathogènes (Tableau V). Padalino et al. ont trouvé que, quatre jours après arrivage de jeunes bovins français en Italie, 82,8 % des bovins présentaient deux pathogènes ou plus dans leurs cavités nasales par réaction de polymérase en chaîne (PCR) (70). Lachowicz-Wolak et al. ont trouvé 39,44 % de co-infections avec une bactérie et un virus dans les cavités nasales de veaux malades, 38,03 % de co-infections avec des bactéries différentes, 21,13 % avec une bactérie seule et 1,41 % avec un virus seul, et aucun avec des virus différents (36). Saegerman et al. ont calculé l'importance relative de chaque agent pathogène de la BRD, puis réalisé un ratio entre la fréquence d'infection en mono-infection et en co-infection par agent pathogène (Tableau VI), démontrant que le BVDV est toujours en co-infection lors de signes respiratoires. Dans les mono-infections, les agents pathogènes les plus fréquemment détectés étaient, par ordre décroissant, *P. multocida*, *M. haemolytica*, BCoV et *H. somni*. En cas de co-infections, l'agent pathogène le plus fréquemment détecté était *M. bovis*, suivi de l'IDV et du BpiV-3. L'IDV est retrouvé avec une fréquence plus élevée en co-infections qu'en infections seules, à l'instar d'autres virus tels que le BpiV-3 et le BRSV (71). L'infection initialement par un virus augmente la sensibilité d'un animal à l'infection par des bactéries, notamment le VRSB avec les PASTEURELLACEAE (72–74), BHV-1 avec *M. haemolytica* (75), ou l'IDV avec *M. bovis* (76).

Tableau V : Synthèse des articles sur les proportions du nombre d'agents pathogènes trouvés lors d'un épisode de la BRD

Articles	0 pathogène	1 pathogènes	2 pathogènes	3 pathogènes	4 pathogènes	5 pathogènes	6 pathogènes	7 pathogènes
Paller et al. (77)	17,00 %	32,00 %	35,00 %	14,00 %	2,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Padalino et al. (70)	2,40 %	14,80 %	29,00 %	24,80 %	20,70 %	7,70 %	0,60 %	0,00 %
Saegerman et al. (71)	23,00 %	51,00 %			26,00 %			0,00 %
Lachowicz-Wolak et al. (36)	0,00 %	22,54 %	31,00 %	23,96 %	14,09 %	7,05 %	0,00 %	1,41 %

Tableau VI : Contribution relative dans les co-infections des agents pathogènes lors de la BRD (71)

Agents pathogènes	Contribution relative		Ratio de la contribution relative de la BRD [B]/[A]
	Mono-infection [A]	Co-infection [B]	
<i>Pasteurella multocida</i>	88	362	4,11
<i>Mannheimia haemolytica</i>	45	220	4,89
BHV-1	7	38	5,43
<i>Histophilus somni</i>	26	185	7,12
BCoV	27	204	7,56
VRSB	13	110	8,46
BPI-3	3	44	14,67
IDV	3	44	14,67
<i>Mycoplasma bovis</i>	12	195	16,25
BVDV	0	12	-

3/ Les facteurs de risque de la BRD

La majorité des cas de la BRD lors de l'engraissement survient pendant les premières semaines d'engraissement (Tableau VII). Les facteurs de risque sont classifiés en deux catégories : les facteurs environnementaux et les facteurs liés à l'hôte. Parmi les facteurs environnementaux, on décrit les facteurs météorologiques, les facteurs liés au transport, aux conditions d'allotement et d'élevage. La distance (78), la densité (70) et le nombre d'arrêts (70) pendant le transport sont des paramètres qui influent sur l'incidence de la BRD en début d'engraissement. Les conditions météorologiques sont aussi des paramètres à prendre en compte : l'incidence de la BRD est plus élevée en hiver qu'en été, et lors d'un changement de température ou de climat pendant le transport (70,78). La mise en lot est une étape cruciale dans la gestion des risques de la BRD. En effet, réaliser un mélange de jeunes bovins provenant de plusieurs sources et/ou de sexes différents est une pratique à fort risque d'épidémie de la BRD, provoquant une incidence multipliée par deux par rapport à une mise en lot provenant d'une unique source (78). De manière général, tout événement stressant pour les bovins est un facteur de risque de BRD, comme par exemple la castration (79,80). Parmi les conditions d'élevage influençant l'incidence de la BRD, on peut noter l'ambiance avec l'humidité de l'air et la ventilation présente, les changements alimentaires, ainsi que la qualité de l'aliment (81).

Parmi les facteurs liés à l'hôte, on trouve le statut immunitaire des animaux, leur poids et leur âge à l'arrivée, et leur race. Il semble qu'il y ait certaines races plus résistantes que d'autres, notamment les races Angus et Charolaise, alors que les Limousines semblent plus sensibles à la BRD (80). Plus un jeune bovin est lourd et âgé à l'arrivée, les deux étant liés, moins il a de chance de développer des signes cliniques de BRD (78). L'immunité individuelle peut varier entre individus. Ainsi, des animaux vaccinés (cf. **Partie 1.V.A.2**) ou ayant déjà rencontré les agents pathogènes ont une incidence moindre et des signes cliniques moins forts (24). De même, toute maladie concomitante est un facteur de risque de BRD.

Tableau VII : Synthèse bibliographique de l'incidence et de la proportion de traitement réalisé en fonction du temps d'engraissement

Articles	Médiane des cas	<7j	<14j	<35j	<42j
Par rapport à l'incidence de la BRD					
Assié et al. (24)	6 ^{ème} jour	55 %	81 %		
Par rapport au nombre total de traitements pour la BRD					
Thompson et al. (31)	18 ^{ème} jour			87 %	
Faber et Hartwig (82)			40 %		81 %
Schneider et al. (13)	40 ^{ème} jour				
Cernicchiaro et al. (83)	30 ^{ème} jour				

II/ Impact économique des maladies respiratoires contagieuses des jeunes bovins à l'engraissement

A) Impact de la mortalité due aux maladies respiratoires

La mort d'un animal représente un coût important pour l'éleveur. En effet, un animal mort est un animal qui ne rapportera pas d'argent, ce qui représente un manque à gagner, associé à un coût de production (lié à l'engraissement avant la mort). De plus, des coûts exceptionnels de traitements et de vétérinaires sont à considérer lors d'épidémie de la BRD. Enfin, la gestion des cadavres est un travail en plus, qui a aussi un coût avec l'équarrissage.

Plusieurs estimations du coût par animal mort de BRD ont déjà été réalisées. En Australie en 2020 a été estimé les pertes nettes par animal mort de BRD à 943,49 €¹ sur des JB de différentes races (8). En 2011, l'United States Department of Agriculture (USDA) dénombre 1 055 000 morts de BRD pour une perte estimée de 472,09 €¹/mort (46). Il est difficile de bien comparer les coûts/mort de BRD, car de multiples facteurs sont à prendre en compte, tels que la perte des animaux non commercialisés, la diminution des frais d'élevage et d'alimentation ou le coût de l'équarrissage. En France, la perte des jeunes bovins non commercialisés représente 66 à 72% des pertes issues de la BRD selon l'incidence (84).

En France, la gestion des coûts de l'équarrissage est différente des autres pays. En effet, seulement 20% de l'équarrissage sont financés par les éleveurs, le reste est financé par les abattoirs. De plus, le paiement se fait principalement par cotisation annuelle, dépendant de l'Unité Bétail Équarrissage (UBE) (85), et donc du nombre d'animaux présents dans l'exploitation. Inosys réseaux d'élevage ont réalisé un cas type d'élevage engraisseur et culture de vente, qui représente les engraisseurs Charolais de Bretagne/Pays de la Loire, qui présente 240 JB charolais, soit un UGB (Unité gros bétail) de 109 (86). Ainsi, la cotisation annuelle pour l'équarrissage s'élève à 69,15 €¹ HT, soit 82,98 €¹ TTC (Annexe 3) par an pour un élevage type. Pour comparaison, l'équarrissage par animal mort a été estimé à 34,36 €¹ en Australie (8), ce qui revient à un prix équivalent à la France lors d'une mortalité de 2,4 animaux par an par exploitation.

B) Les répercussions économiques des maladies respiratoires des jeunes bovins à l'engraissement sur la production

Parmi les indicateurs utilisés pour décrire la production de viande au cours de la vie des jeunes bovins, le plus important est le gain moyen quotidien (GMQ) de poids pendant la phase d'engraissement. Pendant l'engraissement, il y a deux phases différentes du GMQ : une première phase avec un GMQ en augmentation jusqu'à un pic atteint pendant le premier mois, puis une diminution progressive du GMQ jusqu'à l'abattoir. En effet, en fin d'engraissement, les jeunes bovins produisent plutôt du gras, peu dense, alors qu'en début d'engraissement, ils produisent plutôt du muscle, dense (12). Le GMQ dépend de la race et de l'âge de l'animal. Une étude menée par ARVALIS en France en 2009 sur les trois races allaitantes et les trois races laitières les plus fréquentes, calcule expérimentalement les caractéristiques de performances par race des JB, dont le GMQ et la durée d'engraissement (DE), qui sont récapitulées dans le Tableau VIII (87).

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

Tableau VIII : Caractéristiques et performances moyennes par race (87)

Races	GMQ (g/j)	DE (j)
Charolais	1622	253
Limousine	1320	267
Blonde d'Aquitaine	1388	255

Plusieurs études ont regardé la diminution du GMQ en fonction des cas de BRD. Thompson et al. n'ont pas trouvé de différence significative sur le GMQ de l'arrivée en élevage jusqu'à l'abattoir entre des JB n'ayant pas eu de BRD et des JB ayant eu un ou plusieurs épisodes de BRD (P-value = 0,08). Cependant, ils mettent en évidence un GMQ inférieur à 35 jours (P-value < 0,001), indiquant une croissance normale après 35 jours d'engraissement (31). Ce phénomène est à mettre en lumière avec le fait que la grande majorité des cas de BRD ont lieu en début d'engraissement (cf **Partie 1.I.B.3**). Joly trouve une différence significative du GMQ de l'arrivée en élevage jusqu'à l'abattoir entre des JB ayant eu un épisode de BRD et des JB sains (P-value < 0,0001). Une tendance de diminution du GMQ en fonction de l'intensité des signes cliniques est observée, mais non significative (12). Blakebrough-Hall et al. trouvent une différence du GMQ entre l'arrivée et l'abattoir entre des JB sains, des JB sub-cliniques et des JB cliniques (P-value < 0,005). Ainsi, ils montrent que des JB sub-cliniques présentent une diminution du GMQ de 0,2 kg/j et des JB cliniques présentent une diminution du GMQ de 0,4 kg/j (8).

Cependant, d'autres critères sont à prendre en compte, comme le poids vif, le poids de carcasse à l'abattage, ou encore la durée d'engraissement. En France, la DE est aux alentours de 310 jours (12,88). Lorsqu'une maladie atteint les performances de croissance des JB, trois évolutions différentes du poids vif à l'abattage et de la DE sont observables :

- L'éleveur choisit de faire partir tous les animaux à la même date. Dans ce cas, la DE est similaire mais le poids de carcasse est diminué (8,89).
- L'éleveur choisit de faire partir tous les animaux au même poids. Dans ce cas la DE est augmentée. Joly a obtenu une DE augmentée entre 44 et 59 jours pour les animaux cliniques de BRD et de 33 jours pour les animaux subcliniques avec un poids vif similaire (12).
- L'éleveur choisit une solution intermédiaire où la DE est légèrement augmentée et le poids légèrement diminué (90).

C) Les pénalités à l'abattoir lors de BRD du vivant de l'animal

La rémunération en abattoir dépend de plusieurs facteurs. Les carcasses de bovins sont évaluées sur leur conformation (Tableau IX) et leur état d'embonpoint (91). De plus, des saisies peuvent être réalisées pour des raisons sanitaires, avec des pénalités sur le prix d'achat par l'abattoir. Ainsi, le prix d'achat d'un animal est égal à son poids * sa conformation – les pénalités.

Tableau IX : Catégorisation selon la conformation de la carcasse des bovins à l'abattoir (91)

Catégorie	E	U	R	O	P
Appellation	Supérieure	Très bonne	Bonne	Assez bonne	Passable
Description	Tous les profils sont convexes et caractérisent une musculature compacte et massive dans toutes les parties.	Les profils sont convexes dans l'ensemble. Certains sauf ceux du cuisseau peuvent être rectilignes. Musculature compacte et massive	Tous les profils sont au moins rectilignes, musculature épaisse	Les profils dans l'ensemble sont rectilignes parfois subconcaves. Musculature d'épaisseur moyenne.	Les profils sont concaves. Epaisseur musculaire réduite

En France, les abattoirs imposent un poids minimaux pour envoyer les JB à l'abattoir, obligeant les éleveurs à allonger la durée d'engraissement pour avoir un poids d'abattage et de carcasse équivalent lors de perte de croissance (84). Ainsi, les différences d'achats des bovins par l'abattoir concernant les maladies respiratoires dépendent principalement des différences de notes de conformation, et des saisies en plus.

En 2009, la dépréciation de la conformation des carcasses représentait 2,1 % des pertes (98,80 €¹) et 1,5 % des pertes (165,77 €¹) lors de BRD d'incidence modérée et sévère, respectivement (84). Cependant, la différence entre une carcasse de conformation U et une carcasse de conformation R a doublé depuis cette période (Tableau X). Dans l'étude de Joly, par différents calculs explicités en Annexe 4, un animal sub-clinique perd en moyenne 6,01€¹ du fait de la dépréciation de la conformation de carcasse, un animal avec une clinique d'intensité faible perd en moyenne 12,02 €¹, un animal avec une clinique modérée perd en moyenne 23,85 €¹, et un animal avec une clinique sévère perd en moyenne 48,20 €¹ (12). Peu d'études françaises ont étudié la dépréciation des carcasses à l'abattoir. Des études étrangères, notamment aux États-Unis, montrent aussi une diminution de la conformation des carcasses chez les animaux cliniques en fonction du nombre de traitements (13). Cependant, la notation de la conformation des carcasses entre la France (EUROP), les États-Unis (Marbling score) et l'Australie (MSA marbling score) étant différente, il n'est pas possible de réellement comparer les valeurs entre elles. Un Marbling score (noté entre 2 et 10, l'objectif étant 2) de 5,38 a été calculé lors de BRD non traité et de 5,25 lors de BRD traité (13), et une MSA marbling score (noté entre 100 et 1 190, l'objectif étant 1 190) de 351,6 en moyenne, de 326,2 pour les cas sub-cliniques et de 299,4 pour les cas cliniques (8). De plus, ils ont montré une dégradation de la MSA marbling score en fonction du nombre de traitements (-16,3, -43,7, -47,3 pour les animaux ayant reçu 1, 2 et ≥ 3 traitements comparés respectivement avec les animaux n'ayant pas reçu de traitement).

1 Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

Tableau X : Prix moyens annuels des gros bovins (en €/kg de carcasse) (92)

	Conformation	2013	2022	2023	2023/2022	2023/2013
Jeune Bovin	U	4,05 €	5,19 €	5,41 €	+4 %	+33 %
	R	3,89 €	5,06 €	5,27 €	+4 %	+35 %
	O	3,54 €	4,71 €	4,93 €	+5 %	+39 %

Dans le cadre des maladies respiratoires, les poumons et la trachée sont les seuls organes qui sont saisis. Les poumons et la trachée peuvent être considérés comme des abats, mineurs, qui ne subissent pas de pénalisation lors de saisie. Cependant, contrairement à la plupart des abats, les poumons et la trachée ne sont pas consommés et donc considérés comme impropres à la consommation humaine. Leur valorisation ne passe alors que par la production d'alimentation des animaux de compagnie (pet food) et de protéines animales transformées. On estime en France, en 2013, que les poumons rentrent dans 1 % de la valorisation des abats, et que la valorisation par le secteur des pet food pour un poumon est de 0,69 €¹ (93). Les bronchopneumonies sont à l'origine de 0,69 % de saisies parmi les bovins abattus (94). En France, en 2023, 3 008 610 gros bovins ont été abattus (95), soit une perte estimée à 14 387,30 € en 2023 pour les abattoirs. Cette somme est dérisoire par rapport à la production bovine.

D) Impact économique des traitements contre la BRD

Tous les traitements n'ont pas un coût quantifiable. En effet, les traitements incluent les traitements préventifs, notamment par modification du bâtiment des JB. Ces modifications sont trop disparates entre élevages pour être estimées et répétées. Cette partie va donc s'intéresser aux traitements qui sont quantifiables et peu variables entre élevages.

Une autre problématique est de savoir comment comptabiliser le coût des traitements. Parmi les facteurs que l'on peut prendre en compte pour le calcul du coût des traitements, il y a le coût des médicaments (curatifs ou préventifs), le coût de la visite vétérinaire, le coût de la vaccination et le coût du travail effectué par l'éleveur lors des traitements. Ensuite, il faut choisir le dénominateur qui peut être le nombre de têtes dans le troupeau, le nombre d'animaux malades, le nombre d'animaux morts, par acte thérapeutique, par unité temporelle (ex : par an), ou être un pourcentage d'une autre variable comme le coût de production. Dans la littérature, on trouve une combinaison entre les facteurs pris en compte et le dénominateur choisi, rendant la comparaison entre les différents articles complexe.

1/ Les impacts économiques de la vaccination contre la BRD

a) Le coût de la vaccination contre la BRD

La vaccination est une pratique courante pour protéger contre la BRD. Elle est principalement réalisée sur les mères puis les veaux à la naissance, et sur les jeunes bovins à l'arrivée dans l'élevage engraisseur (cf. **Partie 1.V.A.2**).

Le coût des vaccins par tête est estimé entre 1,88 et 3,55 €¹ (Tableau XI) chez les JB à

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

l'arrivée à l'engraissement, sans la prise en compte du coût de la visite vétérinaire pour cet acte. On peut supposer que le coût de la visite vétérinaire est faible par rapport au coût du vaccin car ce coût est distribué entre tous les animaux. Le coût des vaccins par dose est estimé à 2,65 €¹ dans les élevages laitiers et à 0,88 €¹ dans les élevages naisseurs. Or, selon les vaccins utilisés, il est nécessaire de réaliser 1 à 2 injections par animal, voire d'injecter plusieurs vaccins différents afin d'augmenter le nombre de valences (Annexes 1A & 1B).

Tableau XI : Synthèse bibliographique des coûts des vaccins pour la BRD

Coût des vaccins par tête			
Références	Animal étudié	Valeur article déflatée en € 2015 ¹	Vétérinaire
Blakebrough-Hall et al. (8)	JB	3,25 €	
Griffin et al. (11)	JB	3,56 % du coût de production	
Vergojeanne (96)	JB	2,99 €	
Wildman et al. (97)	JB	1,88 € et 3,55€	
Wang et al. (98)	Génisses	3,57 €	
Coût des vaccins par dose			
Dubrovsky et al. (99)	Veaux laitier	2,65 €	
Macartney et al. (100)	Veaux	0,88 €	
Arnoux et al. (21)	Bovins	4,10-5,49 €	
Notion prise en compte			
Notion non prise en compte			
Pas de détail sur la notion			

b) Diminution de l'impact économique de la BRD sur les animaux vaccinés

Peu d'articles ont comparé les revenus réalisés chez des lots de JB vaccinés et non vaccinés. Les diminutions de la perte du GMQ, de morbidité et de mortalité observées lors de la vaccination (cf **Partie 1.V.A.2**) sont des bénéfices réalisés, mais qu'il faut mettre en comparaison avec le coût de la vaccination. Des articles laissent penser que la vaccination contre la BRD semble être bénéfique chez les JB.

Le titre en anticorps à l'arrivée des JB, et ont montré un lien significatif entre la diminution de la valeur d'un animal et un titrage faible en anticorps dirigés contre *P. multocida* (P-value : 0,0157), le BVD-1 (P-value : 0,0003), le BVD-2 (P-value : 0,0474) et le BPI-3 (P-value : 0,0001) (101).

Certaines études s'intéressent à la différence de résultats économiques entre plusieurs protocoles vaccinaux notamment entre deux protocoles avec deux injections réalisés à l'arrivée en engraissement avec soit des vaccins (MLV3-BT2) avec deux souches d'IBR, la BVD, des toxines de *M. haemolytica* et de *P. multocida*, soit (MLV4-BT1) avec une souche d'IBR, la BVD, le VRSB, le BPI-3 et des toxines de *M. haemolytica*. L'analyse économique montre un bénéfice de 17,06 €¹ par cas de BRD pour le protocole MLV4-BT1, en prenant en compte le coût des vaccins, les différences de ventes à l'abattoir par différence du GMQ et de conformation (97).

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

2/ Les impacts économiques des traitements curatifs des animaux atteints de la BRD

a) Le coût des traitements curatifs des animaux atteints de la BRD

Le coût des traitements est évalué principalement de trois manières différentes : le coût d'un traitement unique, le coût des traitements par tête, et le coût des traitements par animal malade (Tableau XII). Parmi le coût des traitements, peuvent être pris ou non en compte le coût de la visite vétérinaire et le coût des vaccins.

Certains articles comptabilisent tous les traitements, incluant ceux des animaux ayant reçu plusieurs traitements, quand d'autres ne comptabilisent qu'un traitement maximum par animal. La distinction est importante à réaliser, car le coût d'un traitement lors de rechute peut être différent de celui du traitement initial. Macartney et al. ont calculé que, lors de rechute, le coût du second traitement était de 13,97 €¹, soit un peu moins de 2 fois le coût du premier traitement (100). A l'inverse, Blakebrough-Hall et al. ont calculé que le deuxième traitement coûte 6,73 €¹, soit presque 2 fois moins que le premier traitement (8). Plusieurs explications sont plausibles. Premièrement, lors de rechute, il est recommandé de changer d'antibiotique, et chaque antibiotique a son propre coût (Annexe 6). Deuxièmement, des traitements de soutien peuvent être rajoutés comme des anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS), comme explicité dans les troisièmes traitements de l'article de Blakebrough-Hall et al. (8).

Le coût des traitements curatifs a rarement été étudié en France. Fanuel a estimé un coût de 22,40 €¹ afin de réaliser une modélisation économique de la BRD en France. Cependant, cette valeur est une estimation subjective non évaluée sur une étude (28). Le coût d'un traitement est estimé entre 7,47 et 16,12 €¹ sans prise en compte du coût de la visite vétérinaire, ni de la vaccination (Tableau XII). Le coût d'un traitement par animal malade est estimé entre 11,44 et 23,92 €¹ (Tableau XII). Ces valeurs sont concordantes avec le coût d'un traitement unique, car, en moyenne, un animal malade est traité entre 1,44 et 1,7 fois (8,13,82,83), soit un encadrement de 6,73 à 16,61 €¹ de traitement par animal (11,44/1,7 et 23,92/1,44 respectivement). Le coût des traitements par tête dans l'élevage est estimé entre 3,41 et 4,37 €¹ chez les JB. Ces valeurs sont concordantes avec le coût des traitements par animal malade. En effet, la proportion d'animaux traités est estimée entre 14,31 et 20,56 % (8,14,83), ce qui équivaut à un encadrement de 16,59 à 30,54 €¹ de coût de traitement par animal malade (3,41/20,56 et 4,37/14,31 respectivement).

Le coût de la visite vétérinaire est difficile à évaluer car il se distribue entre tous les animaux malades lors de son passage, que ce soit dû à la BRD ou non. Faber et Hartwig (82) ont évalué que le coût de la visite vétérinaire représente 19 % du coût du traitement, soit 3,01 €¹ pour son étude. Lors d'un sondage auprès des éleveurs, Wang et al. (98) ont estimé le coût de la visite vétérinaire à 1,00 €¹ par veau laitier. Cependant, la morbidité de la BRD étant plus élevée chez les veaux, cette valeur est sous-estimée pour le coût de la visite vétérinaire par JB car le coût est amorti sur moins d'animaux en moyenne.

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

Tableau XII : Synthèse bibliographique des coûts des traitements curatifs pour la BRD

Coût d'un traitement						
Références	Stade étudié	Valeur déflatée en € 2015 ¹	Rechute	Vétérinaire	Vaccin	Sans vétérinaire ni vaccin
Faber et Hartwig (82)	JB	15,84 €		3,01 €		12,83 €
Dubrovsky et al. (99)	Veaux	10,80 €				10,80 €
Macartney et al. (100)	JB	7,47 €	13,97 € ¹			7,47 €
USDA 1999 (102)	JB	16,12 €				16,12 €
USDA 1999 (102)	JB	18,12 €				
USDA 2013 (103)	JB	18,39 €				
Cernicchiaro et al. (83)	JB	10,78 €				10,78 €
Coût des traitements par tête						
Blakebrough-Hall et al. (8)	JB	7,62 €			3,25 €	4,37 €
Griffin et al. (11)	JB	1,99 % coût de production				
Faber et Hartwig (82)	JB	5,50 €				
Corbin et al. (104)	JB	11,99 €				
		7,45 € ²				
		5,42 € ²				
Horton et al. (14)	JB	4,50 €		1,09 €		3,41 €
	JB	20,03 € ²		(fixe)		18,94 €
Coût des traitements par animal malade						
Faber et Hartwig (82)	JB	26,93 €		3,01 €		23,92 €
Fanuel (28)	JB	22,40 €				
Richeson et al. (105)	JB	13,97 €				13,97 €
Wang et al. (98)	Veaux	10,36 €				10,36 €
Blakebrough-Hall et al. (8)	JB	20,44 €			3,25 €	17,19 €
		14,69 € ³				11,44 €
		21,42 € ⁴				18,17 €
		49,36 € ⁵				46,11 €
Notion prise en compte			1 : Prix d'un traitement lors de rechute ;			
Notion non prise en compte			2 : Coût avec métaphylaxie à l'arrivée ;			
Pas de détail sur la notion			3 : Coût des traitements pour les animaux traités 1 fois ;			
			4 : Coût des traitements pour les animaux traités 2 fois ;			
			5 : Coût des traitements pour les animaux traités ≥ 3 fois			

1 Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

b) Diminution de l'impact économique de la BRD sur les animaux lors de traitements

Plusieurs études se sont intéressées au rendement net par JB selon le nombre de traitements reçu par l'animal (Tableau XIII). Dans ces études, la réalisation d'un nouveau traitement correspond à l'échec thérapeutique d'un précédent traitement. Pour évaluer l'intérêt économique de la mise en place d'un traitement, il faudrait comparer deux lots d'animaux malades, et n'administrer un traitement qu'à un seul lot. Pour des raisons éthiques, cela n'est pas réalisable. On remarque que plus le JB reçoit de traitements, moins le rendement est élevé, et que lors de 2 traitements réalisés, le rendement est proche de 0 € (8,82,83). On peut supposer que, si on ne traite pas les animaux malades, on aurait un rendement proche de celui des animaux traités trois fois et plus. Ainsi, la mise en place et la réussite des traitements permet de fortement réduire l'impact économique de la BRD chez les JB. L'augmentation du nombre de traitements reçu par un animal est corrélée à la dégradation de la conformation de la carcasse et à une réduction du GMQ, impliquant une diminution du prix de vente par animal avec l'augmentation du nombre de traitements. La dégradation du prix de vente par animal est similaire entre les articles pour les animaux ayant reçu 1 traitement (entre -16,08 et -25,58 €/animal), mais des différences sont notables pour les animaux ayant reçu 2 traitements et pour les animaux ayant reçu 3 traitements ou plus (8,13,82).

Tableau XIII: Synthèse bibliographique de l'impact économique des JB cliniques en fonction du nombre de traitements reçu

Références	Non traités	Traités 1 fois	Traités 2 fois	Traités >3 fois
Rendement net par animal				
Blakebrough-Hall et al. (8)	104,72 €	67,62 €	-3,63 €	-130,39 €
Cernicchiaro et al. (83)	23,44 €	12,34 €	1,64 €	-37,24 €
Faber et Hartwig (82)	78,02 €	39,65 €	12,79 €	-138,14 €
Prix de vente par animal				
Schneider et al. (13)	Ref	-18,46 €	-23,95 €	-42,91 €
Blakebrough-Hall et al. (8)	1187,13 € Ref	1171,05 € -16,08 €	1105,04 € -82,09 €	1007,80 € -179,33 €
Faber et Hartwig (82)	1074,42 € Ref	1048,84 € -25,58 €	1039,88 € -34,54 €	831,40 € -243,02 €
Légende		Ref : Valeur de référence		
Tous les coûts sont déflatés ¹				

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

3/ Les impacts économiques d'un traitement métaphylactique

a) Le coût d'un traitement métaphylactique

Un traitement métaphylactique consiste à traiter tous les animaux présents lors d'un épisode de BRD dans le lot ou l'élevage (cf **Partie 1.V.B.2**). Il existe deux utilisations différentes de la métaphylaxie chez les JB : soit à l'arrivée, si les animaux sont jugés à risque, soit lorsque l'incidence de la BRD dépasse un seuil, souvent de 10 %/jours et de 15 % sur 3 à 5 jours (28,106).

Le coût d'un traitement métaphylactique de lots de jeunes bovins est estimé entre 6,30 et 18,31€¹ par animal (Tableau XIV). La principale raison de ce différentiel de coût vient du coût de l'antibiotique utilisé. Maples et al. ont calculé pour 5 antibiotiques différents que le coût de traitement d'un animal de 272 kg varie de 9,69 à 17,81 €¹ en fonction de l'antibiotique utilisé (Annexe 6) (107). Les autres causes de variation du coût d'un traitement métaphylactique, plus mineures, sont la variation du poids des animaux lors de la réalisation du traitement et une variation du dosage des antibiotiques (104).

Tableau XIV : Synthèse bibliographique des coûts des traitements métaphylactiques pour la BRD

Coût de la métaphylaxie par tête			
Références	Animal étudié	Valeur article déflatée en € 2015 ¹	Véto
Dennis et al. (108)	JB	18,31 € (moyenne nationale)	
Horton et al. (14)	JB	18,20 € (tulathromycine 2,4 mg/kg)	
Maples et al. (107)	JB	15,05 € (moyenne) 9,69-17,81 €	
Booker et al. (109)	JB	11,20 € (ceftiofur 6,6 mg/kg) 8,17 € (tilmicosine 10 mg/kg)	
Corbin et al. (104)	JB	12,50 € (tilmicosine 20 mg/kg) 6,30 € (tilmicosine 10 mg/kg)	
Van Donkersgoed et al. (110)	JB	8,57 € (tilmicosine 10 mg/kg) 16,14 € (tulathromycine 2,5 mg/kg)	
		Notion prise en compte	
		Notion non prise en compte	
		Pas de détail sur la notion	

b) Diminution de l'impact économique de la BRD sur les animaux lors de traitements métaphylactiques

Horton et al. ont comparé les revenus entre deux lots ayant reçu ou non un traitement métaphylactique à l'arrivée, et ne trouvent pas de différence significative entre les deux lots (p-value=0,81). Dans cette étude, la diminution de la perte du GMQ, de la morbidité et de la mortalité ne compensent pas le coût du traitement métaphylactique. En effet, la morbidité lors de cette étude est faible (11,1 à 37,1 % pour les JB n'ayant pas reçu de traitements métaphylactiques), mettant en évidence que le bénéfice de la métaphylaxie est faible lors de faible morbidité (14). Nickell et White ont estimé par modélisation, avec une réduction de morbidité de 50 % par le traitement

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

métaphylactique, que pour qu'une métaphylaxie de 8,23 €/animal ou de 14,81 €/animal ne soit pas déficitaire (revenus net = 0 €), il faut une morbidité attendue sans métaphylaxie de 25 % et 40 %, respectivement (111). Corbin et al. ont calculé les revenus nets par animal entre un lot ne recevant pas de métaphylaxie, un lot recevant du tilmicosine à 10mg/kg et un lot recevant du tilmicosine à 20 mg/kg à l'arrivée, et trouve une perte de 32,90 €¹ et un gain de 35,90 €¹ et 67,22 €¹, respectivement. Cette différence de revenus s'explique par une morbidité intermédiaire (34 % dans le lot sans métaphylaxie) et une mortalité importante (13,5 % dans le lot sans métaphylaxie) (104). Il existe donc un seuil où le traitement métaphylactique n'est pas un traitement rentable du point de vue de l'élevage selon notamment les performances, le coût du traitement, la morbidité et la mortalité. Il faut cependant moduler le résultat précédent, puisque les traitements métaphylactiques ont des effets sur les performances différentes en fonction du protocole utilisé (cf **Partie 1.V.B.2**).

Lors de la comparaison entre des traitements métaphylactiques à base de ceftiofur ou de tilmicosin, Booker et al. montrent un gain de 19,07 €¹/animal avec le protocole à base de ceftiofur à l'arrivée comparé au protocole à base de tilmicosin à l'arrivée. La différence de gain entre les deux protocoles provient en grande partie de la diminution de la mortalité avec le ceftiofur (20,24 €¹/animal). Une augmentation du GMQ est également observée (0,99 €¹/animal), ainsi qu'une amélioration de la qualité de la carcasse (0,88 €¹/animal). Seul le coût du traitement est en faveur du protocole à base de tilmicosine (3,03 €¹/animal) (109).

Valencia et al. ont aussi réalisé une étude comparative entre un traitement métaphylactique à l'arrivée à base soit de gamithromycine, soit de ceftiofur, et ont montré, lorsque l'on retire les animaux morts (de morts différentes de la BRD), une différence significative (p-value=0,01) des revenus nets entre les deux protocoles, avec un revenu de 17,80 €¹/animal avec un protocole à base de gamithromycine et un revenu net de -5,31 €¹/animal pour le protocole à base de ceftiofur. Une des causes rapportées dans l'étude est une différence du GMQ entre 0 et 59 jours (p-value=0,03) (112).

4/ Impact des traitements contre la BRD sur l'antibiorésistance des bactéries respiratoires

La surveillance de l'antibiorésistance est d'une importance majeure pour le futur de la médecine vétérinaire. En effet, il y a une augmentation des résistances bactériennes face aux traitements antibiotiques actuellement disponibles, alors que peu de nouveaux produits sont disponibles. Actuellement, de nouvelles recherches sont en cours pour avoir de nouveaux traitements à base d'anticorps monoclonaux. Cependant, ces traitements sont spécifiques de l'espèce bactérienne, et en cours de recherche seulement chez l'espèce humaine. (113,114). Dans un futur plus ou moins proche, nous n'avons donc pas d'autre alternative en traitement curatif que les antibiotiques pour faire face aux bactéries. Les affections respiratoires font parties des affections induisant le plus de consommation d'antibiotiques (115). Une augmentation des résistances des bactéries respiratoires aura donc pour conséquence une augmentation des échecs thérapeutiques, et donc une augmentation des pertes dues à la BRD.

En France, l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a mis en place un réseau de surveillance de l'antibiorésistance des bactéries pathogènes animales (RESAPATH) (116). Ce réseau collecte les résultats d'antibiogrammes issus d'un large éventail de laboratoire français, et réalise un rapport annuel sur l'état de l'antibiorésistance et son évolution depuis 1982. En 2022, le rapport du RESAPATH indique que

1 Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

chez les jeunes bovins, les maladies respiratoires comptent pour 11 % des antibiogrammes réalisés, derrière les affections digestives (81%), et que les principales bactéries trouvées toutes maladies confondues sont *Escherichia coli* (84%), *Pasteurella spp.* (5%), *Mannheimia spp.* (3%), *Salmonella spp.* (2%) (117). Concernant les résistances, *Pasteurella multocida* présente un fort taux de résistance face à la streptomycine (73%), des taux modérés face aux cyclines (47-49%), aux acides nalidixique (35%) et oxolinique (33%) et à la fluméquine (30%) (Figure 3). *Mannheimia haemolytica* présente un fort taux de résistance à la Streptomycine (84%) et un taux modéré à la doxycycline (29%) (Figure 4). Globalement, *M. haemolytica* présente moins de résistance que *P. multocida*. Peu d'antibiogrammes mettent en évidence *Histophilus somni* et *Mycoplasma bovis*, le RESAPATH ne présente donc pas de résultat sur ces bactéries. Le faible nombre d'antibiogramme de ces deux bactéries malgré leur prévalence peut s'expliquer par leur faible implication dans les cas sévères de BRD (cf **Partie 1.V.C**).

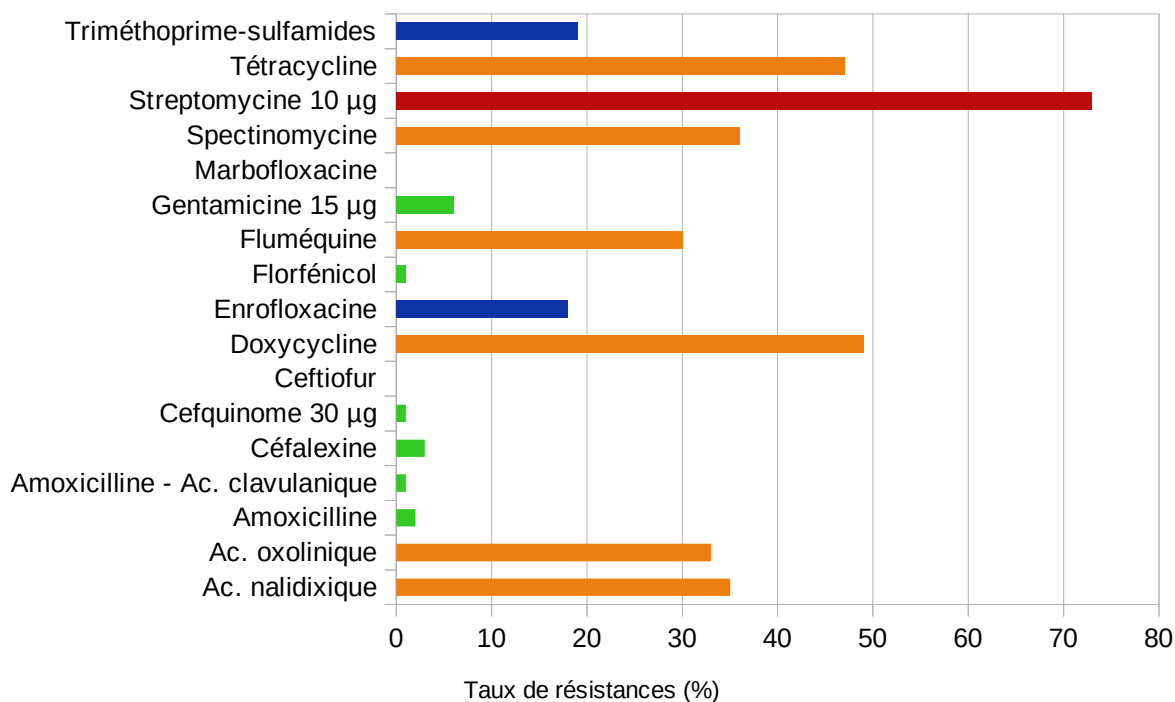


Figure 3 : Diagramme des résistances aux antibiotiques de *Pasteurella multocida* chez les jeunes bovins en 2022 (118)

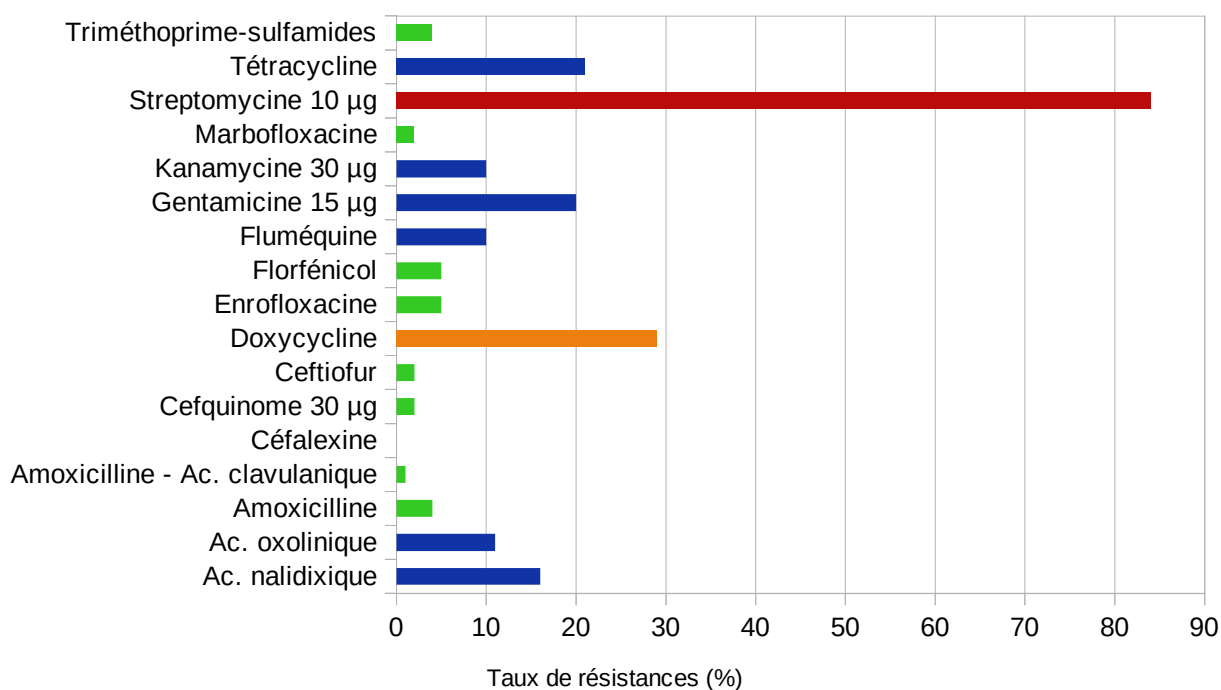


Figure 4 : Diagramme des résistances aux antibiotiques de *Mannheimia haemolytica* chez les jeunes bovins en 2022 (118)

E) Temps consacré par les éleveurs aux animaux pour lutter contre la BRD

La prévention, le traitement et le diagnostic des animaux atteints de BRD représentent un coût en temps important. Lors de recommandations, la prise en compte de l'adhésion de l'éleveur est primordiale. Connaître le temps nécessaire à la réalisation des recommandations permet une discussion plus constructive avec l'éleveur et ainsi d'avoir une meilleure observance des recommandations.

Un sondage a été réalisé auprès d'éleveurs afin d'estimer le temps consacré aux animaux en élevage laitier lors de BRD. Les éleveurs ont estimé que pour vacciner, il leur fallait 7 min/animal en moyenne pour les élevages de moins de 200 animaux, qu'importe leur stade (veau/génisse/adulte). Cette valeur comprend le temps pour trier et rassembler les animaux ainsi que le temps pour injecter le vaccin. 60 % du temps de vaccination est destiné à trier et rassembler les animaux (98). En France, les bâtiments d'élevages comprennent de plus en plus des couloirs ou des cages de contentions, qui ont tendance à réduire le temps pour réaliser la vaccination. On peut supposer qu'en moyenne le temps consacré à la vaccination pour les JB est similaire, voir inférieur, car ce sont des animaux du même âge que les génisses, avec un comportement similaire et qu'ils vivent en bâtiment.

Dans ce même sondage, le temps passé à administrer des traitements aux animaux malades de BRD a aussi été estimé par les éleveurs avec en moyenne 40 min/animal malade pour des veaux, pour rassembler les animaux, les trier, et administrer les traitements. La taille de l'élevage n'a pas d'influence significative sur le temps passé à administrer les traitements (98). On peut supposer qu'en moyenne le temps passé à traiter des JB est moins élevé car les élevages français de JB présentent beaucoup moins d'animaux que les élevages de veaux aux États-Unis. Ainsi, le temps de préparation des traitements, de tri et de regroupement des animaux est plus faible, soit 75 % du

temps estimé.

Aucune étude ne permet d'estimer le temps consacré par un éleveur pour réaliser un traitement métaphylactique sur un lot de JB. Comme pour la réalisation d'une vaccination, la réalisation d'un traitement métaphylactique se divise en quatre tâches différentes : le rassemblement des animaux, le tri des animaux, la préparation des traitements et la réalisation des injections.

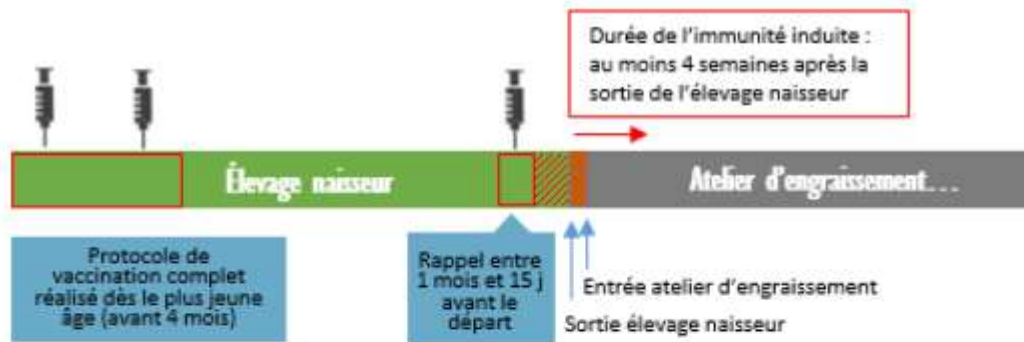
Afin de prendre en compte le temps de travail dans une analyse économique, on évalue le coût du travail (ou labor/labour cost en anglais). Ce coût du travail est évalué sur la base du coût d'un salarié dans un élevage, et varie donc en fonction de l'année de sortie de l'article et du pays où est réalisée l'étude (99,119). La majorité des articles ne prennent pas en compte le coût du travail, et ceux qui le prennent en compte calculent subjectivement le temps nécessaire pour les actes (8,99,100,110,120). Entre les différents articles, les coûts du travail n'est pas calculé pour les mêmes actes : certains prennent en compte le temps pour traiter, pour la gestion des cadavres, pour la gestion de l'arrivage des animaux. Enfin, le coût du travail est parfois compris dans le coût de production (processing cost en anglais), et n'est pas détaillé. Il n'y a donc pas de valeur de coût du travail lors d'un cas de BRD qui est rapporté dans la littérature.

F) Valorisation des animaux en fonction de leur immunité à l'achat

Il y a peu de connaissance du statut immunitaire des animaux par l'engraisser, malgré une vaccination importante des animaux par les naisseurs (5). Les projets broutards max et B2E (Broutard d'Excellence ELVEA) sont des projets mis en place par Ter'élevage en 2010 et ELVEA en 2016. Le concept est de vacciner les broutards dès l'élevage naisseur contre la BRD et de transmettre l'information aux engraisseurs. Ainsi, une valorisation de la vente des broutards est réalisée pour les naisseurs, et les engraisseurs, quand bien même ils achètent plus chers les animaux, réalisent du profit en diminuant la morbidité et la mortalité de la BRD en engraissement. En effet, une étude interne de Ter'élevage montre une diminution de la morbidité (12,7 % pour les témoins contre 5 % pour les broutards max) et du nombre de traitements (18 % des animaux traités contre 5,4 % respectivement) (121). Aujourd'hui Ter'élevage rapporte commercialiser 5 000 broutards max/an (122), et verser 21,34 €/broutard max, soit 42 676,68 €/an aux naisseurs (122). Le journal Agri71.fr publie un article en Avril 2024 de l'interview d'un éleveur vendant des broutards B2E qui affirme que « Le coût de la vaccination et du déparasitage revient à une quinzaine d'euros par broutard » et que « la filière B2E prévoit une rétribution à l'éleveur de 45€ par broutard ». De plus, l'interview d'un technicien de ELVEA révèle que « les engraisseurs paient cette prestation 50 € par animal » (123).

En 2020, a été mis en place un cahier des charges des broutards dits « préparés » par interbev (interprofession bétail & viande) en continuité des projets broutards max et broutards B2E, afin d'y apporter des démarches sécurisées au niveau national. Ce cahier des charges s'applique aux « bovins mâles et femelles vendus vifs et destinés à l'engraisement » afin de réaliser une vaccination contre *M. haemolytica*, le VRSB et le BPI-3 qui couvre l'animal depuis la sortie de l'élevage naisseur et durant au moins 4 semaines (Figure 5). Enfin, ce cahier des charges met en place un indicateur « coût de préparation », qui prend en compte le coût de la vaccination, le temps de la vaccination, le temps consacré à la visite annuelle de contrôle interne et les coûts administratifs. Ce coût de préparation est de 25 € TTC au 1^{er} semestre 2021, permet d'avoir une rémunération minimale supplémentaire pour les broutards préparés (124).

1 Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)



Vaccination tardive :

Ce schéma de vaccination protège l'animal en vue de sa vente.

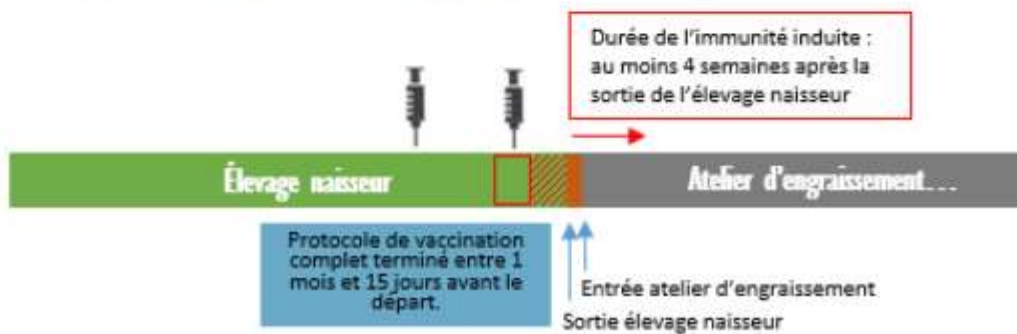


Figure 5 : Schémas vaccinaux acceptés par le cahier des charges de préparation sanitaire des brouards (124)

III) Les agents pathogènes des maladies respiratoires bovines

A) Les virus

1/ Étiologies des virus impliqués dans la BRD

Le virus respiratoire syncytial bovin (VRSB) appartient à la famille des PARAMYXOVIRIDAE, la sous-famille des *Pneumoviridae*, et du genre *Pneumovirus* (ou *Orthopneumovirus*) (54,125). C'est un virus simple brin à ARN négative, enveloppé avec un génome de 15,2 kb codant pour 11 protéines (Tableau XV) (54,55,126). Les virus respiratoires syncytiaux (RSV) sont catégorisés en quatre groupes (A, B, AB, et un groupe intermédiaire) en fonction des mutations présentes sur la protéine G principalement. C'est un virus qui a un haut taux de mutation (55). Il a été estimé que lors de ré-infestations fréquentes, la séquence génétique du VRSB peut varier jusqu'à 11% (54).

Tableau XV : Récapitulatif simplifié des protéines des VRS et de leurs principales fonctions

	Protéines	Abréviation	Fonction
1	Attachement	G	Glycoprotéine qui permet le contact prolongé de la membrane virale et de la membrane de la cellule hôte (127)
2	Fusion	F	Glycoprotéine qui permet la fusion de la membrane virale et de la membrane de la cellule hôte (127)
3	Small hydrophobic	SH	Glycoprotéine qui permet d'échapper au système immunitaire (128)
4	Nucleocapsid	N	Formation de la capsid virale et permet la transcription et la réplication de l'ARN viral (129)
5	Phosphoprotein	P	Facilite la liaison entre l'ARN et l'ARN-polymérase (130)
6	Large polymerase	L	Transcription de l'ARN (130)
7	Membrane protein	M1	Protéine de la membrane qui permet des interactions entre la membrane et l'enveloppe (131)
8	Transcriptional antitermination factor	M2-1	Élongation de l'ARN messenger (129)
9	RNA regulatory protein	M2-2	Régulation de la transcription et de la réplication (132)
10	Non structural protein 1	NS1	Modulation de l'immunité de l'hôte (126)
11	Non structural protein 2	NS2	

Le para-influenza bovin de type 3 (BPI-3) est phylogénétiquement proche du VRSB (55). Il appartient lui aussi à la famille des PARAMYXOVIRIDAE, la sous famille des *Pneumoviridae* et au genre des *Orthopneumovirus*, et présente donc une structure similaire au VRSB. Le BPI-3 est un virus enveloppé simple brin à ARN négative de 15,4-15,5 kb codant pour 9 protéines différentes (Tableau XVI). Selon la séquence de la protéine HN, on distingue trois génotypes (A, B et C) (55,59).

Tableau XVI : Récapitulatif simplifié des protéines du BPI-3 et de leurs principales fonctions

	Protéines	Abréviation	Fonction
1	Haemagglutinating neuraminidase	HN	Glycoprotéine qui permet le contact prolongé de la membrane virale et de la membrane de la cellule hôte, et favorise une hémagglutination
2	Fusion	F	Glycoprotéine qui permet la fusion de la membrane virale et de la membrane de la cellule hôte
3	Nucleocapsid	N	Formation de la capsid virale
4	Phosphoprotein	P	Facilite la liaison entre l'ARN et l'ARN-polymérase
5	Large polymerase	L	Transcription de l'ARN
6	Membrane protein	M	Protéine de la membrane qui permet des interactions entre la membrane et l'enveloppe
7	Non structural protein C	C	
8	Non structural protein D	D	Modulation de l'immunité de l'hôte (55,59,133,134)
9	Non structural protein V	V	

Le coronavirus bovin (BCoV) appartient à la famille des CORONAVIRIDAE, de la sous-famille des *Coronavirinae* et au genre des *Betacoronavirus*. C'est un virus simple brin à ARN positive, enveloppé avec un génome de 26,4-31,7 kb, codant pour 21 protéines différentes (Tableau XVII) (60,135). Le BCoV est un virus avec une évolution rapide, avec de forts taux de mutations et de recombinaisons. 51 % de la séquence génétique de BCoV présente des signes de potentielles recombinaisons, et le taux d'évolution a été estimé à 10^{-3} - 10^{-4} substitutions/site/an (135). Comme la plupart des coronavirus, le BCoV a un tropisme respiratoire et digestif (60).

Tableau XVII : Récapitulatif simplifié des protéines du BCoV et de leurs principales fonctions (60,135)

	Protéines	Abréviation	Fonction
1	Nucleocapsid	N	Formation de la capsid virale
2	Integral membrane	M	Formation de la membrane cellulaire
3	Envelop protein	E	Formation de l'enveloppe virale
4	Spike	S1 et S2	Permet la fixation à la cellule hôte (S1) puis la fusion des membranes (S2)
5	Haemagglutinin-esterase	HE	Enzyme permettant d'empêcher l'hémoagglutination
6	16 Non-structural proteins	nsp1-16	Modulation de l'immunité de l'hôte et mécanismes d'échappement de l'immunité

L'herpèsvirus bovin (BHV) appartient à la famille des HERPESVIRIDAE, à la sous-famille des *Alphaherpesvirinae*, au genre *Varicellovirus*, parmi lequel on trouve deux espèces de BHV : le bovine alphaherpesvirus 5 (BHV-5) et le bovine alphaherpesvirus 1 (BHV-1) (Figure 6) (58,136). BHV-5 provoque la méningo-encéphalite à herpèsvirus bovin, tandis que BHV-1 provoque la rhinotrachéite infectieuse bovine (IBR), maladie impliquée dans la BRD (57). BHV-1 est un virus enveloppé à ADN double brins de 135-145 kpb qui codent pour 70 protéines (57,58). Le BHV-1 présente trois sous-types différents, BHV-1.1, BHV1.2a et BHV1.2b, présentant peu de différences génomiques (57). In vivo, seul BHV-1.1 présente une répllication cellulaire dans les voies respiratoires, bien que in vitro, tous les sous-types en présentent une sur des cellules des voies respiratoires (57,58).

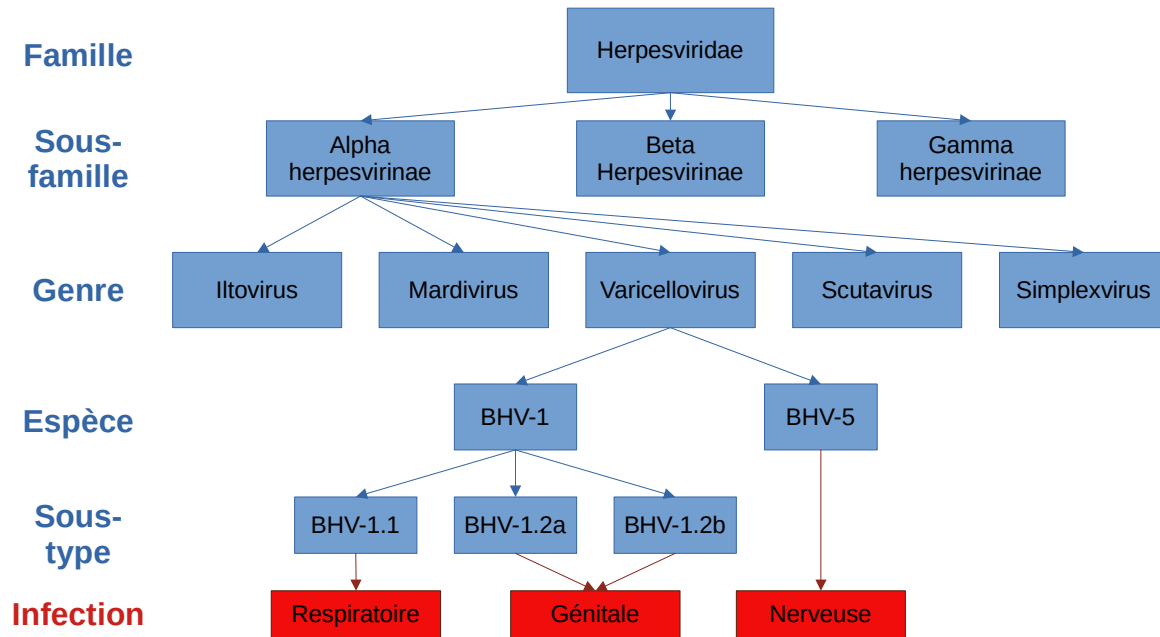


Figure 6 : Organigramme de la classification de BHV-1 et des systèmes infectés en fonction de l'espèce

Les virus de la diarrhée virale bovine (BVDV) appartiennent à la famille des FLAVIRIDAE, et au genre des *Pestivirus*. On distingue 2 espèces de BVDV, BVD-1 et BVD-2, qui ont été renommé respectivement en *Pestivirus A* et *Pestivirus B* en 2020, puis respectivement en *Pestivirus bovis* et *Pestivirus tauri* en 2022 (137). Les virus de la BVD sont divisés en fonction de leur pathogénicité, en cytopathogènes et en non-cytopathogènes. Les virus cytopathogènes sont à l'origine d'infecté transitoire tandis que les virus non cytopathogènes sont à l'origine d'infecté permanent (cf. **Partie 1.III.A.3.b**). Les virus de la BVD sont des virus enveloppés simple brin à ARN positif de 12,3 à 16,5 kb qui code pour 12 protéines (Tableau XVIII) (138).

Tableau XVIII : Récapitulatif simplifié des protéines des virus de la BVD et de leurs fonctions (138–140)

	Protéines	Abréviation	Fonction
1	Core protein	C	Formation de la capsid virale
2	Enveloppe glycoprotéine ribonuclease soluble	E ^{rns}	Formation de l'enveloppe virale et interaction avec les cellules hôtes
3	Enveloppe glycoprotéine 1	E1	Formation de l'enveloppe virale et interaction avec les cellules hôtes
4	Enveloppe glycoprotéine 2	E2	Formation de l'enveloppe virale et interaction avec les cellules hôtes
5	8 Non-structural proteins	N ^{pro} , NS2, NS3, NS4A, NS4B, NS5A, NS5B, P7	Permet la réplication, transcription et la translation. Modulation de l'immunité de l'hôte et mécanismes d'échappement de l'immunité

Le virus influenza de type D (IDV) a été isolé pour la première fois en Avril 2011 aux États-Unis chez des cochons puis chez des bovins, mais circulerait depuis 2003 dans des élevages bovins (32). L'IDV appartient à la famille des ORTHOMYXOVIRIDAE, qui se subdivise en quatre espèces différentes : l'influenza de type A, l'influenza de type B, l'influenza de type C, et l'influenza de type D. L'IDV est un virus enveloppé à ARN simple brin négative segmentée en 7 brins différents codant pour 9 protéines différentes (Tableau XIX) (33).

Tableau XIX : Récapitulatif simplifié des protéines de l'IDV et de leurs fonctions (33)

	Protéines	Abréviation	Fonction
1	Hemagglutinine-esterase fusion	HEF	Glycoprotéine qui permet le contact prolongé de la membrane virale et de la membrane de la cellule hôte, leur fusion, et favorise une hémagglutination
2	Polymerase basic protein 1	PB1	Forme une polymérase qui permet la transcription de l'ARN viral
3	Polymerase bbasic protein 2	PB2	
4	Polymerase protein 3	P3	
5	Nucleoprotein	NP	Formation de la capside virale
6	Matrix protein 1	M1	Protéine structurant de la membrane
7	Matrix protein 2	M2	Protéine de la membrane formant des canaux d'échange ionique
8	Non structural protein 1	NS1	Modulation de l'immunité de l'hôte
9	Non structural protein 2	NS2	

2/ Pathogénie générale des virus de la BRD

La pathogénie virale est en lien étroit avec le cycle viral. L'aboutissement du cycle viral est la réplication, c'est-à-dire la production de nouveaux virions à partir d'un virus (Figure 7). Pour cela, les virus ont besoin d'une cellule hôte. Selon les virus, la cellule hôte est différente, et dans le cas de la BRD il s'agit préférentiellement des cellules épithéliales de la muqueuse respiratoire.

L'adhésion avec la cellule hôte, première étape du cycle viral, est nécessaire pour permettre la fusion de la membrane cellulaire avec la membrane virale, afin d'intégrer dans la cellule le matériel génétique viral. L'adhésion est permise par l'interaction entre les protéines de membranes des cellules et les protéines d'adhésions des virus (cf. **Partie 1.III.A.1**) (141). Les protéines d'attachements des virus de la BRD sont souvent bien conservées (Figure 8) et les variations de cette protéine expliquent en partie la variation de la virulence d'un virus (135,142).

La fusion est aussi permise par l'interaction entre les protéines de membrane de la cellule hôte et des protéines du virus. Le virus est alors internalisé par la cellule puis acheminé jusqu'au noyau, où la transcription et la réplication vont être réalisées. La plupart des virus utilisent les ARN/ADN polymérase de la cellule hôte afin de réaliser leur réplication ou leur transcription. Les protéines non structurales jouent un rôle important dans ce stade du cycle viral, notamment en permettant un évitement de l'immunité de la cellule hôte et de l'organisme (33,55,126,133,138). Enfin, le matériel viral est transporté jusqu'à la membrane cellulaire, et de nouveaux virions sont produits. Dans le cadre des virus de la BRD, la production de virus entraîne la mort de la cellule

(53), à l'origine d'une partie des signes cliniques.

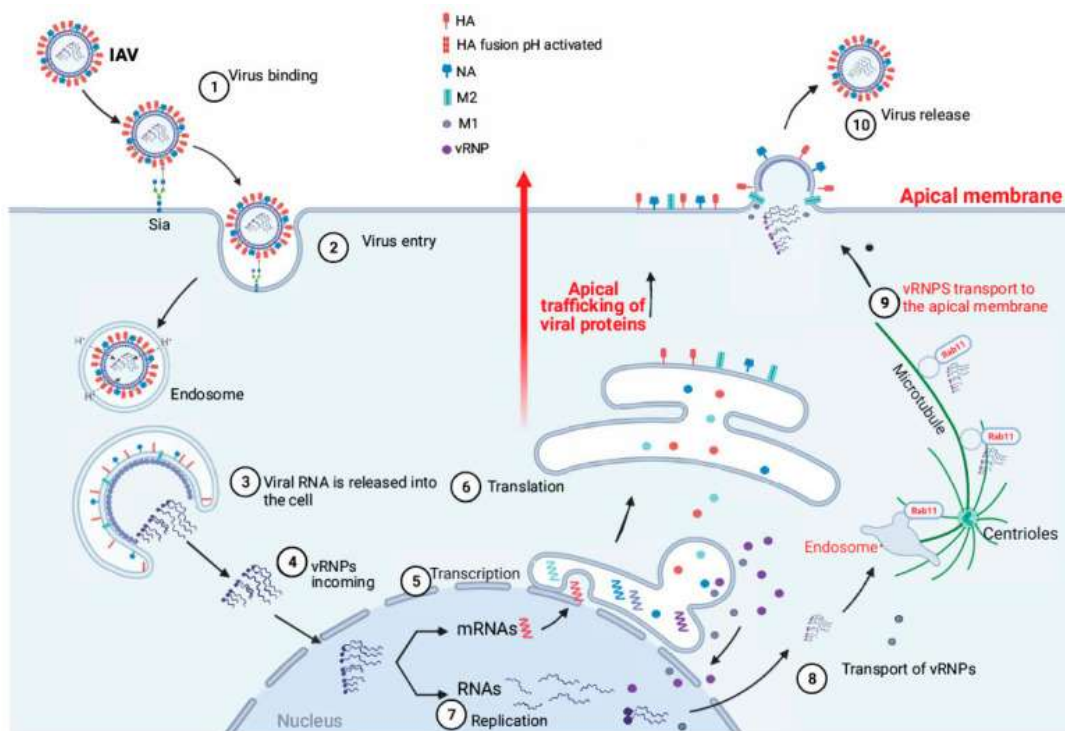


Figure 7 : Schéma simplifié du cycle viral des Influenzavirus (141)

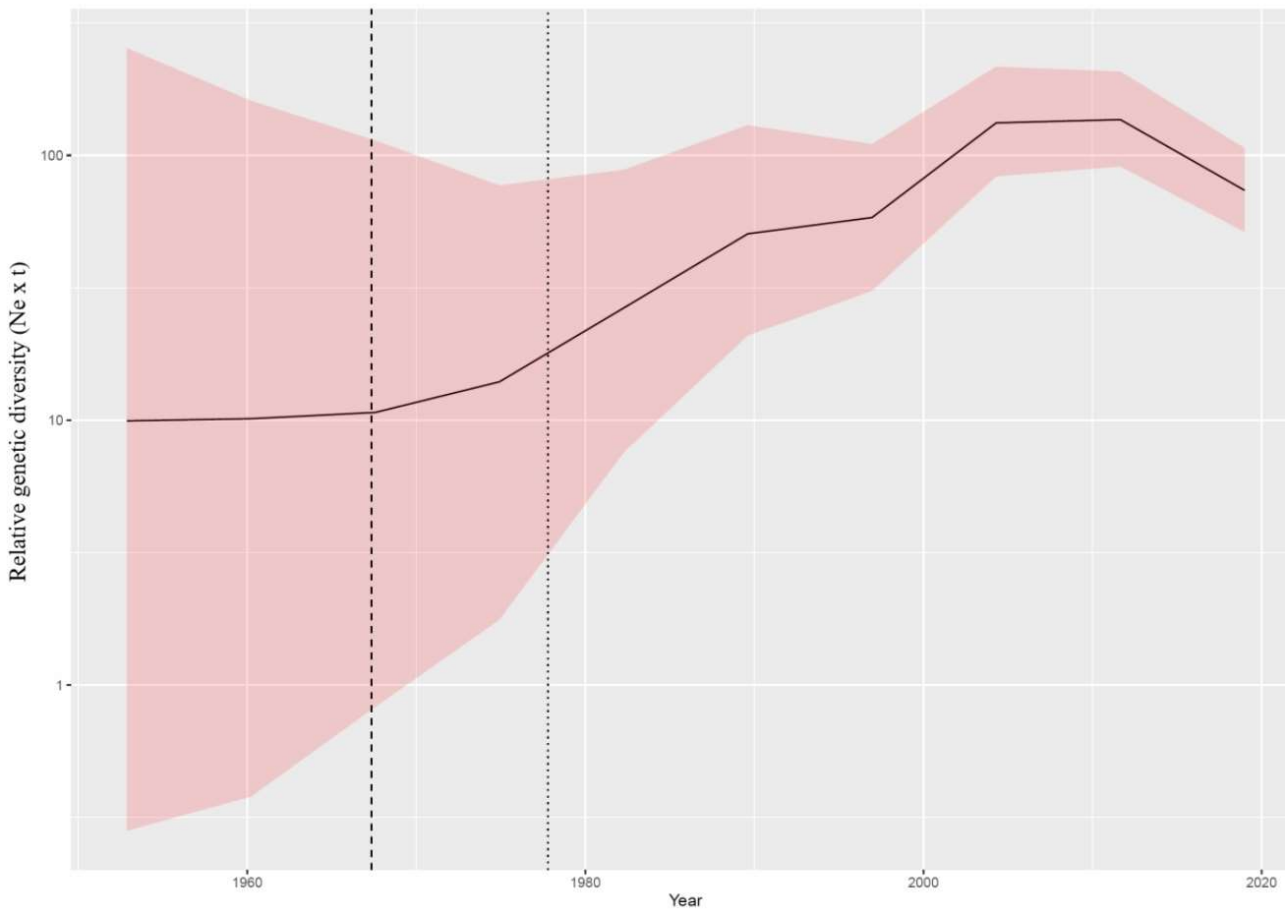


Figure 8 : diversité génétique relative de la protéine S du BCoV en fonction du temps (135)

3/ Particularités des espèces

a) Latence et réactivation du BHV

Le BHV, comme la plupart des herpesvirus, a la capacité d'infester les neurones en entrant par leur terminaison nerveuse. Le BHV, lors d'infection respiratoire, touche principalement le nerf trijumeau, puis migre vers le système nerveux central, principalement vers le ganglion trigéminal, où une infection latente s'établit (57,58,143). Dans de très rares cas, le BHV peut induire des méningo-encéphalites (57). Lors de la mise en latence, la transcription des gènes est restreinte à un ARN messager (latency-related transcript) (143), codé par les gènes LR (latency-related) qui jouent un rôle dans l'initiation et le maintien de la latence (58), en diminuant l'activité lytique des cellules (144). Ainsi, les cellules infectées persistent dans le temps, protégeant et cachant les virus en latence, qui ne sont donc pas détectables par PCR. Lors d'un stress, il y a une réactivation du BHV, qui est alors de nouveau répliqué et excrété (143).

b) Animaux infectés persistants immunotolérants lors de BVD

La BVD présente deux modalités différentes d'infections : une infection transitoire et une infection permanente. L'infection transitoire est l'infection qui présente les signes classiques de BVD avec des signes respiratoires, digestifs et reproducteurs. L'infection permanente est possible lors d'infection d'une vache gestante entre 40 et 125 jours, avant que le fœtus ait développé son système immunitaire adaptatif, par une souche non cytopathogène de BVDV (145,146). Si le veau est mené à terme, puisque la BVD est à l'origine de nombreux avortements et malformations congénitales, il est alors infecté permanent immunotolérant (IPI), c'est à dire qu'il est virémique et excrète des virus de la BVD sans produire d'anticorps dirigés contre le virus, qui est alors reconnu comme du soi (145). Les IPI sont des veaux qui sont, le plus souvent, de petite taille, faible, avec un GMQ inférieur à la moyenne (146). Ces animaux IPI sont à l'origine de la majorité de la transmission intra- et inter-troupeaux (145) car ils ne présentent pas obligatoirement de signe clinique, et excrètent continuellement des virus en quantité augmentée par rapport à un animal infecté transitoire ($R_0 > 30$ (62)). De plus, l'espérance de vie d'un animal IPI est réduite, et on estime que 50 % des IPI sont morts au bout de 1 an de vie (147,148), bien qu'il ait déjà été observé un animal IPI de plus de 10 ans d'âge (148). Si un animal IPI se reproduit, il donnera systématiquement naissance à un animal IPI. Lorsqu'un animal IPI rencontre un virus de la BVD cytopathogène (donc une souche différente que celle qu'il porte), il déclare alors la maladie des muqueuses, qui est une maladie mortelle évoluant sur quelques jours à deux semaines (145,147).

c) La réglementation de l'IBR et de la BVD

La loi européenne de santé animale, mise en application depuis le 21 avril 2021, modifie la réglementation et la catégorisation des maladies animales transmissibles (149). Ainsi, la BVD qui était une maladie d'intérêt national devient une maladie de catégories C, D et E, et l'IBR qui était une maladie de catégorie II devient une maladie de catégories C, D et E (150). Ces deux maladies sont à surveillance obligatoire par les pays membres et à déclaration obligatoire par les éleveurs et

les vétérinaires. Un contrôle avec des exigences est mis en place lors d'échanges entre états. La prévention, le contrôle et l'éradication sont volontaires dans chaque état membre. De plus, ces deux maladies font partie des maladies listées par l'Organisation mondiale de la santé animale (OMSA) dans le code sanitaire pour les animaux terrestres, qui donne des recommandations (151).

En France, le programme de lutte contre l'IBR a démarré en 1996 sur la base du volontariat et a été rendu obligatoire en 2006. En 2016, un objectif d'éradication a été mis en place, renforcé par l'arrêté du 10 juin 2024 (152). En 2022, 93,7 % des troupeaux sont indemnes et 78 % des troupeaux non indemnes ne possèdent pas de bovin positif à l'IBR (distribution explicitée dans la partie III.A.4). Afin de devenir un pays indemne d'IBR, il faut avoir 99,8 % de troupeaux indemnes (statuts définis en Annexe 7) détenant 99,9 % des bovins, objectifs fixés pour 2027 (153,154). Pour la BVD, le programme de lutte national a commencé plus tardivement, avec l'arrêté du 31 juillet 2019 (155), qui a pour objectif l'identification et l'élimination des IPI, principale source de contamination (156). Cependant, 70 % des départements avaient déjà lancé un plan de lutte avant (Figure 9) (156), et certains départements ont lancé un programme de lutte via les Groupements de Défense Sanitaire (GDS) très précocement, comme la Bretagne qui a lancé un plan de maîtrise dès 2000 (157). Un plan d'éradication commun (Figure 10) a été lancé en 2017 par le regroupement de huit départements pour former le GDS SANITEA (soit Bas-Rhin, Haut-Rhin, Meurthe et Moselle, Meuse, Moselle, Vosges, Jura, Marne), puis avec quatorze autres départements (Ardennes, Haute-Marne, Aube, Doubs, Haute-Saône, Territoire de Belfort, Aisne, Somme, Oise, Nord-Pas-de-Calais, Côte d'Or, Saône-et-Loire, Nièvre, Yonne) (158). Au 30 juin 2022, 70 % des troupeaux bénéficiaient d'un statut « à résultats favorables ».

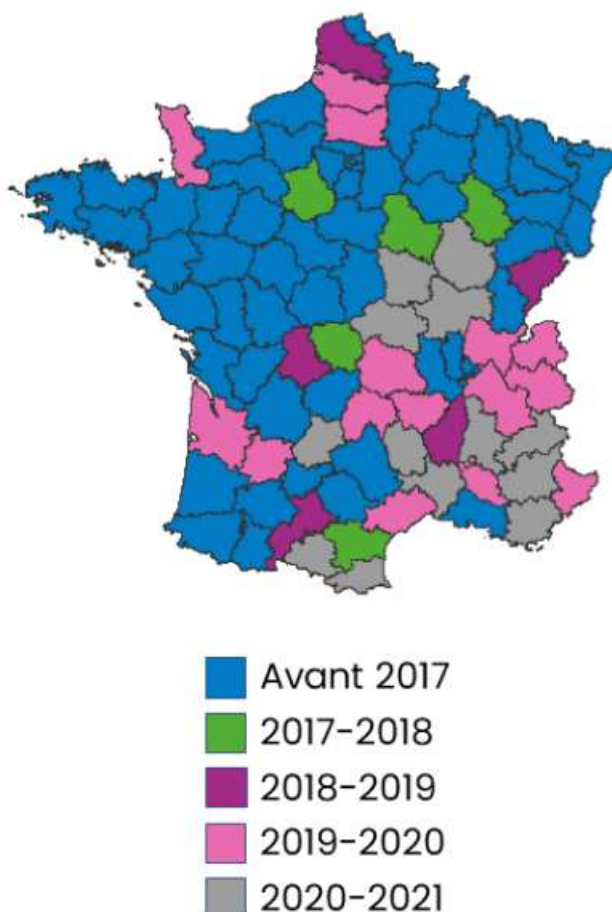


Figure 9 : Campagne de mise en place d'un plan de surveillance et de lutte contre la BVD en France par département (156)

Le programme



Figure 10 : Programme simplifié d'éradication de la BVD mis en place sur la zone SANITEA depuis 2017 (158)

4/ Prévalences et distributions des virus de la BRD

Les virus de la BRD ont une distribution mondiale, avec certains pays où on n'a pas d'étude pour mesurer la prévalence (Figures 11 et 12) (32,50,57–59,135,159,160). Certains pays ont réussi à éradiquer la BVD (Autriche, Danemark, Finlande, Norvège, Suède, Suisse) et/ou l'IBR (Autriche, Danemark, Finlande, Suède, Suisse) avec des mesures de maîtrise et d'éradication importantes (58,161).

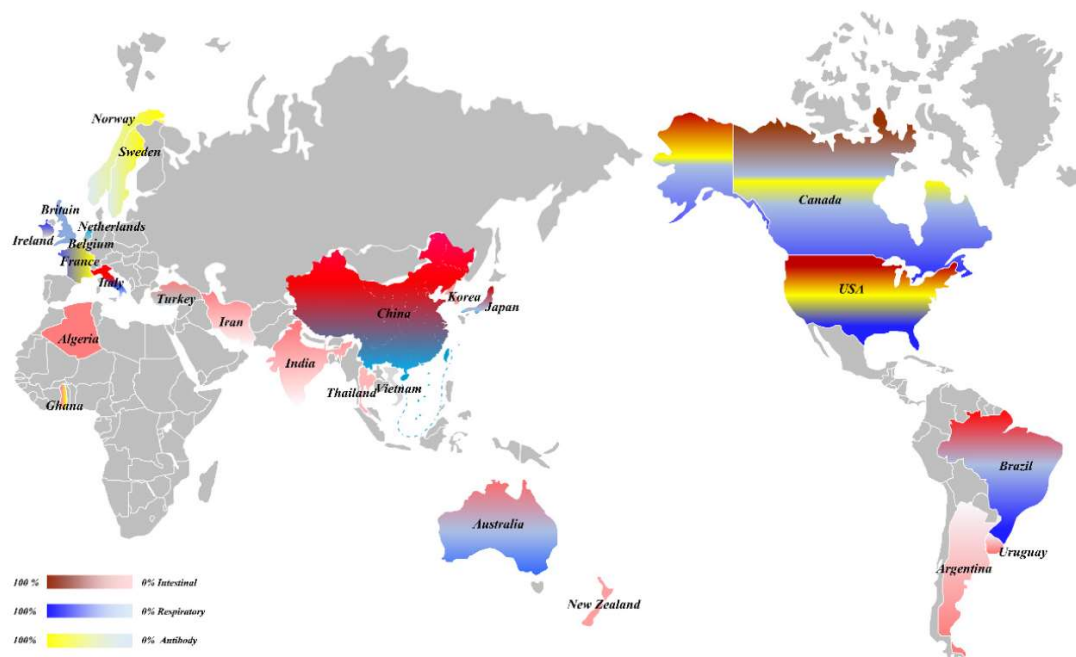


Figure 11 : Distribution du BCoV dans le monde (159)

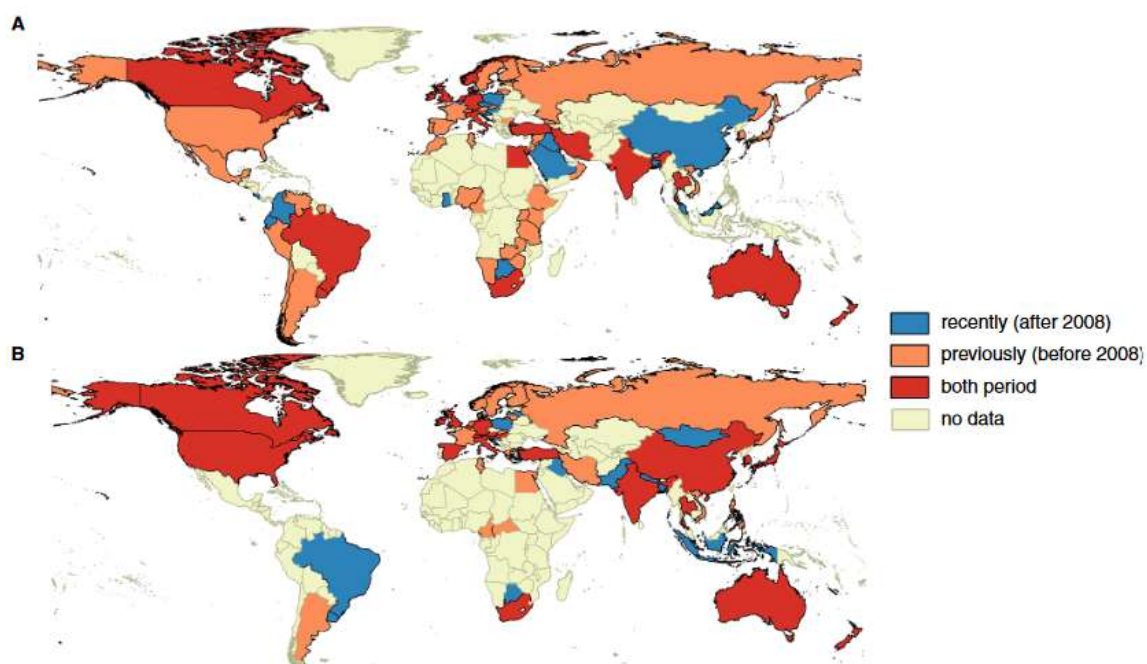


Figure 12 : Distribution du virus de la BVD dans le monde avant et après 2008 en fonction (A) de la présence d'anticorps ou (B) de la présence d'IPI (160)

Dans une étude de 2021, Pratelli et al. observent les prévalences par agent pathogène après transport d'animaux de race Limousine depuis la France vers l'Italie (27), et montrent une prévalence de 14,20 % pour le VRSB, de 10 % pour le BPi-3, de 70,10 % pour le BCoV et 0 % pour l'IBR et le BVDV. Une séroprévalence pour le VRSB de 31,8 % est mesurée sur 2 ans en Pays-de-la-Loire avant engraissement chez les jeunes bovins (24), résultat comparable aux prévalences des autres pays européens (53,54). L'IDV est endémique en France, avec une séroprévalence allant de 31 % (Hauts-de-France) à 70 % (Pays de la Loire) (64). Une prévalence de 81 % pour le BCoV est mesurée à Toulouse sur 168 JB en 2021 (162).

Avec les plans d'éradications mis en place, la prévalence de l'IBR diminue avec le temps, avec une prévalence à 1,59 % en 2022 (154). La répartition des bovins infectés sur le territoire français est hétérogène, avec des départements ne présentant aucun bovin infecté (comme le Morbihan), tandis que d'autres en présentent plus de 2400 (comme le Pas-de-calais) (Figure 13) (163). Une situation similaire est observée pour le BVDV. En effet, une incidence de 4,3 % a été observée pour la campagne de 2020-2021, tandis qu'une incidence de 1,8 % a été observée pour celle de 2021-2022 (164).

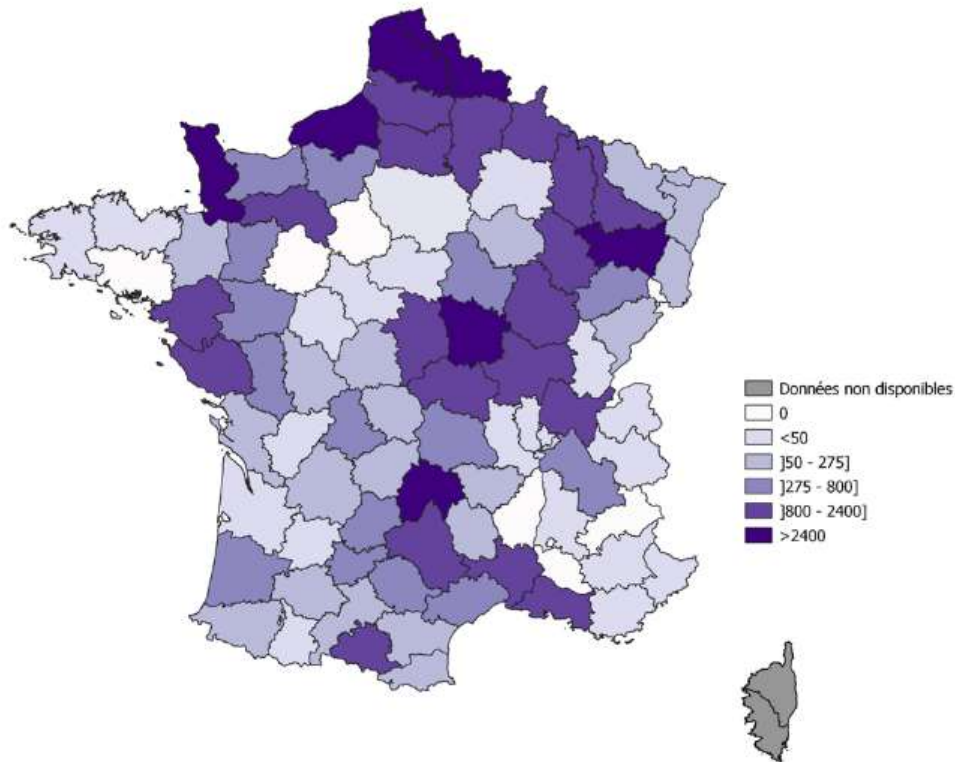


Figure 13 : Distribution par départements des bovins infectés par le BHV-1 en France en 2022 (163)

B) Les bactéries

1/ Les PASTEURELLACEAE

a) Étiologies des PASTEURELLACEAE de la BRD

Les PASTEURELLACEAE sont une famille de bactéries coccobacilles gram négative, anaérobies facultatives, avec un tropisme principalement respiratoire, faisant souvent partie du microbiome respiratoire de diverses espèces animales et à l'origine de nombreuses maladies respiratoires chez différentes espèces de mammifères, de reptiles ou d'oiseaux. Les PASTEURELLACEAE se divisent en 32 genres différents (165). Parmi ces genres, on retrouve les *Pasteurella*, les *Histophilus* et les *Mannheimia* qui ont chacun une espèce (*Pasteurella multocida*, *Histophilus somni*, et *Mannheimia haemolytica* respectivement) d'importance majeure de la BRD.

Pasteurella multocida se classifie en cinq sérogroupes (A, B, D, E et F) selon les polysaccharides de leur capsid (CPS) et en huit (L1-L8) ou seize (selon la classification de Heddleston et al. ou de Harper et al.) sérovars selon les lipopolysaccharides de leur paroi (166–169). Les polysaccharides de capsules déterminent la maladie et l'espèce hôte (166). Pour la BRD, les *P. multocida* sont de sérogroupes A, B et F, avec une prédominance du séro groupe A (98,8%), et de sérovars L2, L3 et L6 (selon la classification de Harper et al.) avec une prédominance de L3 (98,2%). Ainsi, on peut approximer que les *P. multocida* de la BRD sont du séro groupe A et du sérovar L3 (97,6%) (170).

Mannheimia haemolytica se classifie en douze sérovars (A1, A2, A5, A6, A7, A8, A9, A12,

A13, A14, A16, et A17) selon les antigènes présents sur sa capsid (171). Les *M. haemolytica* impliquées de la BRD sont essentiellement de sérovars A1, A2 et A6, avec des proportions qui varient en fonction des études. En effet, Mason et al. ont trouvé 44,2 % de A1, 29,8 % de A2 et 17,3 % de A6 lors de prélèvements sur des bovins malades de Grande-Bretagne (171), tandis que Timsit et al. ont trouvé 79,5 % de A1, 2,6 % de A2 et 9 % de A3 sur des bovins sains et malades du Canada (172).

En 2003, Angen et al. proposent de regrouper *Haemophilus somnus*, *Haemophilus agni* et *Haemophilus ovis* sous la même espèce dénommée *Histophilus somni*, et de créer le taxon *Histophilus* au sein des PASTEURELLACEAE (173). En effet, à partir du séquençage de la base 16S de l'ARN polymérase, ils ont trouvé une distance génétique significative entre *Histophilus* et les autres genres de PASTEURELLACEAE. *H. somni* est une des rares PASTEURELLACEAE ne possédant pas de capsid (174).

b) Pathogénie générale des PASTEURELLACEAE de la BRD

Les PASTEURELLACEAE sont des bactéries commensales des cavités nasales. Se sont donc des agents pathogènes opportunistes, qui nécessitent un stress initial pour pouvoir être pathogènes. *Mannheimia haemolytica* est la plus virulente des trois, et on suspecte qu'elle peut infecter sans stress initial. *Pasteurella multocida* présente une virulence plus élevée que *Histophilus somni*. La virulence des PASTEURELLACEAE dépend principalement de leur capacité d'adhésion aux cellules épithéliales, à leur capacité d'évitement de l'immunité, et à leur toxicité pour les cellules épithéliales. La principale toxicité pour les cellules épithéliales réside dans les lipopolysaccharides qui composent leur paroi bactérienne, qui sont des toxines induisant une inflammation, plus marquée chez *M. haemolytica* (175). Les stéréotypes A1 et A2 possèdent une peptidase capable de lyser les immunoglobulines de type A, ou présente des adhésines spécifiques, expliquant une différence de virulence entre sérotypes (176). *H. somni* produit un biofilm in vivo et in vitro à base de polysaccharides contrôlé par des facteurs de stress (174). Ce biofilm favorise l'agrégation et l'attachement des bactéries, leur multiplication, leur résistance face à l'immunité de l'hôte et face aux antibiotiques, et augmente donc la persistance dans les tissus de l'infection (177). *P. multocida* et *M. haemolytica* peuvent produire un biofilm in vitro, mais aucune étude ne montre qu'elles peuvent produire un biofilm in vivo (177).

c) Prévalences et distributions des PASTEURELLACEAE de la BRD

Les PASTEURELLACEAE étant des bactéries commensales des cavités nasales, il faut faire la distinction entre présence et infection, et donc entre prévalence de la bactérie (c'est à dire nombre d'animaux porteurs/nombre d'animaux total) et prévalence de la bactérie lors de BRD (c'est à dire nombre d'animaux malades excréteur/nombre d'animaux malades). *Histophilus somni* étant le moins virulent des trois PASTEURELLACEAE d'intérêt, c'est la bactérie ayant le moins de différence (<10%) de prévalence entre animaux sains et animaux atteints de BRD, malgré des prévalences pouvant atteindre 85 % dans certaines études (27,70,162,172). À l'inverse, *Mannheimia haemolytica* présente une prévalence plus faible, avec une distinction plus visible entre animaux sains (8-20%) et animaux présentant des signes de BRD (16-45%) (24,27,70,178). *Pasteurella multocida* est intermédiaire aux deux précédents avec une prévalence chez les animaux sains entre 12 et 40 % et chez les animaux présentant des signes de BRD entre 35 et 60 % (27,70,162,178).

2/ Les Mycoplasmes

a) Étiologies des Mycoplasmes de la BRD

Mycoplasma bovis est une bactérie qui peut provoquer un certains nombres de maladies différentes (68,69,179) (Tableau XX) dont la broncho-pneumonie qui rentre dans le complexe de la BRD. *Mycoplasma bovis* appartient à la classe des *Molliculites*, à l'ordre des *Mycoplasmatales*, à la famille des MYCOPLASMATACEAE et au genre *Mycoplasma*, qui sont des bactéries sans paroi cellulaire (et donc sans gram) de petites tailles, avec un génome de 1080 kb (34,69,179).

Tableau XX : Les différents systèmes atteints par *Mycoplasma bovis* et les maladies associées

Systèmes atteints	Maladies
Système respiratoire	Broncho-pneumonie
Système locomoteur	Arthrites
	Ténosynovites
Système reproducteur	Mammite
	Avortement
	Infertilité
	Spermatocystite
Système cutané	Abcès déclive
Système oculaire	Kératoconjonctivite
Système auditif	Otite moyenne
Système nerveux	Méningite

b) Pathogénie générale des Mycoplasmes de la BRD

L'adhésion des Mycoplasmes aux cellules hôtes passe par un ensemble de protéines de leur membrane cellulaire. Les plus importantes sont les protéines de surface variable (VSP) qui sont des lipoprotéines. Il existe cinq VSP différents (VSPA, VSPB, VSPC, VSPF, VSPO), et le phénotype des Mycoplasmes est caractérisé par la proportion de chaque VSP. Selon le phénotype, on trouve une virulence différente des Mycoplasmes. En plus de leur capacité d'adhésion, les VSP jouent un rôle dans l'échappement à la réponse immunitaire, en diminuant l'adhésion des immunoglobulines à la bactérie (68,69,180). Certaines souches de Mycoplasmes sont capables de produire un biofilm, qui constitue alors une autre barrière mécanique de défense de la bactérie. Ce biofilm peut notamment diminuer la diffusion des antibiotiques au contact des bactéries (68,69,177,180).

c) Prévalences et distributions des Mycoplasmes de la BRD

Mycoplasma bovis a une distribution mondiale. En France, d'après des études génomiques, il évolue depuis au moins le début des années 2000. Deux lignées phylogéniques différentes évoluent en parallèle depuis 2005 en France. *M. bovis* se trouve dans toutes les régions où il y a une forte concentration de bovins (181,182). Chez les veaux, les Mycoplasmes ont une prévalence

élevée dans les autres maladies qu'ils peuvent causer. L'atteinte respiratoire des Mycoplasmes se retrouvent essentiellement chez les JB après transport. La prévalence des infections respiratoires par *M. bovis* est faible (<10%) avant le transport des broutards. Après le transport, on atteint des prévalences de plus de 40 % en moins de 2 semaines (27,162,180).

IV/ Le diagnostic de la BRD

A) Les symptômes lors de la BRD

Les symptômes lors de la BRD peuvent être frustes avec simplement de la fièvre transitoire, ou plus francs, avec de la toux et de l'abattement pouvant durer jusqu'à 9 jours, ce qui se traduit chez les bovins par une diminution de la rumination et une augmentation du temps de repos (183). Tous les signes cliniques pouvant être présents lors de la BRD sont synthétisés dans le Tableau XXI (183,184). La notion de fièvre peut être variable entre les articles et les individus, avec des définitions de fièvre variant de 39,2°C à 41,1°C (184). Plusieurs études ont montré une différence significative de la durée de température supérieure à 39,5°C dans le réticulum des JB sub-cliniques et cliniques par rapport à des bovins sains, à l'aide de bolus mesurant la température (185,186). La dyspnée peut se traduire par une augmentation de la fréquence respiratoire, avec un tirage costal, jusqu'à la détresse respiratoire, avec une respiration gueule ouverte, avec l'encolure tendue vers le bas (dite position d'orthopnée). Lors de l'auscultation, il est possible d'entendre une augmentation des bruits respiratoires, une diminution des bruits respiratoires, des crépitements, des sifflements, et des frottements pleuraux. Cependant, il n'est pas possible de localiser précisément la lésion à cause de l'irradiation des sons (187).

Plusieurs scores cliniques (exemple en Annexe 8) ont été créés chez les veaux non-sevrés, avec des sensibilités et des spécificités de 62,4 % à 72,6 % et de 74,1 % à 91,2 %, respectivement (188,189). Les éleveurs, en 1996, ne détectaient que les cas sévères de la BRD, et avaient donc une sensibilité plus faible (58,3%) mais une spécificité plus élevée (100%) sur les animaux morts (190). Il est difficile d'établir des sensibilités et des spécificités précises lors de BRD car il n'y a pas de bon gold standard. Souvent, le gold standard utilisé est soit l'échographie thoracique, qui manque elle aussi de sensibilité et de spécificité (191,192), soit l'autopsie, et l'étude ne présente alors que peu d'animaux pour des raisons pratiques et éthiques.

Tableau XXI : Synthèse des signes cliniques lors de BRD chez les JB

Modification de l'état général	Altération de la fonction respiratoire	Autres systèmes atteints
Fièvre	Toux	Jetage oculaire
Dysorexie	Dyspnée	Diarrhée
Abattement	Jetage nasal	Salivation
Baisse d'activité	Tachypnée	Emphysème sous-cutané
Diminution de la croissance	Auscultation respiratoire anormale	
Diminution du temps de rumination (193)		
Mort		

B) Les examens complémentaires possibles lors de BRD

Parmi les examens complémentaires possibles, il y a :

- les examens d'imagerie avec l'échographie, réalisable sur le terrain, et la radiographie, non réalisable sur le terrain chez les JB (192),
- les examens d'identification des agents pathogènes avec des prélèvements comme l'écouvillonnage nasal, le lavage broncho-alvéolaire ou l'aspiration trans-trachéal, suivi par une analyse laboratoire avec soit un antibiogramme, une culture, ou une réaction de polymérase en chaîne (PCR) pour les bactéries, soit une PCR pour les virus,
- les prises de sang avec les sérologies (test rapide ou laboratoire), une biochimie ou une numération et formule sanguine.

L'échographie thoracique consiste en l'émission d'ultrasons sur l'aire de projection des poumons afin d'en voir les structures. L'aire de projection pulmonaire s'étend du 1^{er} espace intercostal (IEC) au 10^{ème} EIC à droite et du 2^{ème} EIC au 10^{ème} EIC à gauche, et est délimitée par le sternum ventralement et la scapula dorso-crânialement (Figure 14) (187,194,195). Cependant, l'échographie ne permet pas de voir à travers un contenu aérique, il n'est alors possible que de voir la plèvre, et d'éventuels remaniements comme les consolidations pulmonaires, un pneumothorax, des nodules ou un épanchement pleural (Figure 15) (187,192,196). De plus, il n'est pas possible à l'aide de l'échographie seule de savoir si les consolidations et nodules sont des lésions récentes ou d'une infection antérieure (183). La sensibilité et la spécificité de l'échographie thoracique sont estimées à 79-84 % et 74-98 %, respectivement, en utilisant un score en fonction de l'intensité de la consolidation pulmonaire (192,196,197).

L'écouvillonnage nasal permet de récupérer les bactéries présentes dans les cavités nasales, en enfonçant un écouvillon par les narines jusqu'aux cavités nasales, tandis que le lavage broncho-alvéolaire permet de récupérer des bactéries provenant des bronches et des alvéoles pulmonaires, en introduisant une sonde nasale jusqu'aux bronches souches, et en injectant puis aspirant une solution stérile saline (0,9 % NaCl) (198). Pour la détermination bactérienne, les deux méthodes présentent des résultats similaires (198). Des seuils de cycle de quantification ont été calculé lors de rétro-PCR pour *Pasteurella multocida*, *Histophilus somni* et *Mycoplasma bovis* au-delà desquelles un animal développe un épisode de BRD avec l'agent pathogène en question (115). Cependant, en dehors de ces seuils, la présence d'un agent pathogène ne signifie pas le développement d'un épisode de BRD. La sensibilité et la spécificité des tests PCR varient en fonction du gold standard choisi, de l'agent pathogène, de la technique utilisée et des promoteurs utilisés (199).

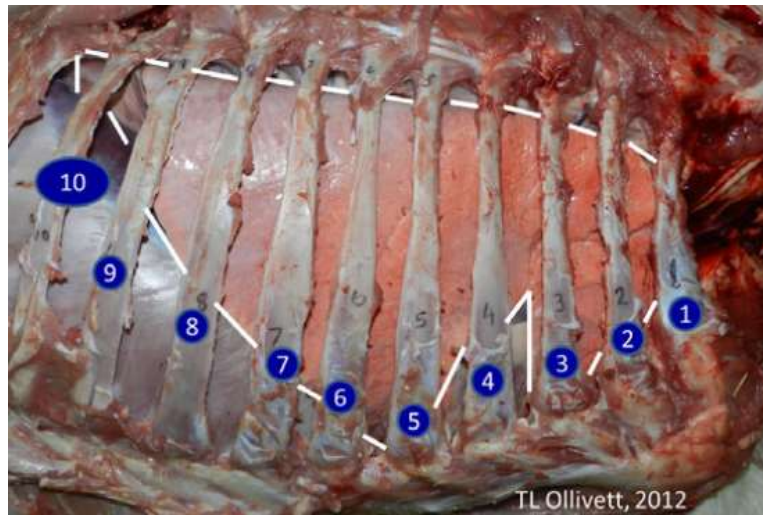


Figure 14 : Aire de projection du poumon à droite d'une vache en autopsie (194)

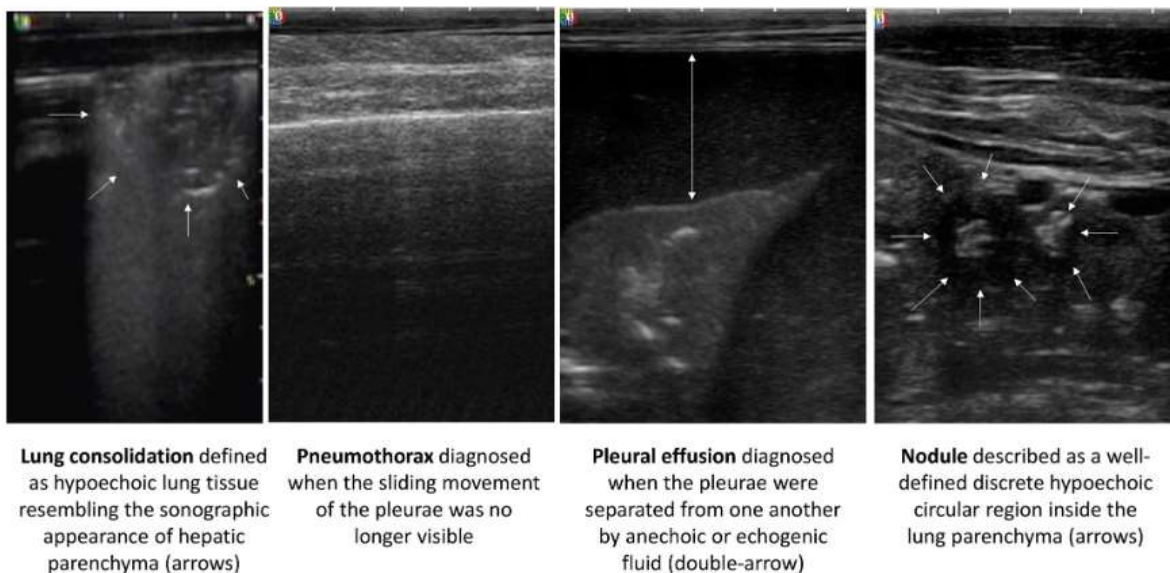


Figure 15 : Images de remaniements pulmonaires à l'échographie (192)

La sensibilité de la numération et formule sanguine pour l'identification de BRD est faible (entre 24,2 et 50,5 % selon les paramètres), mais présente une spécificité correcte (entre 60,1 et 85,2 % selon les paramètres) (200). L'haptoglobine est une protéine de la phase aiguë de l'inflammation produite par le foie chez les bovins, que l'on retrouve notamment lors de BRD chez le veau (201). La sensibilité et la spécificité de l'haptoglobine est similaire aux autres paramètres sanguins (46,4 % et 81,6 % respectivement) (200).

Avec le développement de l'intelligence artificielle et du machine learning, sont en cours de recherche des méthodes de détection automatisées et/ou précoces. Ainsi, en utilisant des données continues issues de vidéos, accéléromètres ou podomètres, des corrélations ont été montrées sur les données de terrain pour identifier un animal clinique de BRD (ex : un lien significatif entre diminution de l'activité détectée par les accéléromètres et un veau clinique de BRD) (183,202).

C) Diagnostic post-mortem de la BRD

Après décès, par autopsie ou à l'abattoir, peuvent être observées les lésions pulmonaires liées à la BRD. Dans la filière bovine, il n'y a pas de retour de l'abattoir des lésions observées, pouvant aider au diagnostic. Le diagnostic post-mortem n'est donc possible que lors d'une autopsie réalisée par un vétérinaire lors d'épidémie dans un troupeau (203). Parmi les lésions qu'il est possible de trouver dans le poumon, il faut différencier les lésions infectieuses primaires, des thrombo-embolies pulmonaires, qui sont des maladies secondaires à une infection systémique non respiratoire (mammites, arthrite, omphalophlébite...), caractérisées par de multiples nodules rouges autour des vaisseaux pulmonaires (203). A l'autopsie, il est possible de différencier entre un processus aigu et un processus chronique. Certains agents pathogènes ont été corrélés avec des lésions aiguës (*Mannheimia haemolytica*, *Mycoplasma bovis*, BVDV cytopathogène, BHV) et d'autres avec des lésions chroniques (*Pasteurella multocida*, *Histophilus somni*, *Mycoplasma bovis*, BVDV non cytopathogène) (204). Macroscopiquement, les lésions observées lors de BRD sont des lésions de consolidation, des bronchopneumonies fibrineuses à suppurées, des pleurites fibrineuses à purulentes et de l'emphysème (203–207). Des lésions de l'appareil respiratoire supérieur sont possibles, notamment lors d'infection par le virus de l'IBR, avec des trachéites fibrineuses à purulentes, ou nécrotiques et des laryngites nécrotiques (205). Lors d'induction de BRD avec *M. haemolytica* chez des veaux non sevrés, il y a une répartition préférentielle des lésions sur le poumon droit par rapport au poumon gauche chez 93 % des veaux (13/14), avec une atteinte préférentielle des lobes apical crânial et apical caudal (206). Des lésions histologiques ont aussi été mises en évidence lors de BRD, mais ces données ne sont pas utilisées sur le terrain en pratique.

VI/ Les traitements de la BRD

Afin de limiter l'impact de la BRD sur le troupeau, il est possible de mettre en place avant apparition de la maladie des traitements préventifs afin de limiter la propagation des agents pathogènes dans l'élevage et augmenter l'immunité des animaux, et après l'apparition de la maladie des traitements curatifs ou de soutien pour limiter l'impact de la BRD. Lorsque l'animal ou l'élevage est trop atteint, il est possible de pratiquer l'euthanasie afin de limiter les pertes économiques de l'éleveur, sur des animaux dont le taux de survie est estimé faible.

A) Les traitements préventifs de la BRD

1/ Par modification des conditions d'élevages

Comme vu dans la **Partie 1.I.B.3**, un certain nombre de facteurs de risque est lié à l'environnement dans lequel vivent les JB. Ainsi, lorsque les conditions dans le bâtiment ne sont pas optimales, notamment concernant l'humidité et la ventilation, il est possible de réaliser des travaux sur le bâtiment afin d'améliorer ces conditions, et ainsi limiter les risques. Au vu du coût et des chantiers, il est rarement possible de réaliser les travaux adéquats. En dehors du bâtiment, il peut être nécessaire de revoir la qualité de la ration alimentaire et de suivre les maladies concomitantes, afin de réduire leur incidence. La mise en infirmerie des animaux malades, ou la mise en quarantaine d'un lot à l'arrivée sont deux pratiques qui permettent de diminuer la pression

d'infection pour les animaux qui ne sont pas malades, mais nécessitent des locaux adaptés, ce qui n'est pas systématiquement le cas en élevage engraisseur.

2/ Par la vaccination contre les agents pathogènes

a) Définition et utilisation de la vaccination chez les JB

La vaccination est le traitement préventif le plus simple à mettre en place en termes de praticité et de coût à court terme. Le but de la vaccination est de faire produire par les animaux des anticorps contre les agents pathogènes de la BRD sans induire de maladie, afin de diminuer les signes cliniques lors de BRD ainsi que l'excrétion et donc la transmission des agents pathogènes. Différentes technologies sont utilisées dans les vaccins contre les agents de la BRD. En effet, parmi les vaccins commercialisés en France, on trouve des vaccins avec des agents pathogènes vivants inactivés, modifiés ou atténués ; des vaccins avec des antigènes d'agents pathogènes ou des vaccins avec des toxines d'agents pathogènes (Annexe 1A). De nouveaux vaccins sont régulièrement créés, le dernier en date étant le BOVILIS® Nasalgen-C contre le BCoV, mis sous le marché en France le 31/03/23 (Annexe 1A). Chaque vaccin dispose de recommandations de vaccination différentes (Annexe 1B) et protège contre des agents pathogènes différents.

La vaccination est couramment utilisée dans la filière allaitante. En effet, 79 % des engraisseurs français et 33 % des naisseurs français vaccinent leurs animaux contre les maladies respiratoires (5). 8 % des JB dans un centre de commercialisation dans l'ouest de la France sont vaccinés contre les maladies respiratoires (88). La vaccination chez le naisseur correspond à la réalisation de deux injections dans l'élevage naisseur. La vaccination chez l'engraisneur est plus complexe, car peut être réalisée soit par une injection dans le centre de commercialisation puis une injection dans l'élevage à l'arrivée, soit deux injections dans l'élevage, soit une seule injection à l'arrivée dans l'élevage (90). Dans ce dernier cas, la protection des animaux est discutable : les animaux ayant déjà reçu une vaccination chez le naisseur auront une bonne protection, tandis que les animaux n'ayant pas eu de vaccination chez le naisseur présenteront une protection vaccinale inférieure.

Les avantages de la vaccination perçus par l'éleveur sont la diminution des morts et de l'impact économique et psychologique associé, la réalisation d'un traitement organisé et planifié, et dans une moindre mesure le meilleur contrôle des maladies. Les inconvénients perçus par les éleveurs de la vaccination sont le temps nécessaire à la bonne réalisation de la vaccination et la manipulation des animaux (208).

b) Diminution de la BRD et amélioration des performances lors de vaccination chez les JB

Mounaix et al. ont réalisé en France une comparaison entre trois modalités de vaccination : une vaccination chez le naisseur, une vaccination avec une injection chez le naisseur et une deuxième au centre de tri, et une vaccination avec une injection au centre de tri et une injection à l'arrivée chez l'engraisneur (90). Lors de cette étude, ils ont trouvé une différence significative entre les trois protocoles sur le GMQ et la DE : plus la vaccination est réalisée tardivement, plus le GMQ est faible et la DE est élevée. Tresse et al. ont trouvé un résultat similaire, avec une augmentation de

la morbidité entre des animaux vaccinés chez le naisseurs et des animaux vaccinés avec une injection dans le centre de tri et une injection à l'arrivée dans l'élevage engraisseur (5 % et 12,7 % respectivement) (209). La vaccination chez le naisseur avant le départ des broutards semble être le protocole préventif le plus efficace. Lors de la vaccination en élevage engraisseur, Santinello et al. montrent que réaliser la vaccination plus de 2 jours après l'arrivée à l'élevage d'engraissement entraîne une baisse significative du GMQ jusqu'à l'abattoir (différence de 0,02 kg/j) et augmente la DE (différence de 5,3j) par rapport aux animaux vaccinés le jour de leur arrivée ou le lendemain (210). La vaccination des jeunes bovins permet une augmentation non systématique (105) du GMQ jusqu'à l'abattoir (90,97,210), une diminution de la DE (90,97,210), une diminution de la morbidité (90,97,209) et de la mortalité de la BRD (97) ainsi qu'une diminution du nombre de traitements utilisés (90,209).

B) Les traitements curatifs ou de soutien de la BRD

1/ Les traitements individuels

Il existe deux formes de traitements différents pour aider un animal à guérir de BRD. La première est un traitement qui agit directement contre les agents pathogènes, c'est à dire des antibiotiques pour les bactéries, et des anti-viraux contre les virus. Les anti-viraux sont peu efficaces, et nécessitent une administration au bon moment, c'est à dire pendant la réplication virale. Avec le délai entre l'infection et le diagnostic puis le diagnostic et le traitement, les anti-viraux sont rarement utilisés pendant leur fenêtre d'efficacité. De plus, ce sont aujourd'hui des traitements coûteux. Ils ne sont donc pas utilisés sur le terrain. La deuxième forme de traitement est un traitement de soutien des fonctions de l'animal.

a) Les traitements antibiotiques

Il existe de nombreux antibiotiques différents, ceux utilisés contre la BRD sont résumés dans l'Annexe 9. Les antibiotiques utilisés contre la BRD doivent avoir une bonne distribution dans les poumons, un spectre d'action qui comprend les *Pasteurellaceae* et, de manière moins systématique, les Mycoplasmes. Aujourd'hui, il est aussi intéressant de prendre en compte les résistances bactériennes présentes en France dans le choix de l'antibiotique (cf. **Partie 1.II.D.4**), et leur coût pour l'éleveur (cf. **Partie 1.II.D.2**). Enfin, la réglementation en France décrit des antibiotiques critiques (Annexe 9, (211)) qui sont des antibiotiques d'intérêt pour la médecine humaine, que les vétérinaires ne doivent utiliser qu'en dernier recours. Ces antibiotiques ne peuvent être prescrits que pour une durée de 1 mois maximum (contre 1 an habituellement), que pour des traitements métaglyctiques ou curatifs, nécessitant un examen clinique ou nécropsique, avec la réalisation d'un antibiogramme au préalable (datant de moins de 3 mois). Ce dernier point peut être dérogé si et seulement si « il s'agit d'un cas aigu d'infection bactérienne pour laquelle un traitement avec d'autres familles d'antibiotiques serait insuffisamment efficace. Dans un délai de quatre jours après la prescription, le vétérinaire adapte le traitement en fonction de l'évolution du contexte clinique et épidémiologique et des résultats des examens complémentaires portés à sa connaissance. » (212).

b) Les traitements de soutien

Dans le cas de la BRD, il s'agit principalement d'anti-inflammatoires, qui vont permettre de réduire l'inflammation, source des lésions lors de BRD (cf. **Partie 1.IV.C**). Parmi les anti-inflammatoires, on distingue principalement les anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS) et les corticoïdes (ou anti-inflammatoire stéroïdien (AIS)). Peu d'articles étudiant l'impact de la BRD utilisent ces traitements, et lorsqu'ils le font, c'est dans le cas de récurrence ou de multi-récurrence (99), afin de ne pas cacher les signes cliniques en cas d'échec thérapeutique. En 2011 aux États-Unis, 64,8 % des élevages d'engraisements donnaient des AINS en première intention et 35,6 % des AIS (213).

Les études qui comparent les traitements à base d'un antibiotique seul avec des traitements à base d'un antibiotique associé à un AINS montrent une diminution précoce de la température rectale, qu'il n'y a pas de différence d'échec thérapeutique et pas de différence de mortalité entre les protocoles thérapeutiques. La réduction des signes cliniques par les AINS lors de leur mise en place est controversée (214). Pour les corticoïdes, seul un bénéfice sur les signes cliniques lors de sa mise en place semble être présent (214).

2/ Les traitements de groupe : la métaphylaxie

a) Définition et utilisation de la métaphylaxie chez les JB

Les traitements métaphylactiques consistent en la réalisation d'un traitement sur tous les animaux, lorsqu'une partie du lot est malade, afin de permettre un traitement précoce des nouveaux animaux infectés et de réduire la propagation de la maladie. Pour la BRD chez les JB, il est courant de réaliser un traitement métaphylactique à l'arrivée, si le risque est estimé élevé (111). Cependant, des seuils sont définis lorsque l'incidence sur 24h est supérieure à 10 %, ou lorsque l'incidence est supérieure à 5 % sur 48 à 72h (215). Aux États-Unis en 2011, 59,3 % des élevages de JB réalisent des traitements métaphylactiques (213). En 2016 aux États-Unis, 12,8 % des élevages engraisseurs réalisaient des traitements métaphylactiques par injection, 40,4 % par des aliments pour contrôler la BRD et 8,3 % par un traitement dans l'eau de boisson (216).

La réalisation des traitements métaphylactiques est encadrée par le règlement européen 2019/6, qui vise à réduire l'utilisation des antibiotiques dans le cadre de « Une seule santé » et de l'augmentation des résistances bactériennes contre les antibiotiques (cf **Partie 1.II.D.4**). En particulier, ce règlement précise qu'il faut « un risque élevé de propagation d'une infection ou d'une maladie infectieuse dans un groupe d'animaux et qu'aucune autre solution n'existe », qu'une « ordonnance vétérinaire n'est délivrée pour un médicament antimicrobien à des fins de métaphylaxie qu'après un diagnostic de la maladie infectieuse par un vétérinaire » (217). Enfin, dans le règlement européen 2019/4 est précisé que « l'utilisation d'aliments médicamenteux pour animaux antimicrobiens à des fins métaphylactiques ne devrait être autorisée qu'en cas de risque élevé de propagation d'une infection ou d'une maladie infectieuse, conformément au règlement (UE) 2019/6 » (218). Ainsi, en France chez les bovins, les traitements métaphylactiques ne sont pas des aliments médicamenteux, et sont principalement réalisés par voie injectable.

Les antibiotiques utilisés pour la métaphylaxie aux États-Unis en 2011 pour les JB sont la tilmicosine (54,5%), la gamithromycine (6,6%), le florfenicol (8,7%), le ceftiofur (33,9%), l'oxytétracycline (16,1%), et la tulathromycine (43,4%) (213). En Annexe 9 sont résumés les

antibiotiques utilisés pour les affections respiratoires (111). L'association sulfamidine/triméthoprime est rarement utilisée comme produit de métaphylaxie.

b) Diminution de la BRD et amélioration des performances lors de traitements métaphylactiques chez les JB

Horton et al. ont trouvé, lors de l'utilisation d'un traitement métaphylactique à base de tulathromycine à l'arrivée sur un lot de JB avec un risque intermédiaire, une diminution de la morbidité de 57,4 % (17,18 % contre 7,32%), une diminution de la mortalité de 39,7 % (0,73 % contre 0,44 %), une augmentation du GMQ de 0,06 kg/j (p-value=0,05, morts inclus) et ne trouvent pas de différence de qualité de carcasse (p-value= 0,80 et 0,85) (14). Guthrie et al. ont trouvé un résultat similaire avec une diminution de 54,8 % (56,5 % contre 25,5%) de la morbidité entre 1 et 28 jours, une augmentation du GMQ de 0,08 kg/j entre 0 et 102 jours (p-value<0,01), mais une différence non significative du GMQ entre 0 et 191 jours (p-value=0,10) lors d'un traitement métaphylactique à base de tilmicosine sur 1 lot. Cependant, lorsqu'on regarde par statut clinique, on trouve une diminution du GMQ des animaux sains de 0,09 kg/jour (p-value<0,01) et une diminution de 0,04 kg/j pour les animaux cliniques (p-value<0,01). Guthrie et al. ne trouvent pas non plus de différence significative dans la qualité de la carcasse (219). En résumé, lors de traitement métaphylactique, on peut espérer avoir une réduction de la morbidité de 50 % (14,219,220), une diminution de la mortalité (14,104), une amélioration du GMQ en début d'engraissement (14,104,219,221) et une amélioration moins systématique du GMQ jusqu'à l'abattoir (14,104,219), sans modification de la qualité de la carcasse (14,104,219).

C) La réforme ou l'euthanasie des animaux

Lorsqu'un animal ne produit pas suffisamment, il est possible de le réformer et de l'envoyer à l'abattoir plus tôt, avec un poids de carcasse plus faible. C'est une pratique qui est courante en élevage laitier, mais rare chez les JB. En effet, comme vu en **Partie 1.II.B**, l'abattoir demande un poids minimal pour envoyer les JB à l'abattoir. Dans ce cas, le seul intérêt en élevage d'engraissement de réaliser une réforme est pour limiter la transmission de la BRD, et il s'agit alors d'animaux IPI ou porteur du BHV. En effet, la répercussion de ces deux maladies réglementées dans un élevage est importante. L'euthanasie peut être pratiquée sur animal pour diminuer les pertes liées aux traitements et quand, sur décision conjointe de l'éleveur et du vétérinaire, le taux de survie estimée de l'animal est faible et/ou que son bien-être est trop atteint.

Partie 2 : Modélisation économique lors de co-infections respiratoires chez les jeunes bovins en France

I/ Cadre et objectifs de l'étude

Mon étude est réalisée au sein de l'équipe DYNAMO de l'unité mixte de recherche BIOEPAR, affiliée à INRAE et Oniris VetAgroBio, à Nantes. Pour réaliser ma thèse, j'ai mobilisé un modèle simulant la co-infection d'un élevage multi-lots de jeunes bovins par deux agents pathogènes respiratoires et qui permet de simuler la réalisation d'un traitement métaphylactique ou d'une vaccination, développé par Baptiste Sorin-Dupont (222), et ci-après dénommé BRDcoinfmodel. J'ai aussi mobilisé le logiciel PASTE développé par Guita Niang et Sébastien Picault au sein de l'équipe (223), et qui permet de transformer rapidement un modèle épidémiologique en un outil web d'aide à la décision.

Le premier objectif de ma thèse était de calculer l'impact économique de la BRD dans les élevages engraisseurs en France en utilisant les sorties de BRDcoinfmodel et les valeurs financières trouvées dans la littérature (cf. **Partie 1**), afin de comparer les différentes modalités de gestion des cas sévères de BRD par rapport à un aspect financier et social. Pour ce faire, je me suis intéressé principalement aux élevages engraisseurs français.

Le deuxième objectif était d'importer le modèle de Baptiste Sorin-Dupont dans le logiciel PASTE afin d'initier la création d'un outil web d'aide à la décision à partir d'un modèle mécaniste. De ce fait, j'ai travaillé avec Baptiste Sorin-Dupont pour comprendre et utiliser son modèle, ainsi qu'avec Guita Niang et Sébastien Picault pour comprendre, modifier et utiliser le logiciel PASTE.

Le troisième objectif, proche du deuxième, était de tester les fonctionnalités de PASTE en y important un modèle non conçu pour cela initialement afin d'observer la pédagogie, l'ergonomie, et la fonctionnalité de l'outil.

II/ Matériels et Méthodes

A) Généralités sur la modélisation en épidémiologie

1/ Objectifs de la modélisation en épidémiologie

Modéliser un système biologique consiste à le représenter de manière simplifiée, par des équations mathématiques ou des codes informatiques de simulations, de manière à bien comprendre les processus en jeu dans son fonctionnement. Ainsi, l'objectif d'un modèle est d'être fidèle au(x) processus à simuler, mais sans nécessairement y intégrer toute la réalité, souvent trop complexe pour être appréhendée dans sa globalité. Il est important de bien définir les objectifs du modèle afin de pouvoir le créer et analyser les résultats du modèle. Valleron définit quatre objectifs différents de la modélisation en épidémiologie : aider à décrire (par exemple par des études temporelles ou géographiques afin d'analyser un grand nombre de données), aider à comprendre (par exemple en testant des hypothèses de mécanismes de transmission), permettre l'évaluation de paramètres cachés

à l'observateur (par exemple en calculant un taux de transmission), et aider l'expérimentation (par exemple en réalisant un modèle comme prototype de l'expérimentation) (224).

Il existe un compromis à trouver entre fidélité et complexité du modèle, sachant que plus un modèle est complexe, plus il est difficile à étudier/programmer, et que moins un modèle est fidèle à la réalité, moins les résultats sont transposables à la réalité (225). La modélisation en épidémiologie s'appuie sur des données de terrain, qui, pour la majorité, dépendent du temps (incidence, prévalence, mortalité, taux de transmission, etc.). Ces données sont des informations inestimables afin de déterminer et de valider la fidélité du modèle par rapport à la réalité (225).

2/ Les différents types de modèle en épidémiologie

Il existe plusieurs façons de caractériser un modèle épidémiologique. Une des caractéristiques majeures, notamment pour les modèles appliqués à l'échelle d'un groupe d'animaux ou d'une population localisée, est la façon de modéliser un processus sur les individus, selon qu'on tienne compte ou non de l'aléa et de la variabilité interindividuelle.

Dans les modèles déterministes, le modèle simule l'évolution moyenne du processus, et la réalisation de plusieurs simulations avec les mêmes paramètres donne les mêmes résultats. À l'inverse, un modèle stochastique simule l'évolution et la variance du processus, en imputant des probabilités d'appliquer le processus aux individus. Ainsi, un modèle stochastique repose sur de l'aléatoire, la réalisation de plusieurs simulations donne des résultats différents, et de ce fait, l'analyse de ces modèles nécessite de simuler un certain nombre de fois le même processus afin d'en étudier l'évolution moyenne et la variance. Il est plus intéressant de réaliser un modèle déterministe lorsqu'on simule un grand nombre d'individus, puisque la loi des grands nombres va faire diminuer la possibilité d'observer la variabilité d'un modèle stochastique. À l'inverse, lors de populations de petites tailles, ou pour représenter des événements rares, le modèle stochastique est plus adapté pour représenter la variabilité du processus (225). La stochasticité d'un modèle peut être due à une exposition des individus à un processus simulé aléatoire, ou à l'apparition aléatoire d'un processus dans la simulation. Le premier est une stochasticité démographique : tous les individus n'ont pas subi le processus simulé ; Le second est une stochasticité environnementale : le processus n'apparaît pas dans toutes les simulations, mais lorsqu'il est présent, tous les individus subissent le processus (225). Bien évidemment, il est possible de réaliser une combinaison des deux types de stochasticités.

Une autre caractéristique importante d'un modèle est sa façon de décrire la population. Ainsi, il existe des modèles à compartiments, où les individus sont regroupés dans des états selon leurs caractéristiques communes, et des modèles individus centrés, où chaque individu est simulé indépendamment des autres. Les modèles individus centrés nécessitent une puissance de calcul importante, car tous les calculs sont réalisés sur tous les individus, tandis qu'un modèle à compartiments applique les calculs par compartiment, nécessitant donc moins de puissance de calcul. Ainsi, dans un modèle à compartiments, on calcule des flux d'individus entre les compartiments. En épidémiologie, il est commun de considérer un grand nombre d'individus (225). Les modèles à compartiments sont donc plus adaptés et sont souvent utilisés en épidémiologie (15).

3/ Le logiciel EMULSION

EMULSION est un logiciel de programmation codé en python, qui a pour objectif de faciliter la réalisation de codes de modèles épidémiologiques avec plusieurs échelles de représentation (individus, lots, troupeaux...). Le code est écrit sous le format d'un texte structuré (en format yaml) qui se base sur la notion de langage domaine-spécifique (*domain-specific langage*, DSL), c'est-à-dire sur la création d'un langage compréhensible sans notion de programmation informatique. En effet, la syntaxe du code dans EMULSION permet une compréhension facilitée pour des scientifiques non-initiés à la programmation, facilitant ainsi la collaboration entre modélisateurs et utilisateurs, et apportant une adaptabilité plus importante des modèles, puisqu'ils sont plus facilement modifiables en direct avec les utilisateurs (226).

Le code d'EMULSION se base sur la création de diagramme de flux et la réalisation de machine à états permettant de modéliser des processus en distinguant les différents états dans lesquels les individus peuvent être. Le changement d'état des individus est modélisé par des flux (Figure 16). Ainsi, un modèle EMULSION est caractérisé par un ensemble simple de machines à états pour simuler un processus complexe. Les individus sont caractérisés par l'ensemble des états dans lesquels ils se trouvent (un état unique par machine à état par individu) (226).

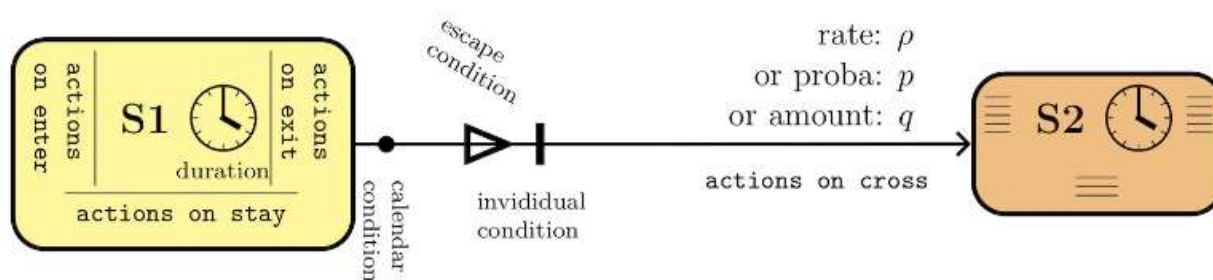


Figure 16 : Structure d'une machine à 2 états (226)

Les machines à états et les états peuvent s'appliquer soit à des compartiments, c'est-à-dire que les individus sont modélisés par groupe d'individus ayant le même état ; soit à des individus, c'est-à-dire que chaque individu présente un ensemble d'état. Dans le premier cas, les calculs s'appliquent sur des groupes, et permettent donc de diminuer la puissance de calcul nécessaire, tandis que dans le second cas, les calculs sont réalisés pour chaque individu. De plus, il existe une alternative intermédiaire, où certains états s'appliquent à des compartiments et d'autres aux individus : il s'agit de la programmation hybride (Figure 17) (226).

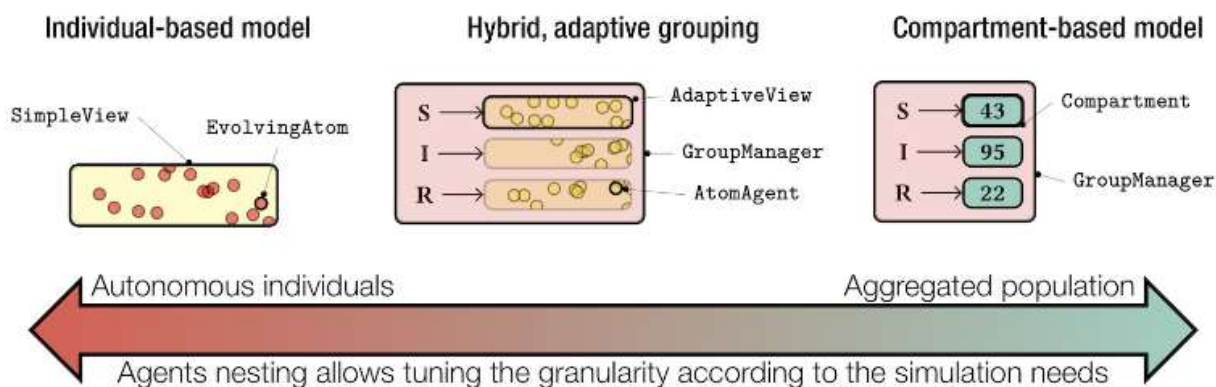


Figure 17 : Diversité des formalismes de modélisation possible avec EMULSION (226)

B) Le modèle de propagation BRDcoinfmodel

1/ Objectifs de modélisation du modèle BRDcoinfmodel

BRDcoinfmodel est un modèle épidémiologique stochastique, à compartiments, développé avec EMULSION avec une extension du code développé en python (222). Le modèle a pour objectif de simuler la propagation de deux agents pathogènes, le VRSB et *M. haemolytica*, dans un élevage de jeunes bovins à l'engraissement (JB), à l'échelle des individus, d'un lot et d'un élevage multi-lots. Dans ce modèle, l'infection par le VRSB favorise l'infection par *M. haemolytica*, afin de se rapprocher le plus possible de la notion de co-infections. L'infection des animaux par un/des agent(s) pathogène(s) induit des signes cliniques et de l'hyperthermie avec des probabilités calculées en fonction de l'immunité de l'animal (vaccination) et de(s) l'agent(s) pathogène(s) infectant. La présence de signes cliniques et d'hyperthermie induit la possibilité de détecter l'animal avec une probabilité dépendant de la spécificité d'un diagnostic clinique de la BRD. Enfin, la détection implique la mise en place d'un traitement antibiotique, qui modifie le statut infectieux d'un animal pour *M. haemolytica* avec une probabilité de réussite du traitement. Le choix des agents pathogènes a été réalisé en fonction de la bibliographie. En effet, le couple VRSB/*M. haemolytica* est le couple d'agents pathogènes le plus étudié, où l'on peut retrouver des valeurs d'infection et de propagation pour estimer les probabilités de passer d'un état à un autre.

Afin de se rapprocher de l'observation clinique sur le terrain, le pas de temps est d'une demi-journée (soit 12h). Il est théoriquement possible de réaliser une simulation sur toute la durée d'engraissement, cependant, comme vu en **Partie 1.I.B.3**, la très grande majorité des cas cliniques a lieu avant 60 à 80 jours d'engraissement (Tableau VII). Quand on lance le scénario « no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis », c'est à dire le scénario sans contrôle de la BRD hors traitements individuels, sur 100 jours, il n'y a plus d'animaux cliniques à partir de 170 steps, soit 85 jours. De plus, à partir de 170 steps, le nombre d'animaux cliniques est proche de 0 (Figure 18), il est donc inutile de simuler l'engraissement au-delà de 85 jours, puisqu'il n'y a plus d'animaux cliniques. Afin de limiter le temps de calcul, les simulations ont été donc lancées sur 170 pas de temps (85 jours).

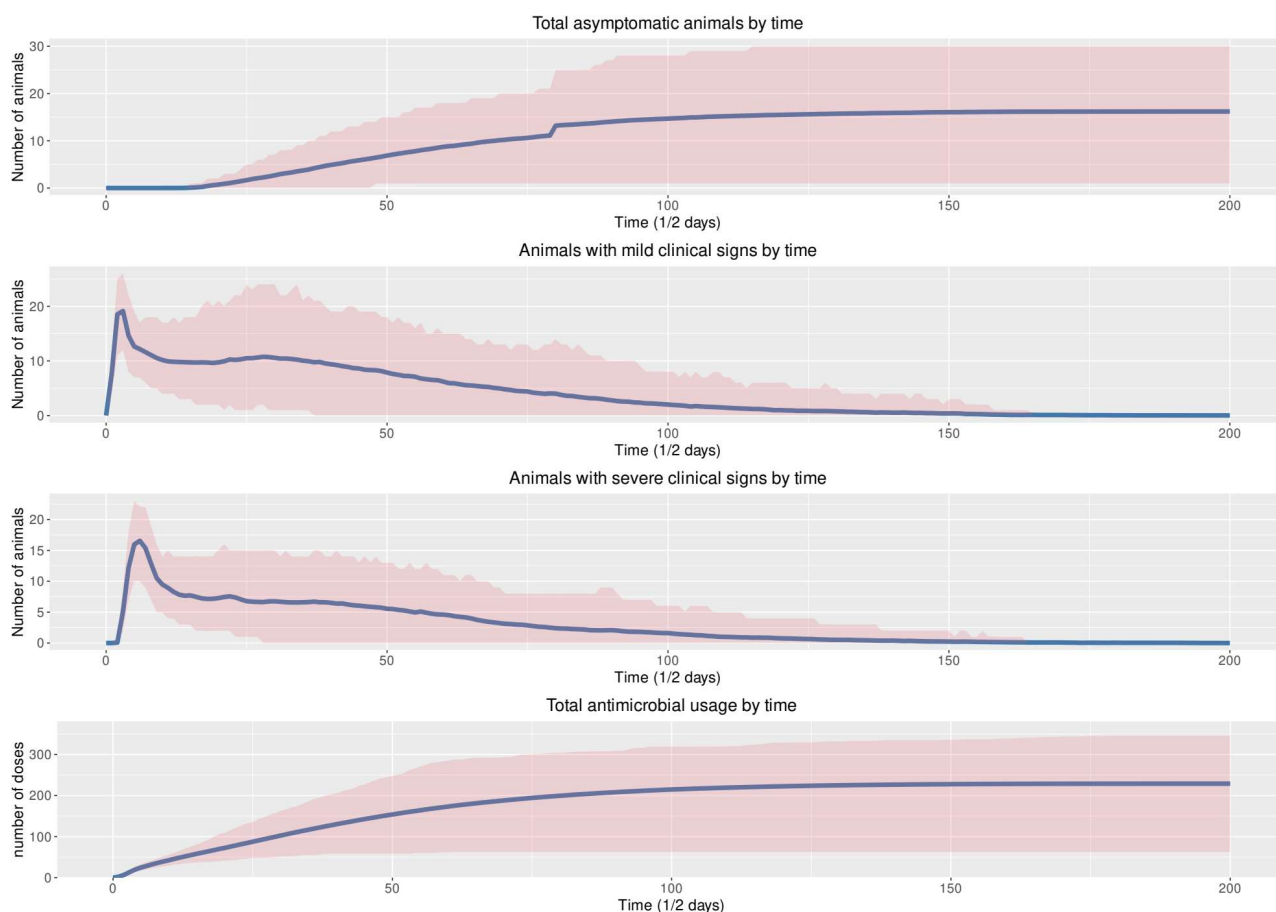


Figure 18 : Evolution dans le temps du nombre d'animaux pas statut clinique pour le scénario « no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis »

2/ Définitions des processus du modèle BRDcoinfmodel

Chaque mécanisme est simulé par des machines à états, où chaque animal peut se retrouver dans des états différents (Figure 19). Les modèles épidémiologiques les plus classiques sont les modèles SIR et SEIR avec une seule machine à état. Dans le modèle SIR, on a 3 états, l'état S pour « sensible », représentant les animaux pouvant être infectés ; l'état I pour « infecté », représentant les animaux infectés et excréant ; et l'état R pour « guéri » (recovered en anglais), représentant les animaux guéris suite à une infection. Dans le modèle SEIR, on ajoute un état E pour « exposé », représentant les animaux infectés mais n'excrétant pas le(s) agent(s) pathogène(s). Par la réalisation d'un modèle à plusieurs échelles (individu, lot, élevage), et par la création de scénarios d'initialisation de paramètres, plusieurs mécanismes peuvent être simulés (type de vaccin, temps de vaccination, réalisation d'un traitement métaphylactique). Ces mécanismes sont détaillés dans les machines à états leur correspondant le plus.

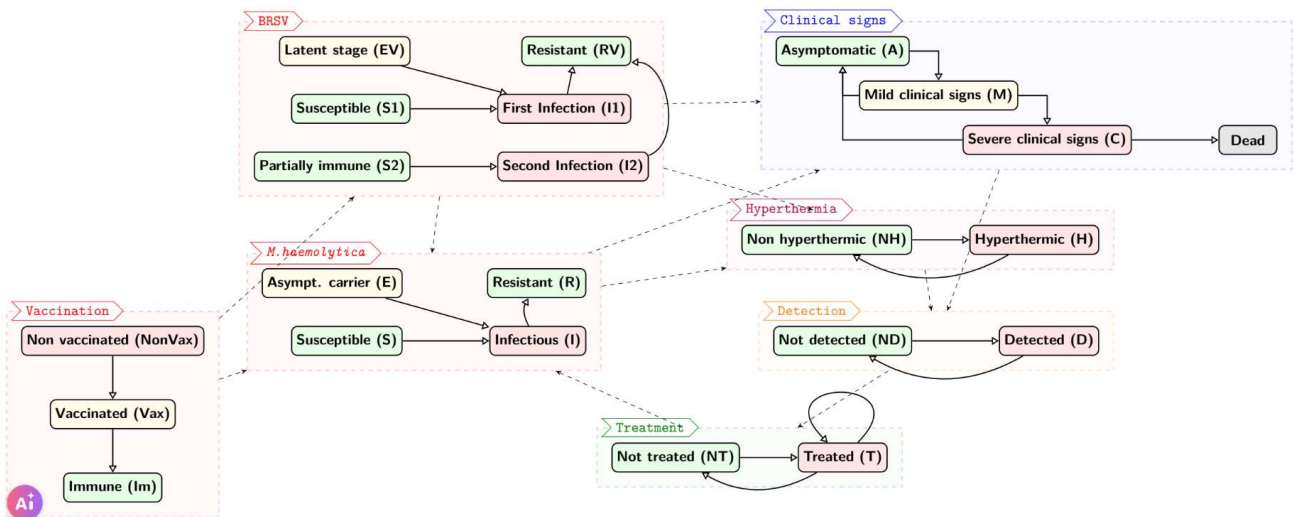


Figure 19 : Schéma simplifié des différents états du modèle BRDcoinfmodel (222)

a) La machine à états « BRSV »

La machine à états « BRSV » se base sur un modèle épidémiologique de type SEIR pour le VRSB, avec deux états sensibles différents (« Susceptible » et « Partialement immunisé »), un état latent (« Latent stage »), deux états infectieux différents (« Première infection » et « Deuxième infection ») et un état guéri (« Résistant »). La complexification par rapport au modèle type SEIR permet de prendre en compte un niveau d'immunité différent, notamment entre les animaux vaccinés ou non. Il est important de noter qu'un animal ne peut pas être infecté une seconde fois par le VRSB dans ce système, ce qui représente bien la réalité du terrain (cf **Partie 1.III.A.2**).

b) La machine à états « M. haemolytica »

La machine à états « M. haemolytica » est de type SEIR, avec un état sensible (« Susceptible »), un état latent (« Asympt. porteur »), un état infectieux (« Infectieux ») et un état guéri (« Résistant »). Comme précédemment, un animal ne peut pas être infecté une seconde fois par M. haemolytica, cela représentant aussi la réalité du terrain (cf **Partie 1.III.B.1.b**). La transition des états « Susceptible » et « Asympt. porteur » vers l'état « Infectieux » dépend du statut vaccinal dans la machine à états « Vaccination » et de l'état de l'animal dans la machine à états « BRSV ». En effet, dans ce modèle, l'infection par le VRSB augmente les probabilités d'être infecté par M. haemolytica (cf **Partie 1.I.B.2**). La transition entre l'état « Infectieux » et l'état « Résistant » est réduite en fonction de la mise en place d'un traitement dans la machine à états « Traitement ».

c) La machine à états « Vaccination »

La machine à états « Vaccination » présente trois états différents en fonction du statut vaccinal de l'animal : l'état « Non vacciné » décrit les animaux non vaccinés, l'état « Vacciné » décrit les animaux vaccinés mais n'ayant pas développé d'immunité (c'est un état

transitoire), et l'état « Immune » qui décrit les animaux ayant développé une immunité après vaccination. Dans ce modèle, par soucis de simplification, les animaux vaccinés développent systématiquement une immunité 15 jours après la dernière injection du vaccin (cf **Partie 1.V.A.2**).

Les transitions et les conditions initiales dépendent du type de vaccin utilisé et du moment de la réalisation de la vaccination. Le modèle différencie les vaccins monovalents, qui induisent une immunité contre le VRSB uniquement, des vaccins divalents, qui induisent une immunité contre le VRSB et *M. haemolytica*. De plus, la réalisation de la vaccination avant l'achat (dans l'élevage naisseur) permet à l'élevage engraisseur de recevoir des animaux déjà immunisés, tandis que lors de la vaccination à l'arrivée des animaux à l'engraissement, les animaux sont vaccinés dans les premiers jours de l'engraissement et passent donc par l'état transitoire « Vaccinated » pour tenir compte du délai avant la mise en place de l'immunité.

d) La machine à états « Clinical signs »

La machine à états « Clinical signs » présente le niveau de signes cliniques développé par les animaux infectés par le VRSB et/ou *M. haemolytica*, en dehors de l'hyperthermie. Les animaux peuvent être asymptomatiques (« Asymptomatic »), ou déclarer des signes cliniques modérés (« Mild clinical signs » abrégé en Mild), des signes cliniques forts (« Severe clinical signs » abrégé en C), ou mourir (« Dead »). Il est important de noter qu'un animal ne peut mourir que s'il a présenté des signes cliniques forts, et ne peut développer des signes cliniques forts que s'il a développé des signes cliniques modérés auparavant. Le développement de signes cliniques dépend aussi du statut vaccinal de l'animal, mais ne dépend pas directement de la mise en place d'un traitement. En effet, la mise en place d'un traitement modifie les probabilités de guérir, c'est-à-dire de passer à l'état « Resistant » des machines à états « BRSV » et « *M. haemolytica* ». Ce passage entraîne le passage à l'état « Asymptomatic ». Cette classification des signes cliniques est fréquente dans les études de terrain (cf **Partie 1.IV.A**).

e) La machine à états « Hyperthermia »

La machine à états « Hyperthermia » décrit la présence d'hyperthermie lors d'infection avec un état « Non hyperthermic » pour les animaux normothermes, et un état « Hyperthermic » pour les animaux fiévreux. Comme pour la précédente machine à états, elle dépend du statut infectieux des animaux, et ne dépend pas directement du statut vaccinal ni des traitements réalisés. La machine à états « Hyperthermia » est indépendante de la machine à états « Clinical signs », et permet de pouvoir prendre en compte des faux-positifs, c'est-à-dire des animaux développant de l'hyperthermie non liée à une infection respiratoire.

f) La machine à états « Detection »

La machine à états « Detection » décrit la capacité de détection de l'infection des animaux à partir des machines à états « Clinical signs » et « Hyperthermia ». Les animaux peuvent ne pas être détectés (« Not detected »), ou détectés (« Detected »). Les animaux qui restent dans l'état « Not

detected » pendant une infection correspondent aux animaux asymptomatiques sur le terrain, et sont comptés par la variable *cumulative_nb_cases_missed*. Dans la suite de la thèse, les animaux dit asymptomatiques font références aux animaux non détectés (abrégé en missed). En effet, cette variable prend tous les animaux qui restent dans l'état « Asymptomatic » de la machine à états « Clinical signs », et une partie des animaux de l'état « Mild clinical signs » en fonction de la sensibilité du diagnostic clinique (cf **Partie 1.IV.A**). Les animaux de l'état « Severe clinical signs » sont supposés obligatoirement détectés.

Lorsque les animaux présentent seulement de l'hyperthermie, ils peuvent passer de l'état « Undetected » à l'état « Detected » malgré l'absence d'infection respiratoire. Même si ce phénomène de faux positif est possible, il est extrêmement rare.

g) La machine à états « Treatment »

La machine à états « Treatment » décrit la mise en place d'un traitement. Ainsi, les animaux peuvent ne pas être traités (« Not treated ») ou être traités contre les BRD (« Treated »). Dans le modèle, les traitements correspondent à la mise en place d'un traitement antibiotique avec un spectre incluant *M. haemolytica* (Annexe 9). Sur le terrain, d'autres médicaments sont utilisés, mais les études sont controversées sur leur intérêt (cf **Partie 1.V.B.1**). Les animaux peuvent recevoir jusqu'à trois traitements individuels différents.

De plus, il est possible d'avoir des traitements métaphylactiques à condition d'avoir 10 % d'incidence dans le lot en 24h, un critère décrit dans la bibliographie (215). Dans ce cas, tous les animaux reçoivent un traitement, ce qui modifie les flux de transitions des machines à états « BRSV » et « *M. haemolytica* ».

3/ Entrées et sorties du modèle BRDcoinfmodel

a) Entrées du modèle BRDcoinfmodel

BRDcoinfmodel étant réalisé sur EMULSION, tous les paramètres peuvent être modifiés en entrée du modèle. Ainsi, le nombre d'animaux par lot et le nombre de lots peuvent être choisis, ou le nombre de pas de temps de la simulation. Les paramètres d'entrée utilisés correspondent aux paramètres modifiés par les scénarios (définis en **Partie 2.C.2.b**), résumés dans le Tableau XXII.

b) Sorties du modèle BRDcoinfmodel

Les sorties de BRDcoinfmodel sont facilement modulables en fonction des besoins, à condition que les variables nécessaires existent. Les sorties sont regroupées dans un tableur de format csv, comprenant 40 colonnes (soit 40 variables de sortie). Ces sorties correspondent aux variables ergonomiques (qui permettent de comprendre le document), aux variables d'états, et aux variables d'intérêts, résumées dans le Tableau XXIII.

Tableau XXII : Paramètres d'entrées modifiés avec les composants de scénario du modèle BRDcoinfmodel

different_vax		coverage		batch_composition		metaphylaxis_use	
Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
divalent_vax	0 ou 1	coverage	0,1 à 1 avec un pas de 0,1	sorted_batches	0 ou 1	use_metaphylaxis_batch	0 ou 1
vax_at_purchase	0 ou 1						
vax_on_arrivage	0 ou 1						

Tableau XXIII : Variables de sorties dans le tableur csv du modèle BRDcoinfmodel

Variables d'ergonomie	Variables d'état			Variables d'intérêt	
simu_id	S	IMH	C	metapop_nb_doses	Metapop_cumulative_Mild
level	R	EMH	Dead	metapop_nb_doses_metaphylaxis	metapop_nb_cases_missed
agent_id	S2	Immune	U	metapop_nb_doses_indiv	metapop_cumulative_vax
population_id	I1	Vax	D	metapop_total_C	batch_size
scénario_name	I2	NonVax	NT	metapop_total_Mild	number_batches
simulation_name	E	H	T	Metapop_cumulative_C	total_population
	SMH	A			
	RMH	MildC			

C) Adaptation du modèle à une application de développement d'outils ergonomiques

1/ Le logiciel PASTE

Le logiciel PASTE (pour Platform for Automated Simulation and Tools in Epidemiology) est un logiciel développé par l'équipe DYNAMO et publié en 2024 (223). L'objectif est de faciliter la création d'une application web permettant à des non-initiés (comme des vétérinaires, des éleveurs...) d'afficher des résultats d'un modèle épidémiologique existant, et ainsi, aider à créer des outils d'aide à la décision. Ainsi, PASTE facilite la répartition des tâches entre modélisateurs, développeurs d'outils web d'aide à la décision avec PASTE et utilisateurs finaux de l'outil. Pour ce faire, le développeur de l'outil doit coder dans un fichier texte (de format yaml) un code simplifié (explicité en **Partie 2.II.B**), qui permettra au logiciel PASTE de créer tous les documents et fichiers nécessaires à la création d'une application web, ainsi que de réaliser des calculs statistiques et l'affichage de graphiques. Comme pour EMULSION, ce code mobilise la notion de langage domaine-spécifique (DSL), c'est-à-dire la création d'un langage de code compréhensible sans notion de code (223).

Le modèle épidémiologique à indiquer dans le code et les fichiers de PASTE doivent être dans un format compatible avec EMULSION. Le logiciel PASTE produit ensuite le code pour générer un formulaire web, puis génère à partir du code yaml la liste des scénarios, un formulaire de choix des scénarios à simuler, un code R qui calcule les statistiques sur les résultats de modélisation et enfin un autre code R qui crée les graphes à afficher dans la page web (Figure 20).

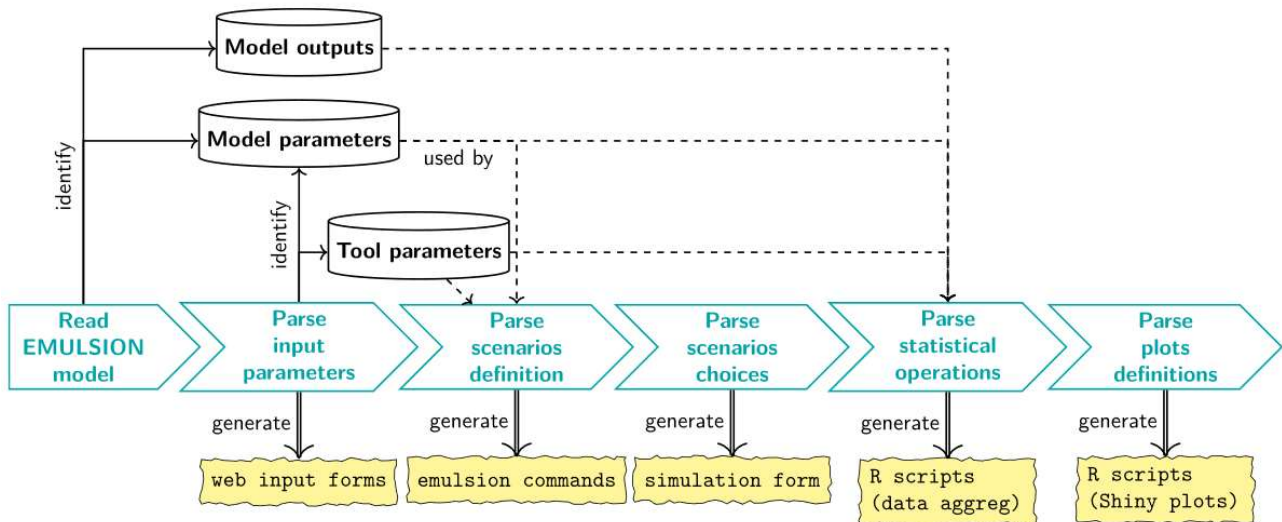


Figure 20 : Vue d'ensemble des étapes successives de création des fichiers par PASTE (223)

Il existe trois limites identifiées à l'utilisation de PASTE :

- La première concerne les performances de calcul du logiciel, étant donné que PASTE crée automatiquement des fichiers, afin d'inclure toutes les possibilités d'utilisation, l'outil ne peut pas être optimisé autant qu'un logiciel créé sur mesure. Ainsi, pour des modèles complexes, le temps de production des résultats peut être long. Pour BRDcoinformodel, 50 simulations d'un unique scénario sont réalisées en moyenne en 45 minutes sur un ordinateur portable dédié.

- La deuxième limite concerne le format yaml, qui nécessite une syntaxe précise, qui peut être à l'origine de nombreuses erreurs. De plus, avec le nombre de fichiers créés et les différents langages de programmation utilisés (EMULSION, Python, R, Django, shiny) il est difficile d'identifier la source des erreurs.

- La troisième limite concerne le format du modèle, qui doit être développé sous EMULSION, un langage récent. Il est possible d'utiliser un modèle codé dans un autre langage, mais cela nécessite de spécifier la syntaxe du langage, et donc des connaissances informatiques plus poussées.

2/ Création du code yaml de PASTE afin de réaliser les simulations

a) Structure du code yaml de PASTE

La structure du code est détaillée dans la Figure 21. La partie « Définitions du projet » permet de donner un nom à l'application et au projet, de déterminer la localisation des fichiers, et le langage du modèle. La partie « Création des paramètres utilisateurs » permet de créer des variables

et de les initialiser dans PASTE. Elles pourront ensuite être utilisées pour calculer les statistiques. La partie « Création des composants de scénario » permet de modifier les valeurs des paramètres d'entrée du modèle EMULSION. Dans la partie « Création des scénarios », on crée des scénarios en faisant la combinaison des composants de scénario renseignés avant (cf **Partie 2.II.B.2**). La partie « Création des formulaires » permet de créer les formulaires web qui permettront aux futurs utilisateurs de l'outil web de modifier les valeurs des paramètres choisis pour être flexibles (qu'ils soient de PASTE ou en entrée de BRDcoinfmodel). Enfin, dans la partie « Calculs statistiques », on crée et calcule des statistiques, que l'on peut ensuite faire afficher avec la partie « Création des graphiques ». Le calcul des statistiques et l'affichage des graphiques sont réalisés en créant des fichiers R à partir du code yaml de ces deux parties.

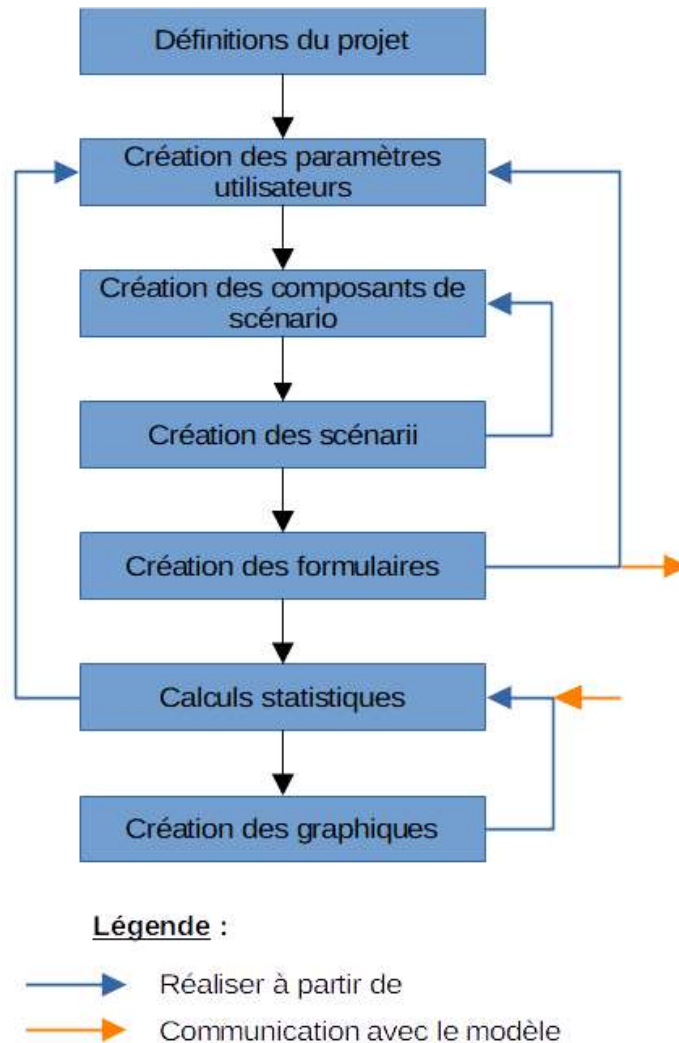


Figure 21 : Structure du code yaml de PASTE

b) Définitions des scénarios

En collaboration avec Baptiste Sorin-Dupont, nous avons choisi les scénarios, qu'il a créé dans un fichier texte puis intégré dans son modèle. Cependant, la création de scénario est aussi prévue dans le code PASTE. J'ai donc traduit les 176 scénarios en quatre composants de scénario afin de recréer les différents scénarios directement dans PASTE.

Le premier composant est « different_vax » (Figure 22) qui correspond aux vaccins et aux différents temps de vaccination possibles. Ce composant est réparti en cinq sous-composants, qui sont : une vaccination avec un vaccin divalent réalisée soit à l'arrivée dans l'élevage engraisseur (« divalent_vax_on_arrivage »), soit avant l'achat (« divalent_vax_at_purchase ») ; une vaccination avec un vaccin monovalent, réalisée soit à l'arrivée dans l'élevage (« monovalent_vax_on_arrivage »), soit avant l'achat (« monovalent_vax_at_purchase ») ; ou sans vaccination (« no_vax »).

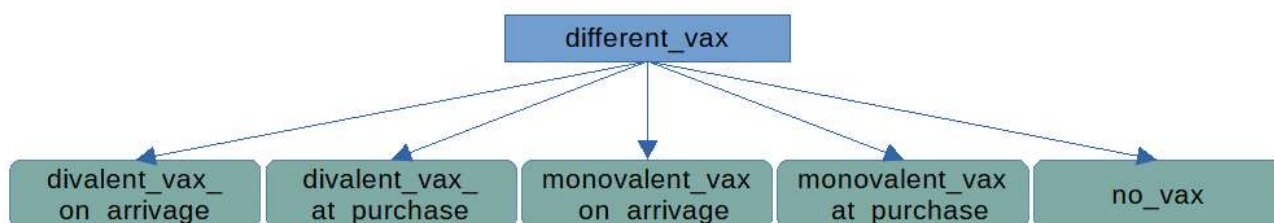


Figure 22 : Définitions du composant « different_vax » et de ses sous-composants

Le deuxième composant est « coverage » (Figure 23) qui correspond à la couverture vaccinale dans les lots, dont les sous-composants varient de 10 % à 100 % avec un pas de 10 % (soit 11 sous-composants différents, nommés « coverage_1 », ou « coverage_0X » pour des couvertures de 100 % et X dizaine(s) de %).

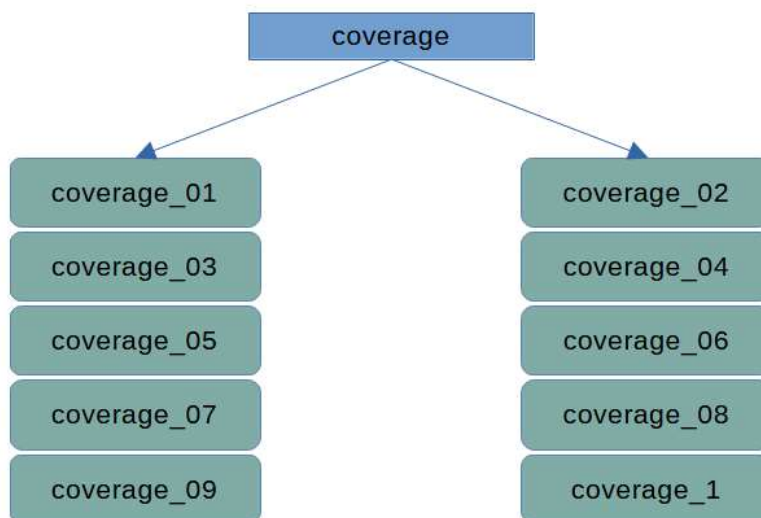


Figure 23 : Définitions du composant « coverage » et de ses sous-composants

Le troisième composant est « batch_composition » (Figure 24) qui correspond à la méthode de composition des lots, qui sont soit triés en fonction du statut vaccinal des animaux, c'est-à-dire que l'on regroupe les animaux vaccinés entre eux (« sorted_batches »), soit répartis aléatoirement (« mixed_batches »).

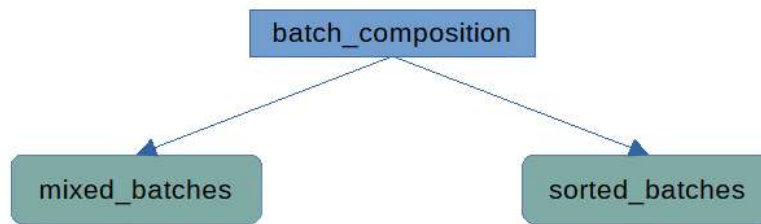


Figure 24 : Définitions du composant « batch_composition » et de ses sous-composants

Le dernier composant est « metaphylaxis_use » (Figure 25) qui correspond à la possibilité d'utiliser un traitement métaphylactique si l'incidence est supérieure à 10 % en 24h dans la simulation (« metaphylaxis ») ou non (« no_metaphylaxis »).

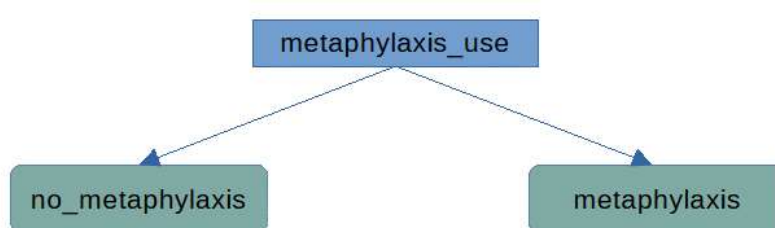


Figure 25 : Définitions du composant « metaphylaxis_use » et de ses sous-composants

Ainsi, en faisant la combinaison des sous-composants de chaque composant entre eux, on obtient 176 scénarios, avec cependant des scénarios non désirés. En effet, réaliser des scénarios avec le sous-composant « no_vax » et des variations de couverture vaccinale n'a pas de sens. Pour corriger ce point, j'ai réalisé des combinaisons entre les quatre autres sous composants de « different_vax » avec « coverage », « batches_composition » et « metaphylaxis_use » ; et une combinaison avec le sous-composant « no_vax » et les composants « batches_composition » et « metaphylaxis-use ». Ainsi, j'obtiens 164 scénarios uniques, choisis en accord avec Baptiste Sorin-Dupont, nommés par tous les sous-composants utilisés séparés par un tiret bas (« _ »). On obtient donc le scénario « divalent_vax_on_arrivage_coverage_05_mixed_batches_metaphylaxis » pour la simulation où on utilise un vaccin divalent à l'arrivée des animaux dans l'élevage, avec une couverture vaccinale de 50 % dans les lots, des lots mélangés et la possibilité d'utiliser un traitement métaphylactique. Dans le cas du sous-composant « no_vax », les scénarios n'ont pas de composant « coverage », on obtient donc le scénario « no_vax_mixed_batches_metaphylaxis » pour la simulation sans vaccination avec des lots mélangés et la possibilité de réaliser un traitement métaphylactique (Figure 26).

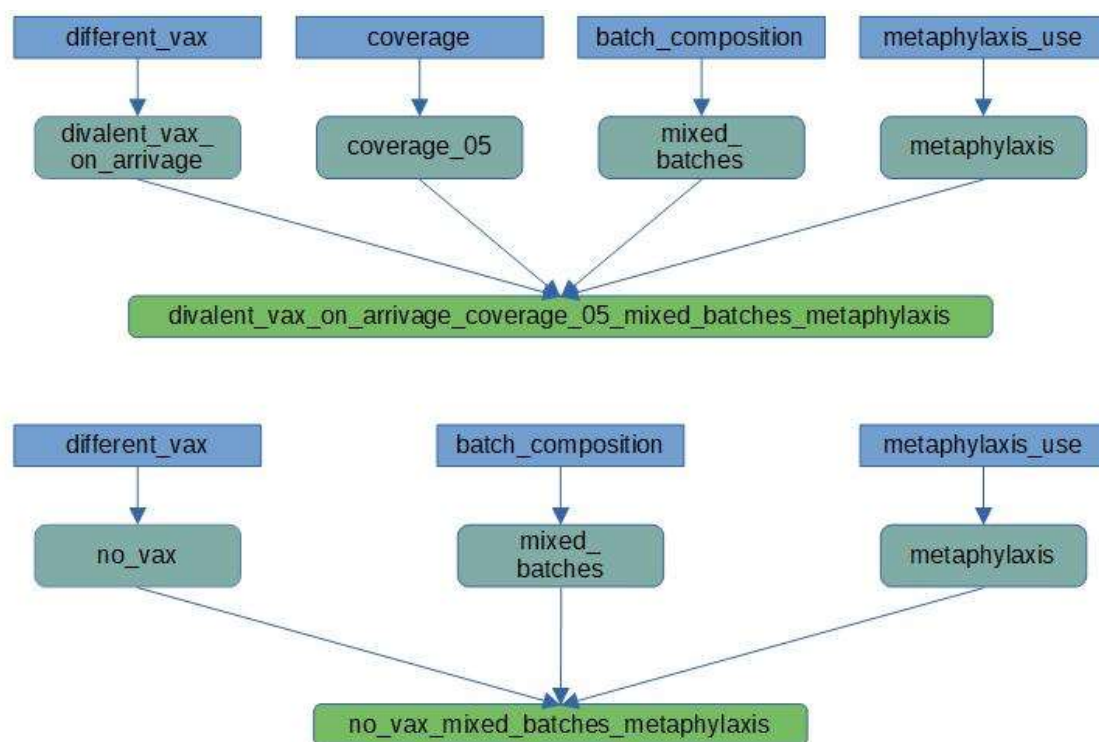


Figure 26 : Création du nom d'un scénario à partir des composants de scénario

3/ Calculs économiques sur les sorties du modèles BRDcoinfmodel

Pour comparer les différents scénarios sur la base de critères financiers, j'ai réalisé des calculs économiques afin de connaître le résultat net par simulation à la fin de l'engraissement des JB. Le résultat net est égal à la somme des gains (ventes à l'abattoir) moins la somme des coûts (achats des broutards, coûts de production, coûts des traitements et coûts du travail). Tous les chiffres évoqués sont déflatés sur l'année 2015, afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec les autres études.

a) Prix d'achats des broutards

Le prix d'achat des broutards ne varie pas en fonction des simulations. En effet, nous considérons qu'à chaque début de simulation nous avons le même nombre d'individus dans l'élevage. Ainsi, le prix d'achat des broutards dépend du nombre d'animaux achetés ($batch_size \times number_batches$) et du prix d'achat d'un broutard ($cost_purchase_calf$) (Eq. 1). Le prix d'achat d'un broutard peut être directement rempli par l'utilisateur. La valeur de base choisie est de 1184,84 €¹ par broutard, prix mis en avant dans l'élevage type d'engraisers charolais de Bretagne publié par Inosys réseaux d'élevage. De même, le nombre d'animaux par lot et le nombre de lots peuvent être choisis par l'utilisateur. Les valeurs de base sont de 20 et 9, respectivement, afin d'obtenir un engraissement de 180 JB, valeur du nombre de JB par engraissement de l'élevage type présenté précédemment (86).

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

J'ai fait le choix de ne pas prendre en compte la valorisation de la vaccination chez les broutards, comme vu en **Partie 1.II.F**. En effet, cette valorisation est calculée par rapport aux coûts nécessaire pour produire un broutard avec peu de risque individuel, c'est à dire vacciné contre la BRD et déparasité (124). Ainsi, on pourra observer la différence de résultat entre les broutards achetés vaccinés et les broutards non vaccinés, et en déduire un prix de valorisation maximum.

(1)

$$\text{purchase_cost} = \text{batch_size} \times \text{number_batches} \times \text{cost_purchase_calf}$$

b) Coûts de l'alimentation des JB

Le coût de production d'un animal dépend principalement de l'alimentation, de l'énergie et du bâtiment. Ne voulant pas calculer le résultat brut de l'élevage, je ne prends pas en compte le coût de l'énergie et du bâtiment. Ainsi, le coût de production est approximé par le coût de l'alimentation des JB (Eq. 2). D'après l'élevage type d'engraisers charolais de Bretagne publié par Inosys réseaux d'élevage, le coût de l'alimentation d'un tel élevage est de 0,90 €/kg de poids vif produit (86). Pour calculer le poids vif produit en engraissement, il faut multiplier le gain moyen quotidien (GMQ) de l'animal avec la durée d'engraisement (DE). Pour des charolais sains, le GMQ est de 1388 g/j (*healthy_ADG*) dans l'élevage type de Inosys réseaux d'élevage, avec une DE que l'on peut estimer à 277 jours (calcul explicité en Annexe 10) (86).

La décroissance du GMQ en fonction du statut respiratoire a été calculée par Blakebrough-Hall et al. sur des JB charolais, et ils ont trouvé qu'un animal sub-clinique perd 200g/j du GMQ et qu'un animal clinique perd 400 g/j. J'ai supposé qu'un animal avec des signes cliniques sévères perdrait 600 g/j. Cependant, dans cette étude, les animaux ont un GMQ bien supérieur (1800 g/j >> 1388 g/j) à celui provenant de l'élevage type français (8,86). Afin de limiter l'impact de cette différence, j'ai fait en sorte que la diminution du GMQ soit proportionnelle au GMQ de l'animal sain. Ainsi, pour un animal sain de 1388g/j (*healthy_ADG*), un animal sub-clinique a une diminution du GMQ de 154 g/j (*missed_decreased_ADG*), un animal clinique une diminution de 308 g/j (*Mild_decreased_ADG*) et un animal clinique sévère de 463 g/j (*C_decreased_ADG*) (calcul explicité en Annexe 11).

Lors de mes calculs économiques, je fais l'hypothèse que la décroissance du GMQ ne dépend que du statut clinique de l'animal (nommés healthy, Mild, C et missed dans l'analyse économique). Ainsi, la réalisation de la vaccination ou de traitements métaphylactiques n'a pas d'influence directe sur les calculs de poids des animaux. Guthrie et al. ont montré une différence significative du GMQ entre des animaux sains ayant reçu un traitement métaphylactique et des animaux malades ayant reçu un traitement métaphylactique (différence de 0,086 kg/j à 102 jours d'engraisement) (219). Cette diminution du GMQ malgré un traitement métaphylactique laisse penser que la diminution du GMQ ne dépend pas du traitement métaphylactique, mais du statut clinique de l'animal. Cependant, pour vérifier parfaitement cette hypothèse, il faudrait, dans un échantillon où on arrive à montrer une différence du GMQ, vérifier qu'il existe une différence du GMQ significative en fonction du statut clinique, que l'animal ait été vacciné ou non, et que l'animal ait reçu un traitement métaphylactique ou non.

1 Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

Pour calculer le nombre d'animaux sains, il faut prendre la totalité des animaux et y soustraire le nombre d'animaux malades. Comme tous les animaux malades passent obligatoirement par l'état Mild de la machine à états « Clinical signs » (cf **Partie 2.B.2.d**), je soustrais au total des animaux le nombre cumulé d'animaux passés par cet état. De même, pour le calcul de *weight_gain_Mild*, je calcule le nombre d'animaux ayant eu un état Mild, sans aggravation en état C, et sans prendre en compte les animaux de l'état missed.

(2)

$$\begin{aligned}
 \text{weight_gain_healthy} &= (\text{total_population}_{\text{MAX.STEP}} - \text{metapop_cumulative_Mild}) \\
 &\quad \times (\text{healthy_ADG} \times \text{DOF} \times 0,001) \\
 \text{weight_gain_Mild} &= (\text{metapop_cumulative_Mild} - \text{metapop_cumulative_C} - \text{metapop_nb_cases_missed}) \\
 &\quad \times ((\text{healthy_ADG} - \text{Mild_decreased_ADG}) \times \text{DOF} \times 0,001) \\
 \text{weight_gain_C} &= \text{metapop_cumulative_C} \\
 &\quad \times ((\text{healthy_ADG} - \text{C_decreased_ADG}) \times \text{DOF} \times 0,001) \\
 \text{weight_gain_missed} &= \text{metapop_nb_cases_missed} \\
 &\quad \times ((\text{healthy_ADG} - \text{missed_decreased_ADG}) \times \text{DOF} \times 0,001) \\
 \text{feeding_cost} &= (\text{weight_gain_healthy} + \text{weight_gain_Mild} + \text{weight_gain_C} + \text{weight_gain_missed}) \times \text{feed_cost_per_kg}
 \end{aligned}$$

Légende : nombre d'animaux/catégorie × poids gagné pendant l'engraissement

c) Gain des ventes des JB à l'abattoir

Le gain réalisé lors de la vente en abattoir des JB dépendent du poids de carcasse de l'animal et de sa qualité de conformation. La qualité de conformation varie entre une qualité U et une qualité R. Le prix au kilogramme d'une carcasse de qualité U de JB est de 5,41 €/kg (*slaughter_price_U*), et celle de qualité R de 5,27 €/kg (*slaughter_price_R*) (cf. **Partie 1.II.B**, Tableau X) (92). La proportion d'animaux avec une conformation de carcasse R a été calculée à partir des résultats de la thèse de Joly, comme explicité en Annexe 4 (12). Ainsi, je trouve des carcasses de conformation R chez 20 % des animaux sains (*proportion_conformation_R_healthy*), 30 % des animaux sub-cliniques (*proportion_conformation_R_missed*), 60 % des animaux avec une clinique modérée (*proportion_conformation_R_Mild*) et 100 % des animaux avec une clinique sévère (*proportion_conformation_R_C*). Les calculs de poids vifs sont similaires à ceux réalisés pour le calcul du coût de l'alimentation, si ce n'est qu'il faut rajouter le poids de l'animal à l'achat (*weight_purchase*) (Eq. 3). D'après l'élevage type de Inosys réseaux d'élevage, le poids moyen d'achat d'un broutard charolais est de 330 kg (86). Enfin, afin de convertir le poids vif en poids de carcasse, il faut utiliser le rendement de carcasse (*carcass_yield*), qui est de 58 % (57 à 59%) chez les JB charolais d'après la présentation d'Idele au GAV2019 (227). Ainsi, on peut réaliser les calculs de vente en abattoir pour chaque statut clinique d'animaux, et donc en faire la somme dans *selling_cost*.

1 Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

(3)

$$\begin{aligned}
\text{healthy_selling} &= (\text{total_population}_{\text{MAX.STEP}} - \text{metapop_cumulative_Mild}) \\
&\quad \times (\text{healthy_ADG} \times \text{DOF} \times 0,001 + \text{weight_purchase}) \times \text{carcass_yield} \\
&\quad \times (\text{proportion_conformation_R_healthy} (\text{slaughter_price_R} - \text{slaughter_price_U}) + \text{slaughter_price_U}) \\
\text{Mild_selling} &= \text{metapop_cumulative_Mild} - \text{metapop_cumulative_C} - \text{cumulative_nb_missed} \\
&\quad \times ((\text{healthy_ADG} - \text{Mild_decreased_ADG}) \times \text{DOF} \times 0,001 + \text{weight_purchase}) \times \text{carcass_yield} \\
&\quad \times (\text{proportion_conformation_R_Mild} (\text{slaughter_price_R} - \text{slaughter_price_U}) + \text{slaughter_price_U}) \\
\text{C_selling} &= \text{metapop_cumulative_C} \\
&\quad \times ((\text{healthy_ADG} - \text{C_decreased_ADG}) \times \text{DOF} \times 0,001 + \text{weight_purchase}) \times \text{carcass_yield} \\
&\quad \times (\text{proportion_conformation_R_C} (\text{slaughter_price_R} - \text{slaughter_price_U}) + \text{slaughter_price_U}) \\
\text{missed_selling} &= \text{metapop_nb_cases_missed} \\
&\quad \times ((\text{healthy_ADG} - \text{missed_decreased_ADG}) \times \text{DOF} \times 0,001 + \text{weight_purchase}) \times \text{carcass_yield} \\
&\quad \times (\text{proportion_conformation_R_missed} (\text{slaughter_price_R} - \text{slaughter_price_U}) + \text{slaughter_price_U}) \\
\text{selling_cost} &= \text{healthy_selling} + \text{Mild_selling} + \text{C_selling} + \text{missed_selling}
\end{aligned}$$

Légende : nombre d' animaux_{catégorie} × poids de carcasse_{catégorie} × prix au kg de viande_{catégorie}

d) Coûts des traitements

Le coût des traitements dépend du nombre de traitements utilisés pendant la simulation et du coût d'un traitement (Eq. 4). Le nombre de traitements utilisés est une variable de sortie de BRDcoinfmodel. Dans le cas des vaccins, j'ai multiplié par 2 le nombre de vaccins pour représenter un vaccin nécessitant 2 injections. La variable *metapop_cumulative_vax* compte le nombre de vaccins réalisés dans l'élevage engraisseur, donc seulement dans les scénarios *vax_on_arrival*. Pour le coût des traitements, je me suis appuyé sur ma synthèse bibliographique réalisée en **Partie 1.II**, dans les tableaux XI, XII et XIII. Ainsi, pour le coût d'un traitement individuel (*cost_of_antibiotic_dose*), j'ai choisi 13 €¹, pour le coût du traitement métaphylactique par tête (*cost_of_meta_per_head*), j'ai choisi 13 €¹, et pour le coût d'une dose de vaccin (*cost_of_vax_dose*), j'ai choisi 3 €¹. La somme des trois types de traitements différents (individuel, métaphylactique et vaccin) est réalisée dans *treatments_cost*.

(4)

$$\begin{aligned}
\text{individual_cost} &= \text{metapop_nb_doses_indiv} \times \text{cost_of_antibiotic_dose} \\
\text{meta_cost} &= \text{metapop_nb_doses_metaphylaxis} \times \text{cost_of_meta_per_head} \\
\text{vax_cost} &= 2 \times \text{metapop_cumulative_vax} \times \text{cost_of_vax_dose} \\
\text{treatments_cost} &= \text{individual_cost} + \text{meta_cost} + \text{vax_cost}
\end{aligned}$$

Légende : nombre de dose × coût de la dose

e) Coûts du travail

J'ai choisi d'avoir deux façons différentes de représenter le coût du travail, en représentant en heure le temps total du travail induit par les BRD (*total_labor*) et en représentant en euro le temps total du travail induit par les BRD (*labor_cost*). Le temps de travail induit par les BRD est le temps passé à réaliser les différents traitements. Ainsi, le temps passé à réaliser les traitements

1 Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

individuels (*treatment_labor*) dépend du nombre de traitements individuels et du temps pour réaliser un traitement individuel (*time_to_treat*), estimé à 40 min par animal en se basant sur les valeurs des génisses du sondage réalisé par Wang et al (Eq. 5). Cependant, il s'agit d'un temps très variable en élevage, dépendant des moyens de contention disponibles. Le même raisonnement est applicable pour le temps passé à réaliser la vaccination (*vax_labor*), avec un temps pour réaliser la vaccination (*time_to_vax*) estimé à 7 min/animal (98). Pour le temps de travail passé à réaliser les traitements métaphylactiques, n'ayant pas trouvé de valeur dans la bibliographie, j'ai découpé le temps en 4 parties : le temps pour trier les animaux, le temps pour regrouper les animaux, le temps de préparation des produits métaphylactiques et le temps d'injection. J'ai ainsi calculé le temps pour réaliser un traitement métaphylactique (*time_to_meta*) (Eq. 6) en assimilant les temps de tris, rassemblement et administration au temps de vaccination des vaches développés dans l'article (98) ; et en assimilant le temps d'injection du temps de traitement individuel chez les veaux. Chaque temps est ajusté par rapport à leur proportion respective. En arrondissant, on obtient un temps pour réaliser un traitement métaphylactique de 13 min/animal. Je réalise la somme des trois modalités de traitements en convertissant le temps en heure dans *total_labor*, et je multiplie par un facteur de coût du temps (*cost_of_time*) dans *labor_cost*. Ce facteur de coût du temps est choisi, comme dans la plupart des articles bibliographiques prenant en compte le temps du travail (99), par rapport au coût horaire brut minimum d'un salarié en élevage. En France, la Convention Collective Nationale Agricole au 1^{er} Janvier 2024 est de 11,65€ au palier 1, soit 9,94 €¹ (228).

(5)

$$\begin{aligned}
 \text{treatment_labor} &= \text{metapop_nb_doses_indiv} \times \text{time_to_treat} \\
 \text{meta_labor} &= \text{metapop_nb_doses_metaphylaxis} \times \text{time_to_meta} \\
 \text{vax_labor} &= 2 \times \text{metapop_cumulative_vax} \times \text{time_to_vax} \\
 \text{total_labor} &= \frac{\text{treatment_labor} + \text{meta_labor} + \text{vax_labor}}{60} \\
 \text{labor_cost} &= \text{total_labor} \times \text{cost_of_time}
 \end{aligned}$$

Légende : nombre de dose × temps nécessaire pour administrer une dose

(6)

$$\begin{aligned}
 \text{time_to_meta_brut} &= \text{time_to_vax} \times \text{proportion}_{\text{sorting}} + \text{time_to_vax} \times \text{proportion}_{\text{gathering}} \\
 &\quad + \text{time_to_vax} \times \text{proportion}_{\text{preparing}} + \text{time_to_treat} \times \text{proportion}_{\text{administrating}} \\
 \text{time_to_meta} &= \frac{\text{time_to_meta_brut}}{(\text{proportion}_{\text{sorting}} + \text{proportion}_{\text{gathering}} + \text{proportion}_{\text{preparing}} + \text{proportion}_{\text{administrating}})}
 \end{aligned}$$

Avec :

- proportion_x : Proportion du temps passé pour réaliser l' action X
- *sorting* : Temps passé à trier les animaux
- *gathering* : Temps passé à rassembler les animaux
- *preparing* : Temps passé à préparer les traitements
- *administrating* : Temps passé à réaliser les injections

D'après Wang et al . 2018

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

f) Résultats nets

Le calcul des résultats nets se fait sur une période d'engraissement, et ne correspond donc pas au résultat de l'élevage. En effet, je ne prends pas en compte le coût de l'énergie, du bâtiment, des aides de la politique agricole commune (PAC) ou d'autres coûts/gains au niveau de l'élevage. Le résultat net peut s'exprimer en prenant en compte le coût du travail (*net_gain*), qui n'est pas un coût effectif, ou sans (*net_gain_without_labor*), en faisant la somme des gains et des coûts précédemment expliqués (Eq. 7).

(7)

$$\begin{aligned} \text{net_gain} &= \text{selling_cost} - \text{purchase_cost} - \text{feeding_cost} - \text{treatments_cost} - \text{labor_cost} \\ \text{net_gain_without_labor_cost} &= \text{selling_cost} - \text{purchase_cost} - \text{feeding_cost} - \text{treatments_cost} \\ \text{purchase_proportion_cost} &= \frac{\text{purchase_cost}}{\text{net_gain}} \times 100 \\ \text{feeding_proportion_cost} &= \frac{\text{feeding_cost}}{\text{net_gain}} \times 100 \\ \text{treatments_proportion_cost} &= \frac{\text{treatments_cost}}{\text{net_gain}} \times 100 \\ \text{labor_proportion_cost} &= \frac{\text{labor_cost}}{\text{net_gain}} \times 100 \end{aligned}$$

4/ Modifications nécessaires du modèle et de l'outil généré par PASTE

PASTE est un outil récent, et le seul modèle qui utilise PASTE est celui utilisé pour créer un exemple pour l'outil (223). Ainsi, certaines fonctionnalités nécessaires pour implémenter correctement le modèle dans PASTE n'existaient pas avant ce stage. Avec l'aide des développeurs de PASTE (Guita Niang et Sébastien Picault), nous avons convenu de certaines mises à jour de PASTE à réaliser. Pour les mêmes raisons, des mises à jours du modèle ont été réalisées, notamment pour la création des variables « nb_doses_indiv », « nb_doses_metaphylaxis » créées par le développeur du modèle (Baptiste Sorin-Dupont) et « metapop_cumulative_vax » que j'ai créé conjointement avec Baptiste Sorin-Dupont. De plus, j'ai adapté les sorties du modèle en fonction de mes besoins pour produire les résultats attendus.

Enfin, pour des raisons de temps, j'ai développé un fichier R de calculs de mes statistiques et d'affichage de graphes (fichier normalement créé par PASTE), afin d'avoir des résultats économiques sur le modèle sans attendre les mises à jour de PASTE. Les graphes utilisés sont des graphiques violon, qui permettent d'étudier la densité, accompagner de points représentant les moyennes, avec en ordonnée un coût, gain ou résultat de l'analyse économique, et en abscisse, les différents sous-scénarios d'un composant de scénario. De plus, j'ai réalisé des graphiques lignes avec des rubans représentant 90 % des simulations, avec en ordonnée, les résultats tenant compte du coût du travail, et en abscisse, la couverture vaccinale ou la charge additionnel de travail. Enfin, afin de prendre en considération la quantité d'antibiotiques utilisés et le nombre de morts par élevage, j'ai réalisé des graphiques points, avec chaque point représentant une simulation d'un scénario.

D) Calculs statistiques

Afin de comparer deux sous-composants de scénarios, j'ai réalisé des tests des rangs signés de Wilcoxon qui est un test non paramétrique. En effet, les distributions de mes résultats ne suivent pas une loi normale (Figure 27). De plus, je compare chaque élément des deux sous-composants en appariant les scénarios avec les mêmes conditions hormis les sous-composants choisis. Ainsi, si je compare les scénarios par rapport au traitement métaphylactique, j'associe les scénarios « `divalent_vax_at_purchase_coverage_06_mixed_batches_metaphylaxis` » et « `divalent_vax_at_purchase_coverage_06_mixed_batches_no_metaphylaxis` », qui présentent les mêmes conditions hormis la possibilité de réaliser un traitement métaphylactique. Ainsi, le test statistique est beaucoup plus précis.

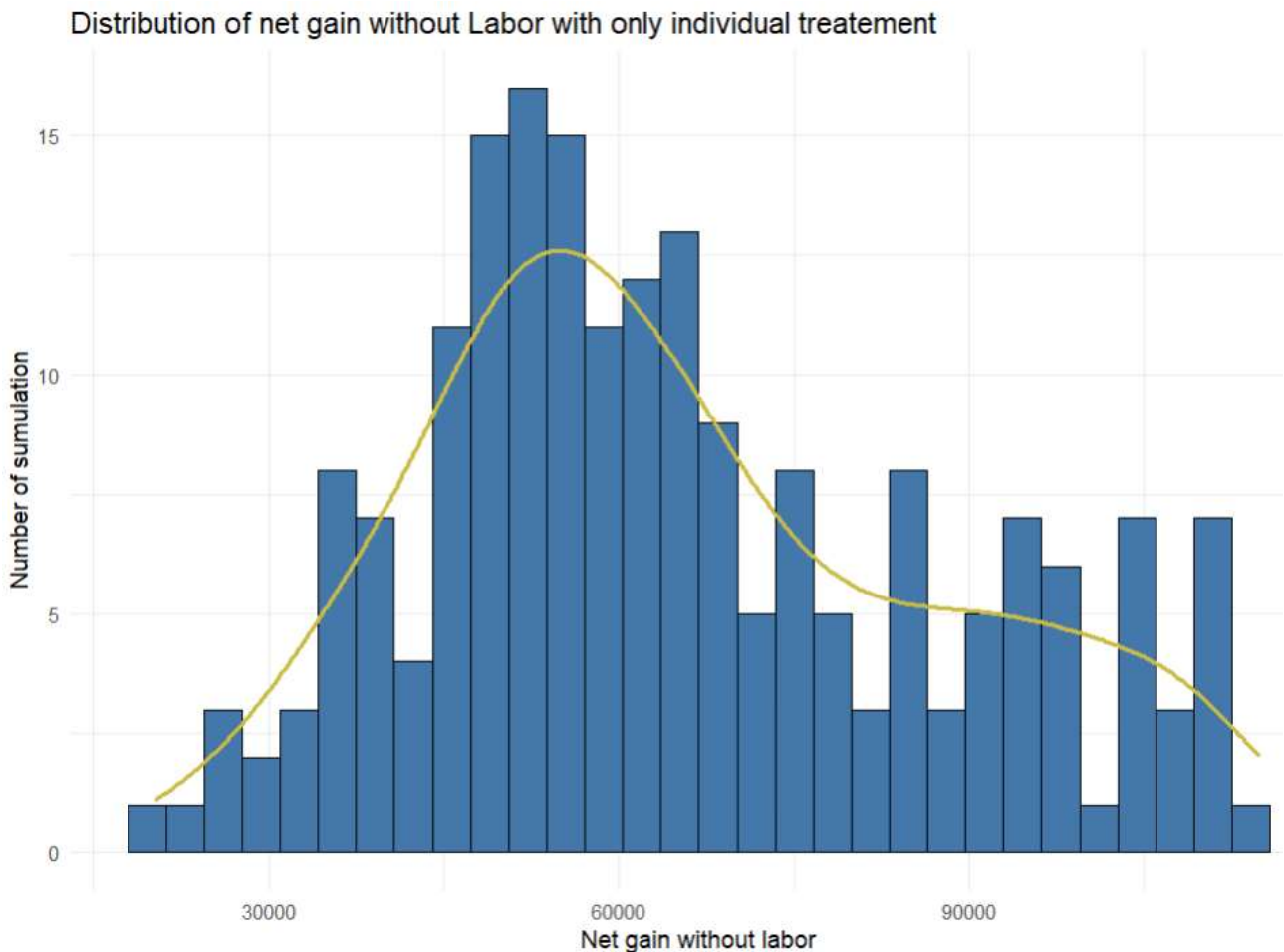


Figure 27 : Distribution de la variable net gain pour le scénario « `no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis` »

Le test des rangs signés de Wilcoxon consiste à réaliser une différence entre des simulations appariées, puis à attribuer des rangs aux valeurs absolues des différences, en les classant de la plus petite à la plus grande, c'est-à-dire que la plus petite différence prend le rang 1, la deuxième plus petite prend le rang 2, et ainsi de suite. Les avantages de travailler avec des rangs sont que l'on simplifie les calculs statistiques, et que l'on s'affranchit de la distribution des données, à condition que les observations soient indépendantes entre elles (229). Le calcul de la statistique V du test des rangs signés de Wilcoxon est la somme des rangs si la différence est supérieure à 0 (Eq. 8). Si toutes

les différences sont positives, alors la statistique V est maximale et est égal à la somme des n premiers entiers, avec n qui est le nombre d'observations (230).

(8)

$$V = \sum_{i=1}^n R_i \times I_i$$
$$V_{max} = \frac{n \times (n+1)}{2}$$

Avec :

- V = statistique de Wilcoxon apparié
- n = le nombre d'observations dans les échantillons
- R_i = Le rang de la valeur absolue de $X_i - Y_i$
- I_i = fonction = 1 si $X_i - Y_i > 0$ ou 0 si $X_i - Y_i < 0$
- X_i = Observation i de l'échantillon X
- Y_i = Observation i de l'échantillon Y

Les tests des rangs signés de Wilcoxon sont réalisés sur R , avec la fonction « `wilcox.test` » du module `stats`, qui renvoie automatiquement la valeur V du test, et la p -value. Dans le cadre des données générées, la puissance statistique est très grande, et même de petites différences sont rapidement significatives. Dans ce contexte, la p -value est toujours inférieur à 0,05, et n'apporte pas d'information. Ainsi, je me suis seulement intéressé à la valeur de la statistique V et de son maximum. Pour cela, j'ai calculé la proportion de V dans V_{max} . Ainsi, une proportion élevée de V signifie que l'échantillon X est souvent supérieur à l'échantillon Y, et/ou que la différence de X avec Y est plus grande quand X est supérieur. Dans la suite, je considère qu'une proportion de V comprise entre 0-10 % et 90-100 % signifie de très fréquentes différences dans le même sens des simulations appariées ; une proportion de V entre 10-20 % et 80-90 % signifie de fréquentes différences dans le même sens des simulations appariées ; une proportion de V entre 20-30 % et 70-80 % signifie des différences dans le même sens récurrentes des simulations appariées ; et une proportion de V entre 30-70 % signifie des différences fréquemment opposées.

III/ Résultats

Tous les résultats sont des valeurs économiques déflatées équivalent à l'inflation de 2015 (Annexe 5). Ainsi, les résultats sont plus facilement comparables avec la bibliographie.

A) Ergonomie de l'outil

L'entièreté du code `yaml` de PASTE et de l'outil web généré sont écrits en anglais, le langage universel pour du code afin de le rendre plus accessible. Les variables initialisées dans PASTE sont commentées, notamment pour indiquer leur unité. Les autres variables sont directement décrites dans le code même (Figure 28). Ainsi, le code est intelligible, et donc facilement modifiable par un utilisateur.

```

814     individual_cost_gp:
815       value: "metapop_nb_doses_indiv * cost_of_antibiotic_dose"
816       desc: 'Cost of individual treatments'
817     meta_cost_gp:
818       value: "metapop_nb_doses_metaphylaxis * cost_of_meta_per_head"
819       desc: "Cost of metaphylaxis treatment"
820     vax_cost_gp:
821       value: "2 * metapop_cumulative_vax * cost_of_vax_per_head"
822       desc: "Cost of vaccine"
823     treatments_cost_gp:
824       value: "individual_cost_gp + meta_cost_gp + vax_cost_gp"
825       desc: "Cost of all treatments"
826     treatment_labor_gp:
827       value: "metapop_nb_doses_indiv * time_to_treat"
828       desc: "Time to treat individually animals"
829     meta_labor_gp:
830       value: "metapop_nb_doses_metaphylaxis * time_to_meta"
831       desc: "Time to do metaphylaxis treatments"
832     vax_labor_gp:
833       value: "2 * metapop_cumulative_vax * time_to_vax"
834       desc: "Time to vaccinate animals"
835     total_labor_gp:
836       value: "(treatment_labor_gp + meta_labor_gp + vax_labor_gp)/60" # time in hour
837       desc: "Total of time spent induced by BRD in hour"
838     labor_cost_gp:
839       value: "total_labor_gp * cost_of_time" # time in euro
840       desc: "Cost of labor induced by BRD"
841     net_gain_gp:
842       value: "selling_cost_gp - purchase_cost_gp - feeding_cost_gp - treatments_cost_gp - labor_cost_gp"
843       desc: "Net gain"
844     net_gain_without_labor_gp:
845       value: "selling_cost_gp - purchase_cost_gp - feeding_cost_gp - treatments_cost_gp"
846       desc: "Net gain without the labor cost"

```

Figure 28 : Description des variables dans le code yaml de PASTE

Toutes les variables économiques, ou en relation avec les calculs économiques sont modifiables dans le formulaire web, afin de pouvoir adapter le modèle aux situations souhaitées par les utilisateurs, et ainsi être le plus réaliste possible. De plus, un texte complémentaire s'affiche lorsque la souris reste sur le titre d'une des variables, afin de préciser le rôle de la variable (Figure 29). Le formulaire de sélection des scénarios permet de choisir facilement les scénarios à considérer (Figure 30). Un scénario « neutre » (« no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis »), correspondant au scénario où les traitements individuels sont les seuls contrôles de la BRD, est obligatoirement lancé dans chaque simulation et n'apparaît donc pas dans ce formulaire.

L'affichage des graphes se réalise sur différents onglets dans la page web, correspondant aux composants de scénario, et un onglet « Epidemiology », décrivant l'évolution des statuts cliniques des animaux et de l'usage d'antibiotiques au cours des simulations (Figure 31). Dans chaque onglet de composant de scénario, on trouve des graphes:

- un sur la charge de travail,
- un sur le coût du travail,
- un sur le coût des traitements,
- un sur le coût des achats,
- un sur le coût de l'alimentation,
- un sur le gain des ventes,
- un résultat avec prise en compte du coût du travail
- un résultat sans prise en compte du coût du travail.

Ainsi, chaque élément de l'analyse coût/bénéfice est visualisable par l'utilisateur.

Initial conditions economic

Cost of antibiotic dose
13

Cost of a metaphylactic treatment per animal
13

Cost of a vaccination per animal
3

Cost of a calf at the comercial center
1184.84

Cost of a calf at the comercial center
330
Cost of a calf at the comercial center before fattening

Feed cost per kilogram produced
0.9

Days on field
277

ADG of healthy animals

Figure 29 : Formulaire d'initialisation des variables dans l'outil web généré par PASTE

Scenario selection

Selecting scenarios to run

- divalent_vax_on_arrival_no_coverage_mixed_batches_no_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_no_coverage_mixed_batches_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_no_coverage_sorted_batches_no_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_no_coverage_sorted_batches_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_01_mixed_batches_no_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_01_mixed_batches_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_01_sorted_batches_no_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_01_sorted_batches_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_02_mixed_batches_no_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_02_mixed_batches_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_02_sorted_batches_no_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_02_sorted_batches_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_03_mixed_batches_no_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_03_mixed_batches_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_03_sorted_batches_no_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_03_sorted_batches_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_04_mixed_batches_no_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_04_mixed_batches_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_04_sorted_batches_no_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_04_sorted_batches_metaphylaxis
- divalent_vax_on_arrival_coverage_05_mixed_batches_no_metaphylaxis

Figure 30 : Formulaire de sélection des scénarios dans l'outil web généré par PASTE

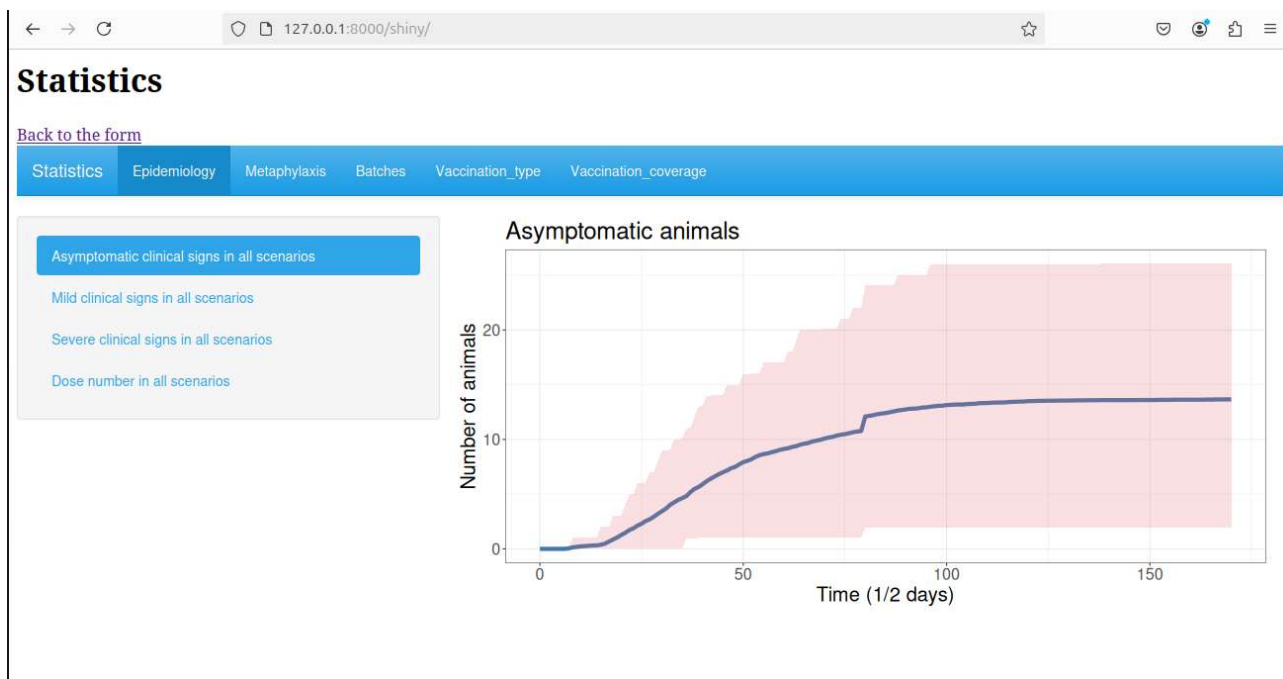


Figure 31 : Affichage des graphes par l'outil web généré par PASTE

B) Description de résultats préliminaires du modèle économique

Afin de mieux décrire et comprendre l'impact de mes composants de scénarios sur les résultats de l'engraissement des jeunes bovins (JB), j'ai décidé de mettre l'emphase sur certains calculs et sur certains scénarios.

1/ Résultats économiques sans BRD

Afin de connaître les gains et les bénéfices maximum possibles par mon analyse coût/bénéfice, j'ai réalisé un calcul théorique d'engraissement de JB sans BRD (Eq. 9). Dans ce calcul théorique, tous les animaux sont considérés comme sains, sans mise en place d'aucun traitement antibiotique ni de vaccination. On peut noter que le gain maximal des ventes de 180 JB après un engraissement de 277 jours est de 401 450,30 €¹, avec un coût de l'alimentation de 62 285,11 €¹, et que les bénéfices de fin d'engraissement sont de 125 894 €¹, soit 699,41 €¹/JB.

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

$$\begin{aligned} \text{purchase_cost_no_BRD} &= \text{batch_size} \times \text{number_batches} \times \text{cost_purchase_calf} \\ &= 213\,271,2 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{feeding_cost_no_BRD} &= (\text{total_population} \times (\text{healthy_ADG} \times \text{DOF}) \times 0,001) \times \text{feed_cost_per_kg} \\ &= 62\,285,11 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{total_selling} &= \text{total_population} \times (\text{healthy_ADG} \times \text{DOF} \times 0,001 + \text{weight_purchase}) \times 0,58 \times \\ &\quad (\text{proportion_conformation_R_healthy} \times (\text{slaughter_price_R} - \text{slaughter_price_U}) + \text{slaughter_price_U}) \\ &= 401\,450,30 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\text{treatments_cost_no_BRD} = 0$$

$$\text{labor_cost_no_BRD} = 0$$

$$\begin{aligned} \text{economic_net_gain_no_BRD} &= \text{total_selling} - \text{prurchase_cost_no_BRD} - \text{feeding_cost_no_BRD} - \\ &\quad \text{treatments_cost_no_BRD} - \text{labor_cost_no_BRD} \\ &= 125\,894 \text{ €} \\ &= 699,41 \text{ €/animal} \end{aligned}$$

2/ Résultats économiques sans maîtrise

Le scénario « no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis » correspond au scénario sans contrôle hormis le traitement individuel, et donc à la situation supposée être la plus défavorable en moyenne sur le terrain lors d'épidémie de BRD (Figure 32).

Les distributions du gain des ventes, des résultats et du coût de l'alimentation sont similaires, et opposés à ceux des autres coûts (hors coût d'achat, fixe, et qui ne sera plus évoqué lors de description de distributions de valeurs). Pour les autres coûts, un pic de distribution important est observable légèrement au-dessus des moyennes, et à l'inverse, pour le gain des ventes, les résultats et le coût d'alimentation, un pic de distribution important est observable légèrement en dessous de la moyenne. Ainsi, la courbe violon a un aspect de raie Manta sans queue. Ces similarités entre gain des ventes, résultats et coût de l'alimentation sont cohérentes avec la méthode de calculs. En effet, le calcul du coût de l'alimentation et du gain des ventes des JB est relativement proche (cf. **Partie 2.II.C.3**), expliquant une distribution similaire. De plus, les résultats peuvent être facilement approximés par la somme des coûts d'achats et d'alimentation et du gain des ventes. La somme des trois fait 68 250 €, soit une variation de 6,7 % par rapport au résultat avec coût du travail.

Afin de réaliser les traitements individuels, l'éleveur doit réaliser en moyenne 153h de travail supplémentaires, soit 6,4 jours entier sur 277 jours. Si on considère un travail de 35h par semaine sur 277 jours, le travail induit par les BRD représente environ 11 % du temps de travail. La variabilité du travail est importante, avec un intervalle de 24,7 à 254 heures de travail supplémentaires (1,8 à 18,3 % du temps de travail en 35h). Le coût imputé au travail étant proportionnel au temps de travail, la même analyse peut être faite. Le coût du travail correspond à environ 2 % des pertes dues à la baisse du gain des ventes, des coûts des traitements et du travail.

Le coût des traitements est en moyenne de 2 978 €¹, avec une variation de 481 à 4 953 €¹. Le coût de l'alimentation est en moyenne de 43 960 €¹, avec une fourchette de 31 457,44 à 58 402,67 €¹. Le gain des ventes des JB est en moyenne de 325 481 €¹, avec des valeurs allant de 269 560,40 à 387 309,40 €¹.

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

Les résultats économiques de ce scénario sont nettement inférieurs à la situation idéale. En effet, Le résultat net est de 63 753 €¹ avec le coût du traitement ou de 65 271 € sans, soit environ 50 % du résultat de la situation idéale, ce qui représente un bénéfice de 354,18 €/animal et 362,62 €/animal respectivement. De plus, on observe une forte variabilité, avec des résultats allant de 17 982,10 € jusqu'à 114 477,50 €. La différence de résultats provient principalement de la baisse de revenus à la vente des animaux (- 75 969,30 €¹) (Figure 33).

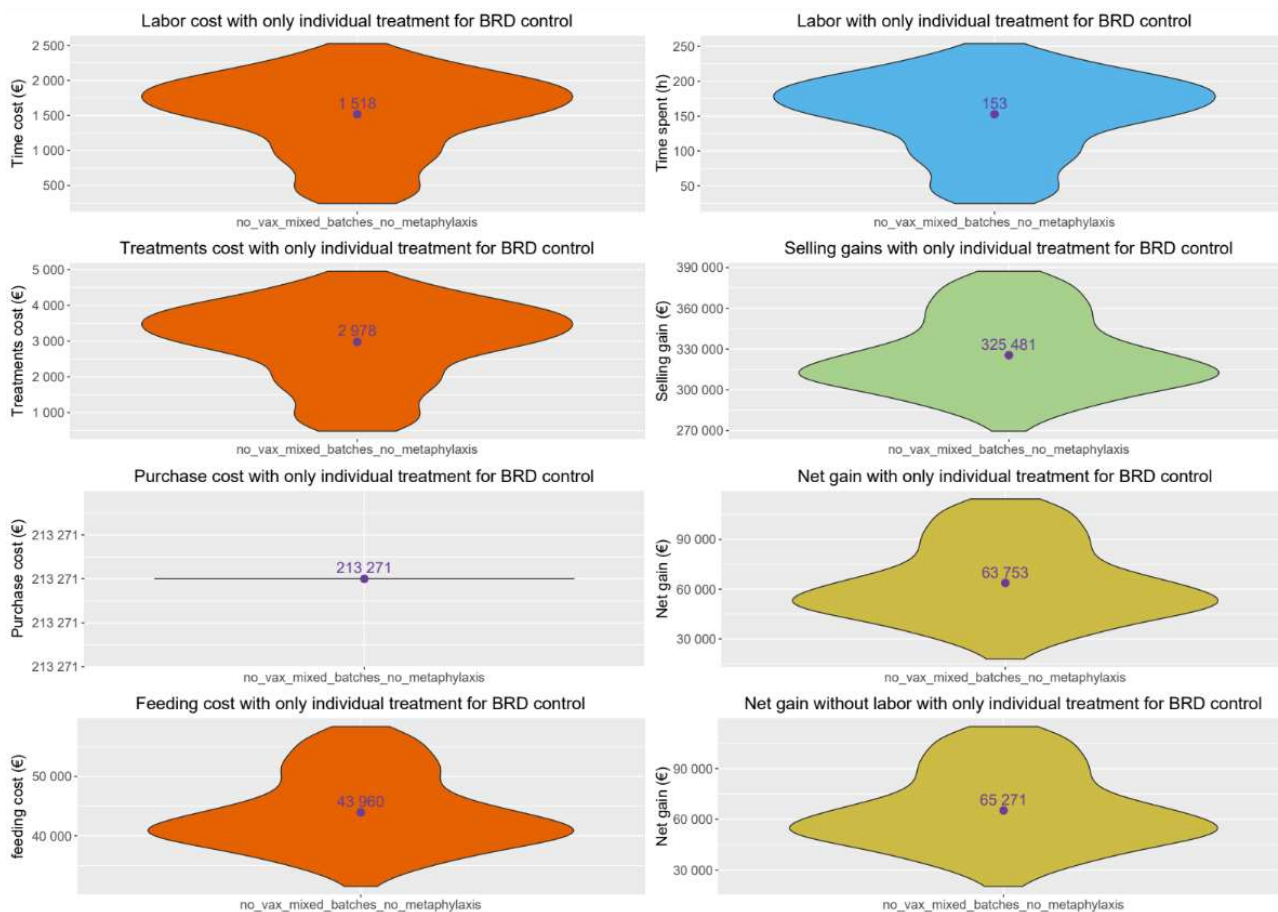


Figure 32 : Coûts, gain et résultats du scénario « no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis »

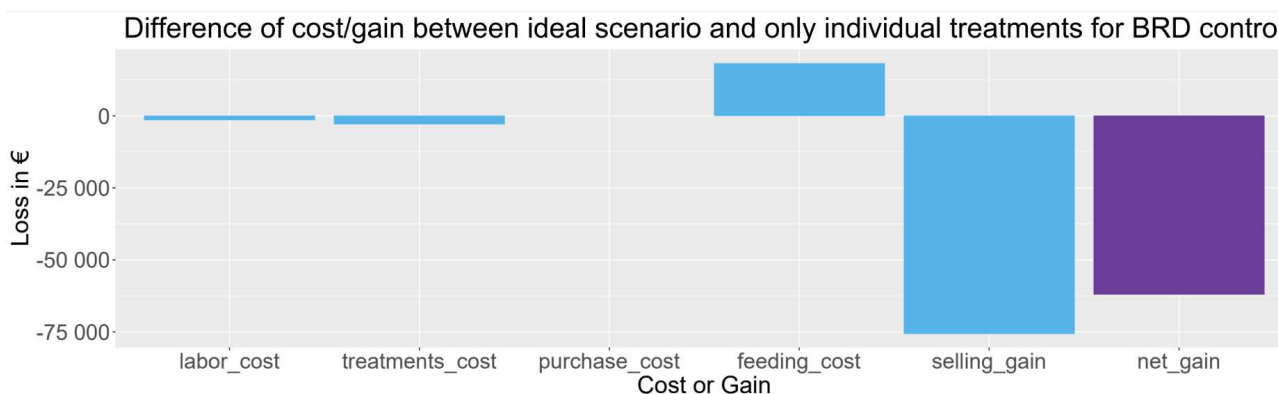


Figure 33 : Différences de coûts et de gain entre la situation idéale et le scénario « no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis »

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

3/ Résultats économiques tous scénarios confondus

La distribution du gain des ventes, du coût de l'alimentation et des résultats à la forme d'une raie Manta tête vers les hautes valeurs, le coût et la charge du travail ont une distribution à 2 pics, et le coût des traitements a une distribution à 3 pics (Figure 34).

Le temps moyen de travail est de 94h, avec une fourchette allant de 1,3 à 248,9h de travail, soit un coût moyen de 933¹ avec une fourchette allant de 13,25 à 2 473,74 €¹. Le coût moyen des traitements est de 2 505 €¹ avec des valeurs allant de 26 à 5 382 €¹. Le coût moyen de l'alimentation est de 53 525 €¹ avec des extrêmes à 33 346,76 €¹ et 62 132,86 €¹. Le gain moyen des ventes de JB est de 366 857 €¹ avec une fourchette allant de 272 340,70 à 400 881,40 €¹.

Ainsi, on a un résultat moyen de 96 622 €¹, soit 536,79 €¹/JB, avec le pire scénario qui a un résultat de 19 665,36 €¹, soit 109,252 €¹/JB et le meilleur un résultat de 125 438 €¹, soit 696,88 €¹/JB. Dans les graphiques suivants, on va observer la répartition des 8 200 simulations (50 run de 164 scénarios) en fonction des composants de scénarios choisis.

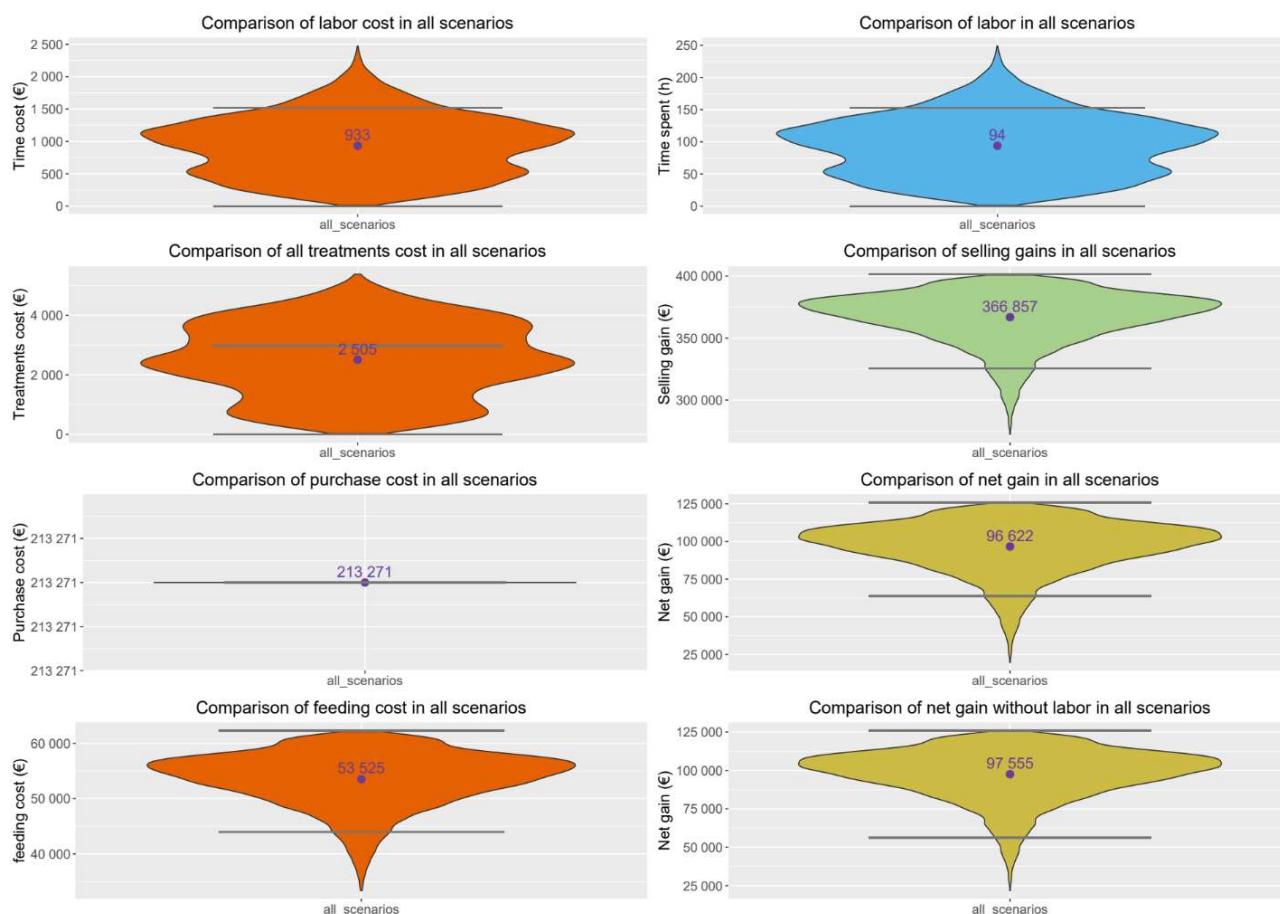


Figure 34 : Coûts, gain et résultats de tous les scénarios confondus associés à la visualisation des moyennes du scénario sans BRD et du scénario sans contrôle hors traitement individuel

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

C) Coûts, gain et résultats par composant de scénario

Afin de mieux comparer et interpréter les résultats du modèle, j'ai décidé de tracer sur chaque courbe violon 2 segments gris, représentant la valeur théorique des résultats économiques en absence de BRD, et la moyenne obtenue sur les résultats du modèle en l'absence de contrôle autre que les traitements individuels.

1/ Impact de la métaphylaxie sur les résultats de l'engraissement

Les distributions du gain des ventes, des résultats et du coût de l'alimentation des scénarios avec un traitement métaphylactique suivent, comme précédemment, la forme d'une raie Manta, tandis que celles des scénarios sans traitement métaphylactique suivent plutôt une distribution ayant la forme d'une grande raie, avec des ailes moins développées autour de la moyenne (Figure 35). Cette différence de distribution montre une variabilité beaucoup plus importante pour les scénarios sans traitement métaphylactique. Le coût du travail et le temps de travail ont une distribution à 2 pics, avec et sans traitement métaphylactique, mais avec des valeurs supérieures plus extrêmes pour les scénarios sans traitement métaphylactique. La distribution du coût des traitements suit aussi une distribution à 2 pics pour les scénarios avec ou sans traitement métaphylactique, mais pour les scénarios avec, le pic supérieur est plus marqué.

Les moyennes du temps et du coût de travail sont similaires entre les scénarios avec et sans traitement métaphylactique, avec environ 94h en moyenne de travail supplémentaire, soit environ 930 €¹ de coût supplémentaire. Ce résultat se confirme en analysant les statistiques de Wilcoxon, avec une proportion de V à 57 % (Tableau XXIV), exprimant le manque de spécificité de ce coût pour différencier les deux sous-composants. Cependant, la fourchette est plus élevée pour les scénarios sans traitement métaphylactique (1,3 à 248,9h et 1,3 à 203,6h respectivement pour sans métaphylaxie et avec). Une partie des simulations présentent un temps et un coût du travail supérieurs au scénario sans contrôle de la BRD.

Le coût des traitements est en moyenne plus élevé dans les scénarios avec traitement métaphylactique (3 137 €¹ contre 1 873 €¹), et avec une répartition plus importante dans les valeurs hautes. La fourchette du coût des traitements est de 26 à 5 382 €¹ pour les scénarios avec traitement métaphylactique, et de 26 à 4 879 €¹ pour les scénarios sans. Cette différence est cohérente, puisque dans les scénarios avec traitement métaphylactique, on ajoute un coût pour les traitements métaphylactiques, associés aux coûts des traitements individuels. En effet, la proportion de V (96,5%) montre que la très grande majorité des scénarios avec un traitement métaphylactique a un coût des traitements supérieurs aux scénarios équivalents sans métaphylaxie (Tableau XXIV). Sur la moyenne, la différence de coût représente une métaphylaxie sur 54 % des animaux. La moyenne du coût des traitements pour les scénarios avec traitement métaphylactique est très légèrement supérieure à la moyenne du coût des traitements en l'absence de contrôle de la BRD (3 137 €¹ et 2 978 €¹ respectivement), ce qui est dû au coût supplémentaire de la métaphylaxie, malgré une persistance des traitements individuels.

La moyenne du résultat économique avec le coût du travail est supérieure dans les scénarios avec un traitement métaphylactique (101 684 €¹ contre 91 560 €¹ respectivement). La fourchette de valeur est moins étendue dans les valeurs basses pour les scénarios avec traitement métaphylactique (56 043,80 à 125 438 €¹) que celle des scénarios sans (19 665,36 à 125 170,80 €¹). La proportion de

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

la statistique V est supérieure à 80 %, ce qui signifie que la majorité des scénarios avec un traitement métaphylactique a un résultat supérieur aux scénarios sans équivalents (Tableau XXIV). Cette description se retrouve avec le coût de l'alimentation et le gain des ventes, qui suivent la même distribution, et ont des statistiques V du même ordre de grandeur.

On se rend compte après analyse, que les meilleurs scénarios sont équivalents dans les deux situations, mais qu'il existe de nombreuses simulations défavorables lors d'absence de traitement métaphylactique.

Figure 35 : Coûts, gain et résultats des scénarios en fonction de l'utilisation de la métaphylaxie

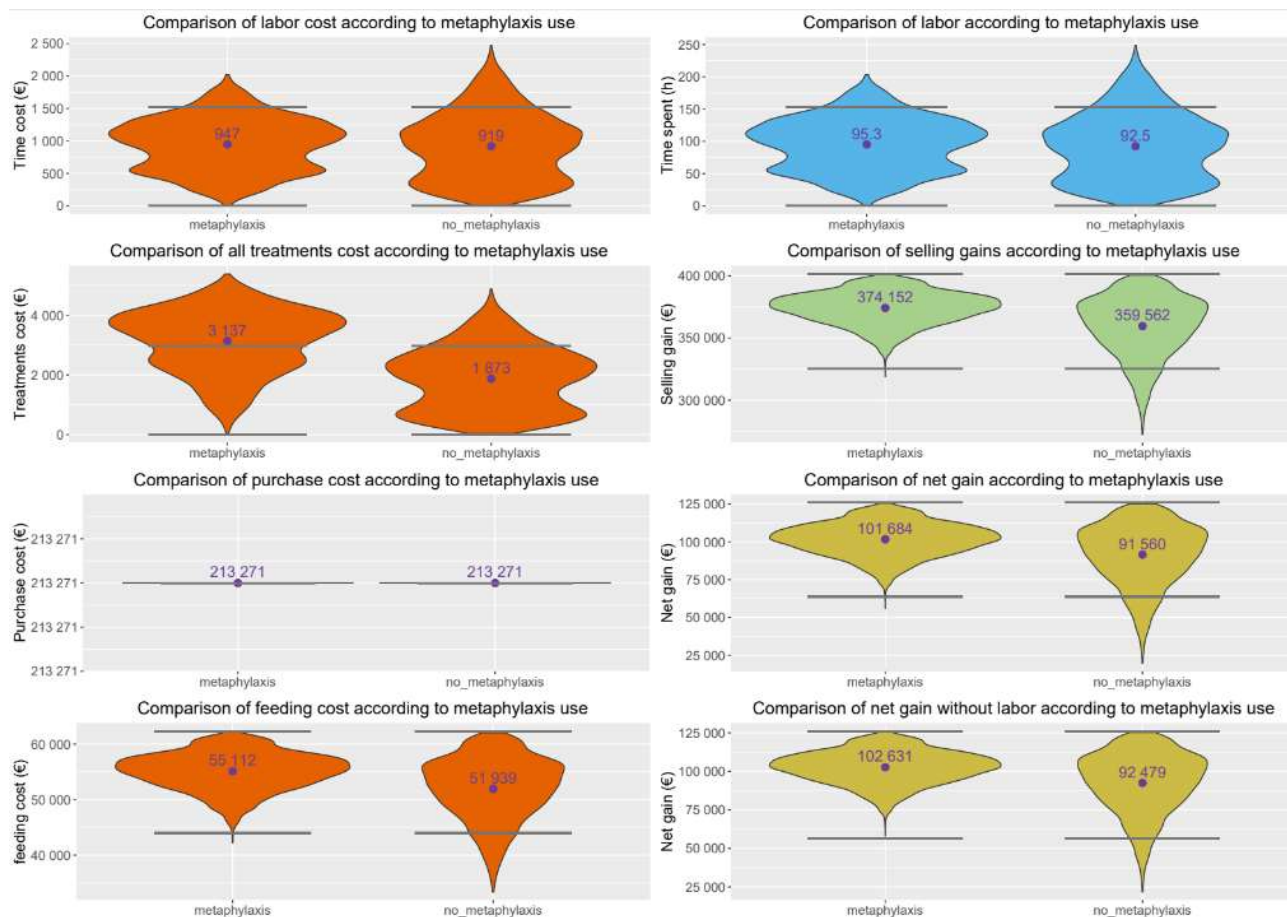


Tableau XXIV : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec métaphylaxie et sans

Type	V_max	V	proportion_V
treatments_cost	8 407 050	8 116 245	96,5 %
labor_cost	8 407 050	4 808 474	57,2 %
total_labor	8 407 050	4 808 476	57,2 %
purchase_cost	8 407 050	0	0 %
feeding_cost	8 407 050	7 068 099	84,1 %
total_selling	8 407 050	7 230 811	86,0 %
net_gain	8 407 050	6 782 595	80,7 %
net_gain_without_labor	8 407 050	6 848 953	81,5 %

2/ Impact de la composition des lots sur les résultats de l'engraissement

La distribution des graphes et la valeur des moyennes sont très similaires à celles des graphes regroupant tous les scénarios (Figures 34 et 36). Cela signifie qu'il y a très peu d'influence de la composition des lots dans les résultats économiques de l'engraissement des JB. Ce résultat se retrouve dans les statistiques V de Wilcoxon, avec des proportions de la statistique aux alentours de 40 ou 60 % (Tableau XXV). Cependant, on peut observer que la mise en lot aléatoire est légèrement plus efficace, économiquement parlant, qu'une mise en lot en regroupant les animaux vaccinés. En effet, on observe une différence de 2 421 €¹ de résultat entre les deux sous-composants en faveur des lots formés aléatoirement. Cette différence minime se retrouve sur tous les graphes.

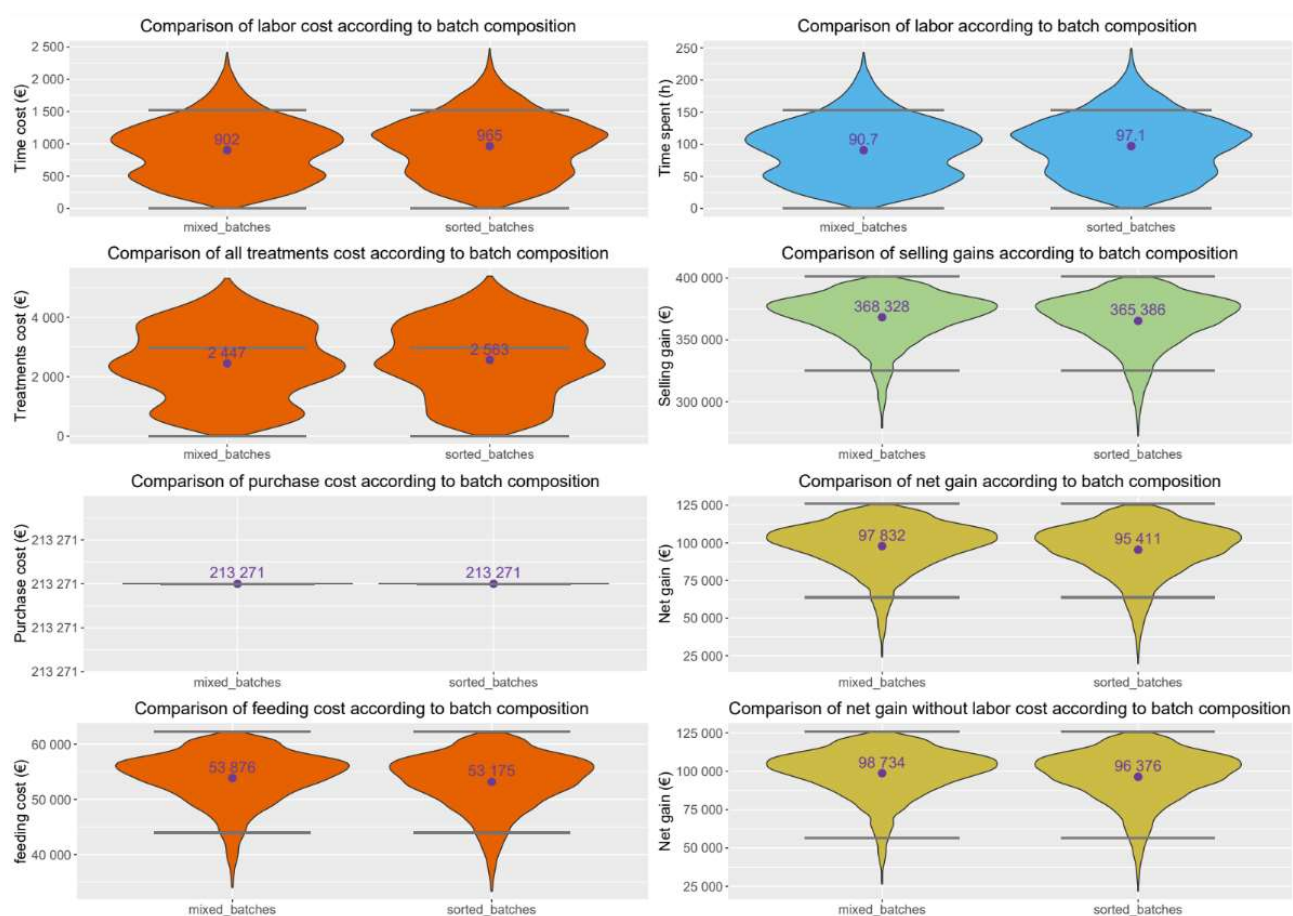


Figure 36 : Coûts, gain et résultats des scénarios en fonction de la composition des lots

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

Tableau XXV : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec des lots triés ou non

Type	V_max	V	proportion_V
treatments_cost	8 407 050	3 458 580	41,1 %
labor_cost	8 407 050	3 397 140	40,4 %
total_labor	8 407 050	3 397 215	40,4 %
purchase_cost	8 407 050	0	0 %
feeding_cost	8 407 050	4 995 401	59,4 %
total_selling	8 407 050	4 988 617	59,3 %
net_gain	8 407 050	4 982 658	59,3 %
net_gain_without_labor	8 407 050	4 980 879	59,2 %

3/ Impact du type de vaccin utilisé sur les résultats de l'engraissement

Les distributions des coûts, gain et résultats des scénarios sans vaccination présentent un pic peu développé au niveau de la moyenne et une répartition plus ou moins constante sur le reste de la courbe (Figure 37). De plus, le sous-composant « no_vax » présente, de tous les sous-composants présentés dans la **Partie 2.III.C**, les moyennes les plus basses pour le gain des ventes, les résultats et le coût de l'alimentation, et les moyennes les plus hautes pour le coût et la charge de travail et le coût des traitements. En effet, dans ces scénarios, on obtient une moyenne de gain des ventes à 343 674 €¹, avec une fourchette de 280 703,80 à 387 812,50 €¹ ; une moyenne de résultat de 77 782 €¹ avec des valeurs allant de 26 702,51 à 114 324,30 €¹ ; une moyenne de coût de l'alimentation de 47 884 €¹ avec une fourchette de 34 052,65 à 58 779,84 €¹ ; une moyenne de coût des traitements de 3 363 €¹ avec des valeurs allant de 598 à 5 382 €¹ ; une moyenne de 138,3h de travail correspondant à 1 375 €¹ de coût du travail, avec une fourchette de 30,7h à 232h, soit 304,83 à 2 306,08 €¹.

La distribution du gain des ventes, des résultats et du coût de l'alimentation présentent une distribution de raie Manta avec la tête vers les valeurs hautes pour tous les autres sous-composants de « different_vax », les distributions du temps et de la charge de travail ont la forme d'une raie Manta avec la tête vers les valeurs basses, les distributions du coût des traitements ont une distribution à 2 pics pour les sous-composants « divalent_vax_on_arrival », « monovalent_vax_at_purchase », et « monovalent_vax_on_arrival », et une forme de triangle concave pointé vers les valeurs hautes pour le sous-composant « divalent_vax_at_purchase ». Pour ce dernier, la distribution montre que la plupart des scénarios présentent peu de coût des traitements, avec cependant des simulations présentant des coûts plus élevés.

On peut observer des moyennes nettement plus favorables pour les scénarios avec des vaccins réalisés avant l'arrivée dans l'élevage, avec des résultats plus élevés de 13 686 €¹ pour les vaccins divalents et de 10 660 €¹ pour les vaccins monovalents. Les statistiques V de Wilcoxon montrent que les coûts des traitements et du travail sont quasi systématiquement plus élevés lors de vaccins réalisés à l'arrivée en engraissement (~5%), et que le gain des ventes et les résultats sont très fréquemment supérieurs lors d'une vaccination avant l'arrivée en élevage d'engraissement (~87%) (Tableau XXVI).

De même, les valeurs économiques sont légèrement plus favorables pour les vaccins divalents, avec des résultats plus élevés de 6 748 €¹ et 3 722 €¹ par rapports aux vaccins

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

monovalents, respectivement entre vaccins réalisés avant l'arrivée et à l'arrivée en engraissement. Les statistiques V de Wilcoxon montrent que les coûts des traitements et du travail ont fréquemment des différences opposés (>30%), et donc que les coûts sont peu spécifiques. Le gain des ventes et les résultats sont très faiblement supérieurs lors d'une vaccination avant l'arrivée en élevage (~70%) (Tableau XXVII).

On peut aussi noter que les coûts des traitements des sous-composants « monovalent_vax_at_purchase » et « monovalent_vax_on_arrival » (3 087 €¹ et 3 192 €¹ respectivement) sont légèrement supérieurs à la moyenne du coût des traitements du scénario sans contrôle hors traitement individuel des BRD. Ceci s'explique par un coût supplémentaire de la vaccination malgré une persistance suffisante des traitements individuels.

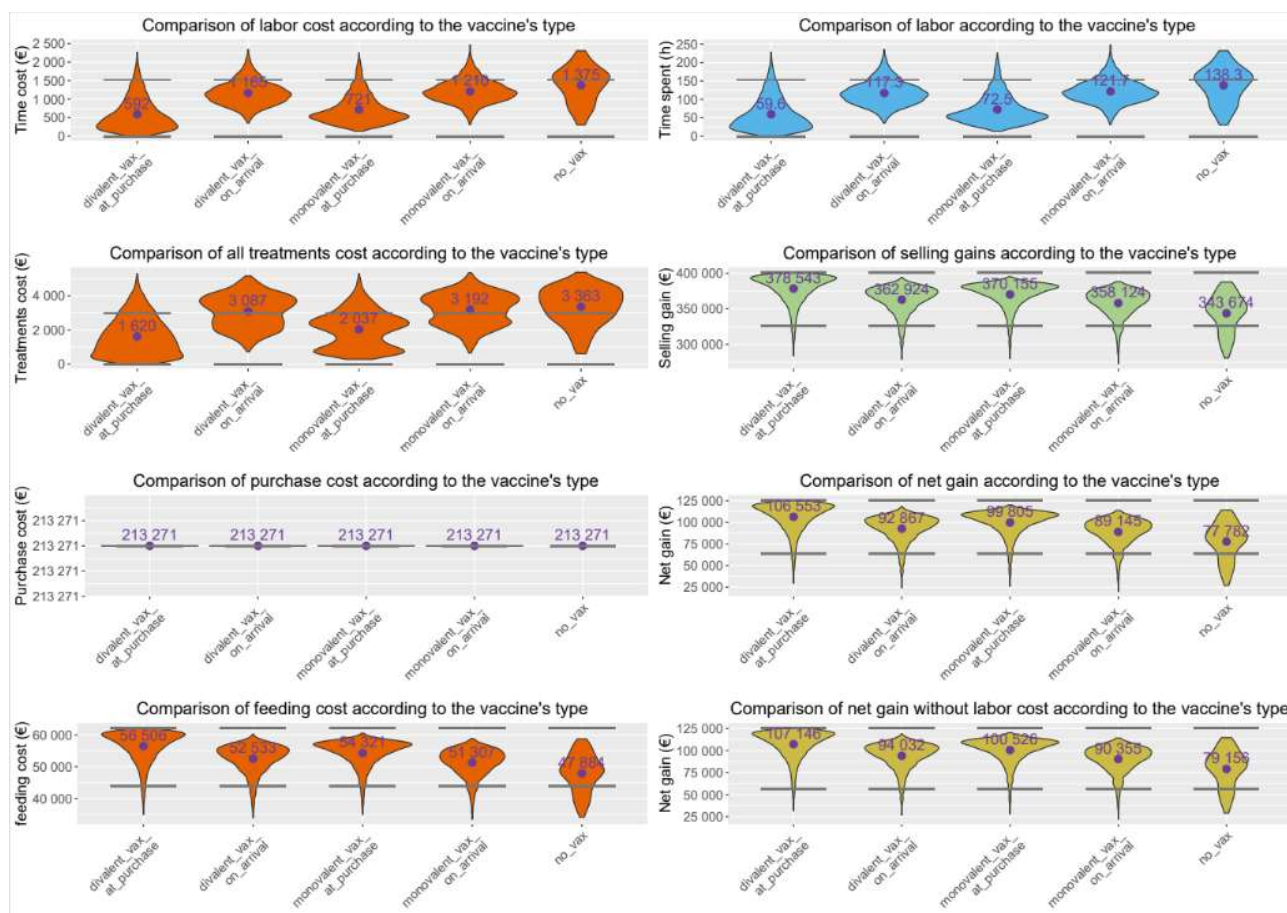


Figure 37 : Coûts, gain et résultats des scénarios en fonction des types et du moment de la vaccination

1 Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

Tableau XXVI : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec des vaccins réalisés avant l'arrivée ou à l'arrivée

Type	V_max	V	proportion_V
treatments_cost	8 002 000	423 026	5,3 %
labor_cost	8 002 000	543 148	6,8 %
total_labor	8 002 000	543 149	6,8 %
purchase_cost	8 002 000	0	0 %
feeding_cost	8 002 000	6 972 726	87,1 %
total_selling	8 002 000	6 915 210	86,4 %
net_gain	8 002 000	6 994 376	87,4 %
net_gain_without_labor	8 002 000	6 971 182	87,1 %

Tableau XXVII : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec des vaccins divalents ou monovalents

Type	V_max	V	proportion_V
treatments_cost	8 002 000	2 568 364	32,1 %
labor_cost	8 002 000	2 829 063	35,4 %
total_labor	8 002 000	2 828 950	35,4 %
purchase_cost	8 002 000	0	0 %
feeding_cost	8 002 000	5 898 411	73,7 %
total_selling	8 002 000	5 812 007	72,6 %
net_gain	8 002 000	5 760 210	72,0 %
net_gain_without_labor	8 002 000	5 772 154	72,1 %

4/ Impact de la couverture vaccinale sur les résultats de l'engraissement

L'abscisse « coverage_0 » correspond au sous-composant « no_vax » présenté dans la partie précédente, et qui ne sera pas décrite en tant que telle ici. L'aspect de la distribution est la même, les différences observables sont dues à la restriction de taille de l'abscisse (Figure 38).

La distribution évolue avec le pourcentage de couverture vaccinale dans les lots. Pour le gain des ventes, le coût de l'alimentation et les résultats, les distributions évoluent d'une distribution plus ou moins constante (« coverage_0 » et « coverage_01 ») vers une distribution en forme de grande raie tête vers les valeurs hautes (« coverage_02 » à « coverage_08 »), jusqu'à une distribution à 2 pics (« coverage_09 » et « coverage_1 »). De même, la distribution du temps et du coût du travail évolue d'une distribution plus ou moins constante (« coverage_0 » et « coverage_01 »), vers une distribution à 2 pics, avec très peu de valeurs au niveau de la moyenne (« coverage_07 » à « coverage_1 »). La distribution du coût des traitements est similaire avec celles du travail, avec une évolution vers une distribution à 3 pics (« coverage_07 » à « coverage_1 »). On peut supposer que l'existence de plusieurs pics plus marqués que sur les courbes prenant tous les scénarios pour les plus hautes couvertures vaccinales provient de l'existence de qualités vaccinales différentes, vue dans la partie précédente.

L'évolution des moyennes suit une courbe croissante pour le gain des ventes, le coût de l'alimentation et les résultats, et décroissante pour le coût et la charge du travail, et le coût des

traitements. Cette courbe semble tendre vers la valeur de la moyenne des scénarios avec 100 % de couverture vaccinale. Les statistiques V de Wilcoxon sont relativement similaires entre la comparaison des scénarios avec une couverture de 10 % et ceux avec une couverture de 50 %, et entre la comparaison des scénarios avec une couverture de 50 % et une couverture de 100 %, avec des gains et résultats fréquemment supérieurs pour les couvertures vaccinales hautes (~87%) (Tableau XXVIII et XXIX). Néanmoins, les statistiques V sont supérieures pour les coûts des traitements et du travail pour la comparaison entre les couvertures vaccinales de 50 et 100 % (>20%), ce que l'on retrouve bien dans l'allure des courbes, qui ont des pentes moins franches. Je n'ai pas pu réaliser les statistiques V de Wilcoxon avec le sous-composant « coverage_0 », car elle ne possède pas le même nombre de simulations que les autres.

La moyenne de charge du travail évolue de 138,3h à 73,5h avec la couverture vaccinale, pour un coût évoluant de 730 à 1 375 €¹. La réalisation de la vaccination avec un couverture de 100 % impute une charge de travail supplémentaire minimale de 21h. Le reste est dû soit à la réalisation de traitements métaphylactiques, soit à la réalisation de traitements individuels. Le même raisonnement est applicable pour le coût des traitements, qui évolue de 2 106 à 3 363 €¹ en moyenne.

On observe une forte variation de gain des ventes en fonction de la couverture vaccinale, avec une valeur initiale à 343 674 €¹ jusqu'à 379 249 €¹. Cette forte variation se retrouve dans les résultats, avec une variation de 77 782 à 106 594 €¹ en prenant en compte le coût du travail.

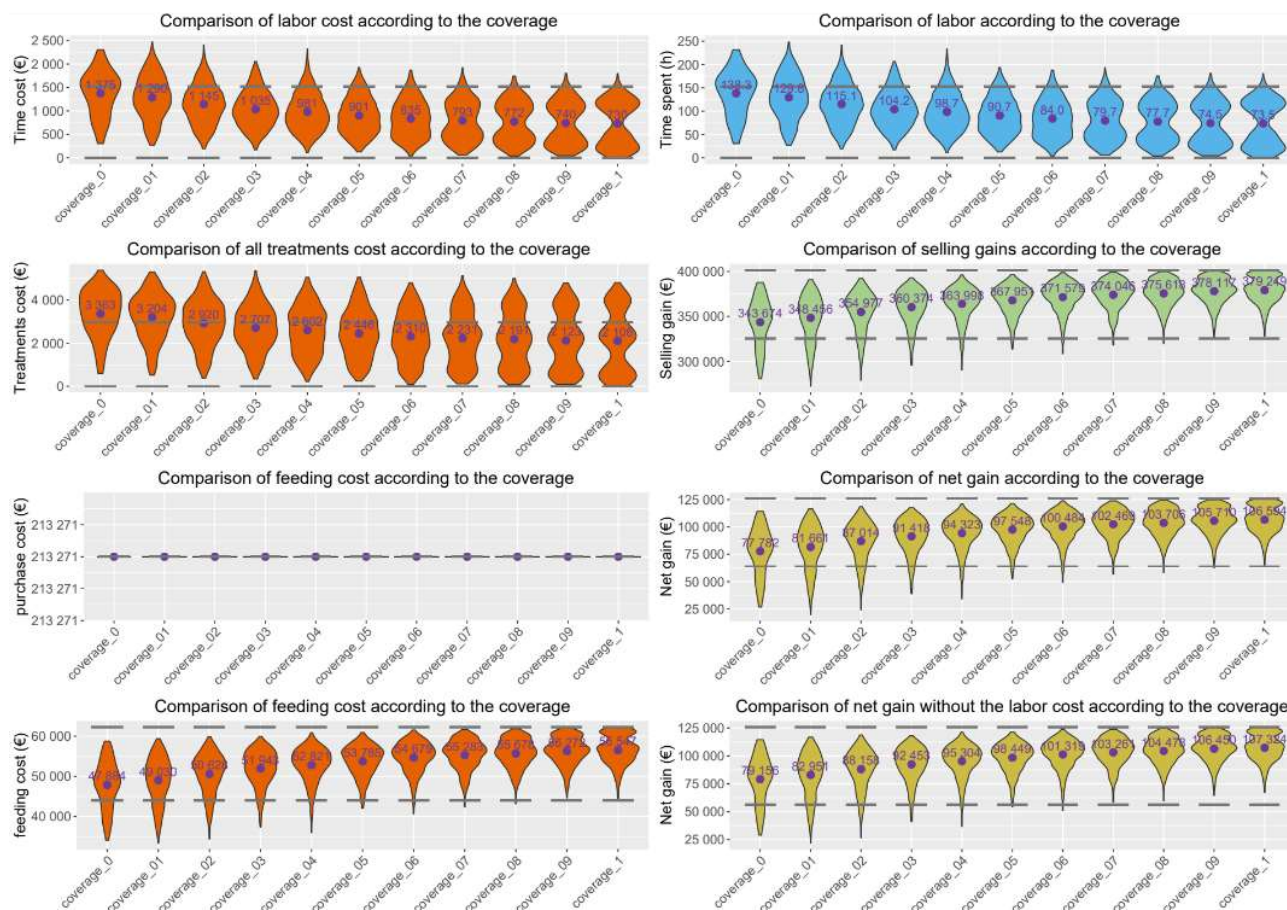


Figure 38 : Coûts, gain et résultats des scénarios en fonction de la couverture vaccinale des lots

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

Tableau XXVIII : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec des couvertures vaccinales de 10 % et de 50 %

Type	V_max	V	proportion_V
treatments_cost	320 400	56 265	17,6 %
labor_cost	320 400	50 623	15,8 %
total_labor	320 400	50 622	15,8 %
purchase_cost	320 400	0	0 %
feeding_cost	320 400	282 914	88,3 %
total_selling	320 400	282 526	88,2 %
net_gain	320 400	281 039	87,7 %
net_gain_without_labor	320 400	281 250	87,8 %

Tableau XXIX : Calcul des statistiques de Wilcoxon apparié pour les coûts entre les scénarios avec des couvertures vaccinales de 50 % et de 100 %

Type	V_max	V	proportion_V
treatments_cost	320 400	90 391	28,2 %
labor_cost	320 400	76 049	23,7 %
total_labor	320 400	76 055	23,7 %
purchase_cost	320 400	0	0 %
feeding_cost	320 400	280 831	87,7 %
total_selling	320 400	279 149	87,1 %
net_gain	320 400	276 094	86,2 %
net_gain_without_labor	320 400	276 677	86,4 %

D) Interactions des différents composants de scénario entre eux

1/ Comparaison des résultats en fonction des différents scénarios

En traçant le résultat en fonction des différents composants de scénario, on peut observer les différentes interactions positives ou négatives entre eux, et retrouver des résultats déjà observés auparavant (Figure 39).

Quels que soient les scénarios, plus on augmente la couverture vaccinale, plus le résultat est important. Cependant, la pente de la courbe est plus ou moins importante en fonction des composants. En effet, les vaccins monovalents sont beaucoup moins performants, et la pente des courbes est faiblement positive. Ainsi, on a une différence de seulement 8 773,74 €¹ de résultats entre la moyenne des simulations du scénario « no_vax_mixed_batches_metaphylaxis » et « monovalent_vax_on_arrival_coverage_1_mixed_batches_metaphylaxis », alors que l'on a une différence de moyenne de 28 812 €¹ (Figure 38) entre le sous-composant « coverage_0 » et le sous-composant « coverage_1 ». De plus, la pente est plus importante pour les vaccins réalisés avant l'arrivée en élevage.

Les scénarios avec traitements métaphylactiques ont un résultat supérieur ou similaire aux scénarios sans traitement métaphylactique. En effet, la métaphylaxie ne semble pas nécessaire à partir d'une vaccination de 80 % des animaux avec un vaccin divalent avant l'arrivée et des lots

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

triés, une vaccination de 70 % des animaux avec un vaccin divalent avant l'arrivée et des lots mixtes, une vaccination de 100 % des animaux avec un vaccin monovalent avant l'arrivée, quelle que soit la formation des lots. De plus, on retrouve la diminution de la variabilité des simulations pour les scénarios avec les traitements métaphylactiques.

Comme précédemment, l'effet de la composition des lots est très faible. Cependant, il semble qu'il y ait une diminution de la variabilité des simulations avec les lots composés aléatoirement pour des couvertures vaccinales entre 50 et 80 %. Ainsi, on décrit une protection de lot plus importante en moyenne dans les lots composés à 50-80 % d'animaux vaccinés, que des lots composés à 100 % ou 0 % d'animaux vaccinés, mais avec un nombre équivalent d'animaux vaccinés dans l'élevage.

Les meilleurs scénarios en moyenne sont « divalent_vax_at_purchase_coverage_1_mixed_batches_metaphylaxis » avec un résultat de 121 424,02 €¹, « divalent_vax_at_purchase_coverage_1_sorted_batches_metaphylaxis » avec un résultat de 121 689,81 €¹, « divalent_vax_at_purchase_coverage_1_mixed_batches_no_metaphylaxis » avec un résultat de 122 209,02 €¹, et « divalent_vax_at_purchase_coverage_1_sorted_batches_no_metaphylaxis » avec un résultat de 121 979,22 €¹. Ainsi, on remarque que les meilleurs scénarios sont les scénarios avec 100 % de couverture vaccinale et des vaccins divalents réalisés avant l'arrivée des animaux dans l'élevage engraisseur.

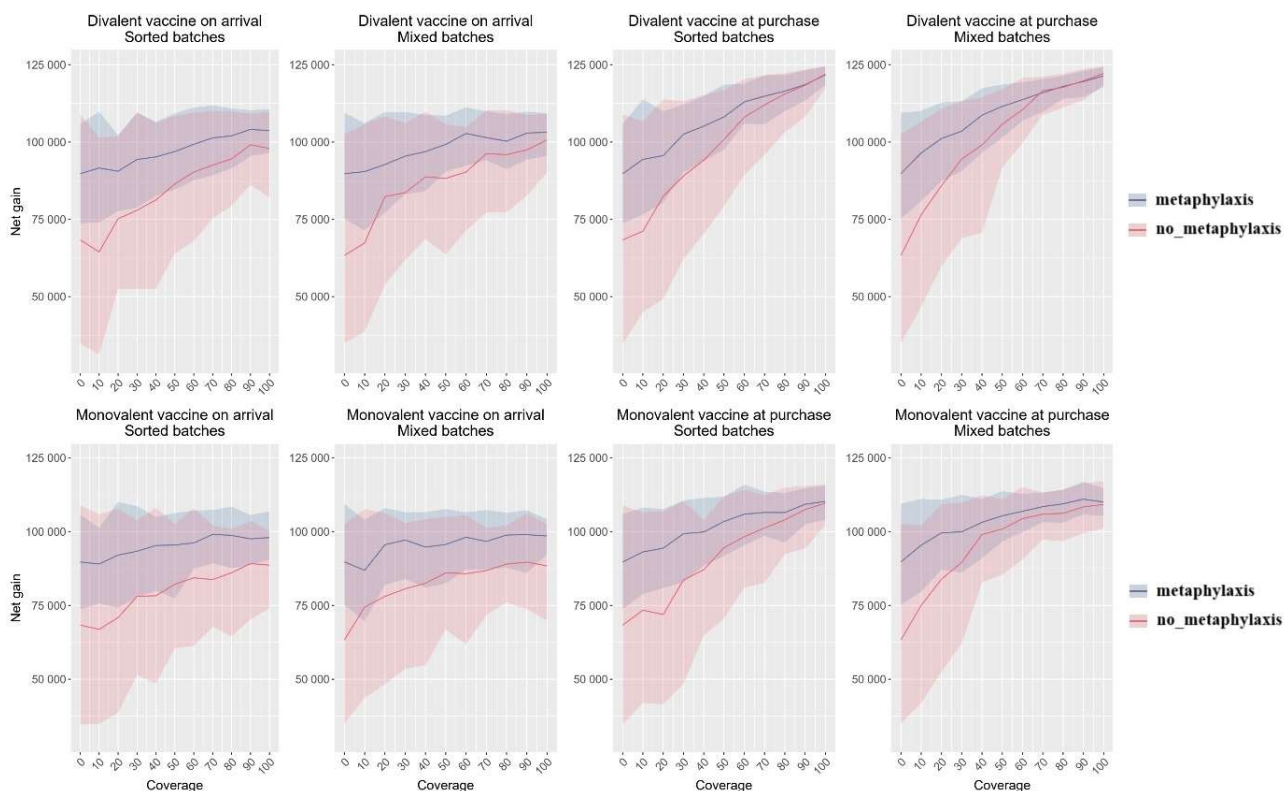


Figure 39 : Résultat net en fonction de la couverture vaccinale par type de vaccin et composition des lots

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

2/ Comparaison de la charge de travail en fonction des différents scénarios

On retrouve les mêmes tendances entre les Figures 39 et 40, en ayant des pentes de valeurs opposées, c'est-à-dire en symétrie horizontale. Ce résultat est cohérent et attendu : moins il y a d'impact économique des BRD, moins il y a de charge de travail.

Cependant, il y a plusieurs différences notables avec le graphe précédent. Les scénarios avec la possibilité de réaliser des traitements métaphylactiques présentent une charge de travail supérieure avec des vaccins réalisés avant l'arrivée dès que la couverture vaccinale est supérieure à 30 à 50 % des animaux, ou des vaccins divalents réalisés à l'arrivée avec une couverture vaccinale supérieure à 70 %. Les traitements métaphylactiques diminuent la charge de travail si la couverture vaccinale est inférieure à 20 %. Entre ces deux limites, la réalisation d'un traitement métaphylactique ne change pas la quantité de travail.

Plus la couverture vaccinale est élevée, moins la charge de travail est importante. Cela signifie que la charge de travail nécessaire pour la réalisation de la vaccination est compensée voir largement compensée par la diminution des traitements réalisés.

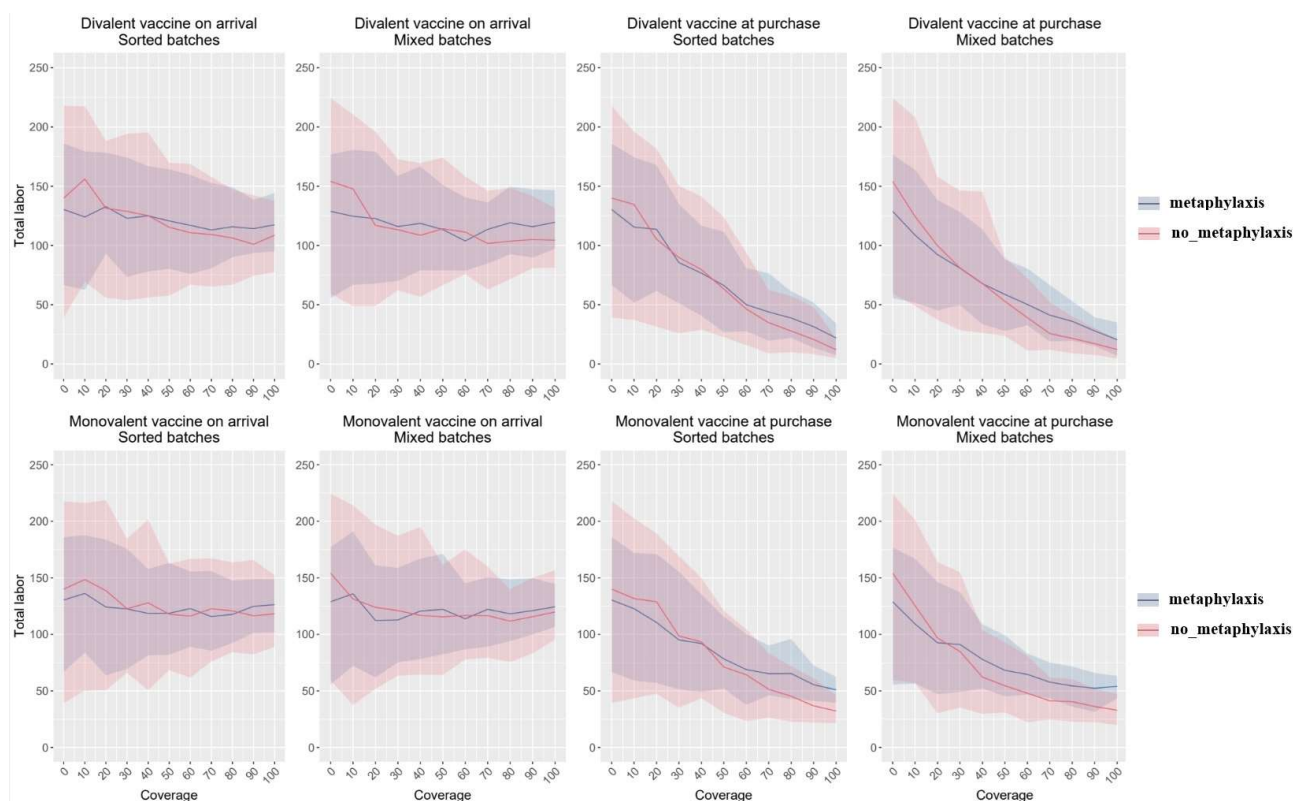


Figure 40 : Charge de travail en fonction de la couverture vaccinale par type de vaccin et composition des lots

3/ Impact des composants de scénario dans la survie des animaux en fonction de l'intensité des traitements

On distingue deux tendances dans la Figure 41, en observant le nombre de morts par le nombre de traitements antibiotiques utilisés pendant l'engraissement. La première est une droite verticale entre 0 et 5 morts par engraissement, constituée de tous les scénarios avec de la métaphylaxie, et de certains scénarios sans métaphylaxie, présentant peu de traitements antibiotiques utilisés pendant l'engraissement (<200 antibiotiques). Dans le second cas, il s'agit des scénarios avec une forte couverture vaccinale, ou de rares scénarios avec peu d'incidence de BRD. La deuxième tendance est une droite oblique de pente croissante ($\sim 0,05$), constituée exclusivement des scénarios sans métaphylaxie.

De plus, on observe une augmentation de l'utilisation d'antibiotiques avec la diminution de la couverture vaccinale dans l'élevage, visualisable par un dégradé allant du jaune au violet. Ces résultats sont concordants avec les Figures 38 et 40. On observe une distinction sur le nombre d'antibiotiques utilisés entre les scénarios avec des traitements métaphylactiques et ceux sans. En effet, on observe sur toutes les couvertures vaccinales différentes, qu'il y a plus de traitements antibiotiques lors de l'utilisation de la métaphylaxie, même lors de couverture vaccinale élevée. Ce phénomène est moins net pour les scénarios avec des vaccins divalents réalisés avant l'arrivée en élevage lors de couverture vaccinale de 90 à 100 %.

La composition des lots ne semble pas avoir d'influence sur la mortalité ni sur le nombre d'antibiotiques utilisés. De même, le type de vaccin et la temporalité de la vaccination ne semblent pas avoir d'influence sur la quantité d'antibiotiques utilisés pendant l'engraissement. Cependant, on observe un très léger décalage vers un nombre de morts plus important lorsque l'on réalise la vaccination après l'arrivée des JB dans l'élevage. L'utilisation d'un vaccin divalent ou monovalent ne semble pas avoir d'effet sur la mortalité des JB.

4/ Valorisation des broutards vaccinés

Comme vu en **Partie 2.C.3** et **Partie 2.D.1**, les scénarios avec une vaccination réalisée avant l'arrivée dans l'élevage présentent de meilleurs résultats que les scénarios avec une vaccination réalisée à l'arrivée. Afin d'estimer la valorisation possible des broutards achetés vaccinés, j'ai réalisé des calculs de bénéfices supplémentaires par broutard acheté (Eq.10). Les mêmes calculs sont réalisés pour les scénarios avec des vaccins monovalents. On se rend compte que lors de couverture vaccinale faible, il est possible d'avoir des pertes (Tableau XXX). A partir de 50 % de couverture vaccinale pour les vaccins divalents, et 60 % pour les vaccins monovalents, les broutards achetés vaccinés présentent un bénéfice certain. Plus la couverture vaccinale augmente, plus le bénéfice par broutard acheté vacciné est important, allant jusqu'à 320 €¹ par broutard pour les vaccins divalents et 193 €¹ pour les vaccins monovalents. En considérant un seuil moins élevé avec la moyenne plutôt que le maximum, les broutards achetés vaccinés sont rentables à partir de 30 % de couverture vaccinale pour les vaccins divalents et 50 % pour les vaccins monovalents.

1 Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

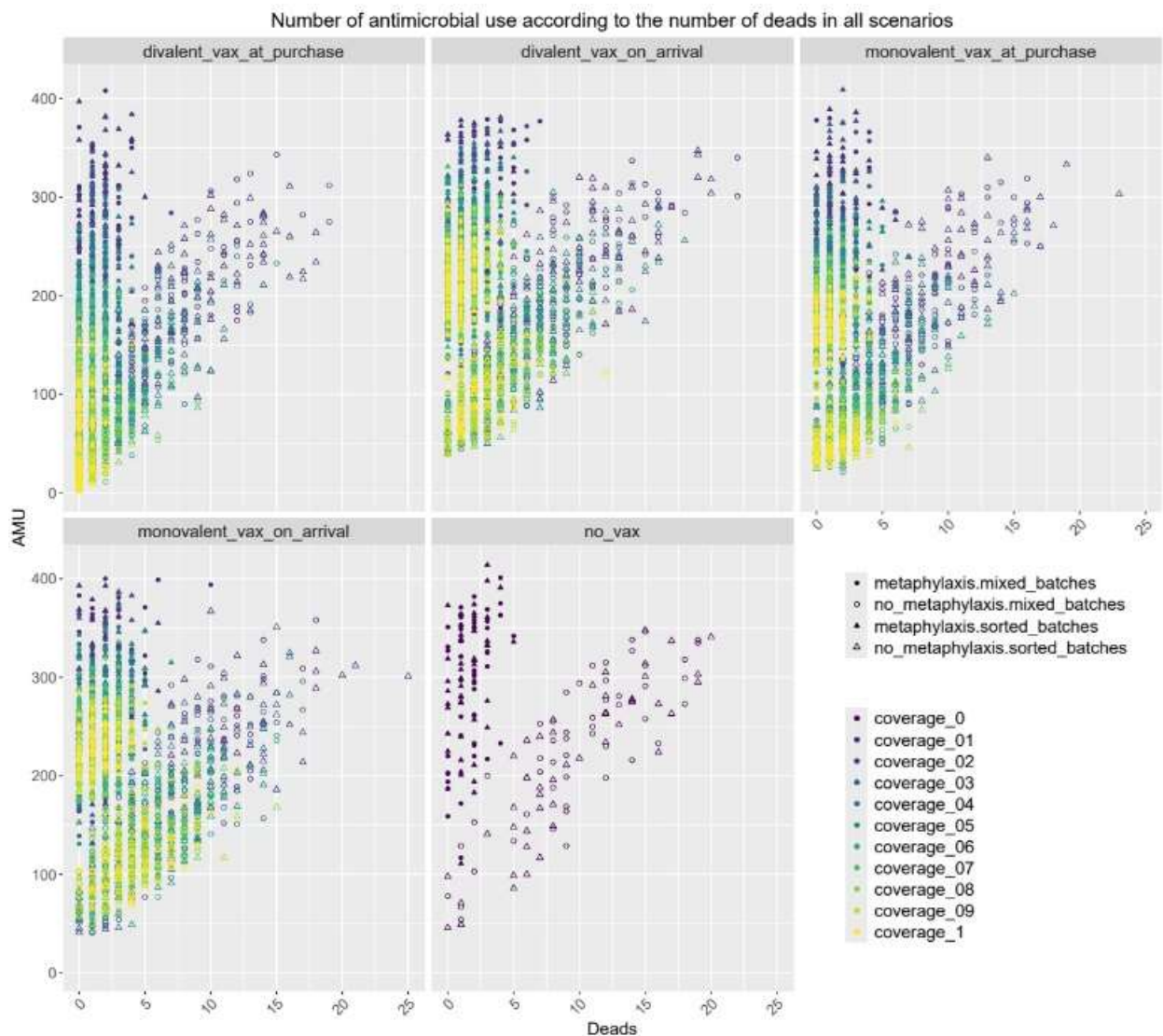


Figure 41 : Comparaison du nombre de morts en fonction du nombre d'antibiotiques utilisés pour tous les scénarios

(10)

$$\text{difference_div_max} = \min(\text{net_gain_div_purchase}_{\text{coverage}}) - \max(\text{net_gain_div_arrival}_{\text{coverage}})$$

$$\text{difference_div_mean} = \min(\text{net_gain_div_purchase}_{\text{coverage}}) - \text{mean}(\text{net_gain_div_arrival}_{\text{coverage}})$$

$$\text{cost_div_max} = \text{difference_div_max} \times \text{coverage} \times \text{total_population}$$

$$\text{cost_div_mean} = \text{difference_div_mean} \times \text{coverage} \times \text{total_population}$$

Avec :

- div = vaccin divalent
- coverage = pour une même valeur de coverage
- coverage = couverture vaccinale du troupeau en pourcentage

Tableau XXX : Différence de résultats par animal vacciné par couverture vaccinale entre vaccin réalisé avant l'arrivée en élevage et après

coverage	cost_div_max	cost_div_mean	cost_mono_max	cost_mono_mean
10	-3669,2	-1307,0	-2814,3	-1067,0
20	-923,4	-246,5	-2126,5	-1099,0
30	-383,7	72,1	-812,7	-220,8
40	-125,1	161,9	-368,7	-27,3
50	57,7	292,1	-39,6	169,8
60	157,4	371,0	5,5	215,7
70	271,7	363,1	55,9	248,7
80	304,6	390,6	116,4	244,0
90	284,6	349,1	170,5	273,0
100	320,1	361,3	192,8	285,2

Points clés des résultats :

- Des efficacités vaccinales différentes : la vaccination avant l'arrivée de JB en engraissement est largement plus favorable que la vaccination réalisée à l'arrivée ; la vaccination avec un vaccin divalent est plus favorable économiquement qu'un vaccin monovalent ; plus la couverture vaccinale est élevée, plus le résultat est élevé et moins d'antibiotiques sont nécessaires.
- La réalisation d'un traitement métaphylactique diminue fortement la variabilité des résultats économiques, diminue la mortalité et donne de meilleurs résultats si la vaccination n'est pas pleinement efficace. Lors de vaccination efficace, la métaphylaxie rajoute une charge de travail supplémentaire et un nombre d'antibiotiques utilisés supplémentaires non négligeables.
- La réalisation de lots avec une couverture vaccinale de 50 à 80 % présente des résultats favorables.
- Les meilleurs contrôles testés, du point de vue économique, de la charge de travail, du nombre d'antibiotiques utilisés, et de la mortalité pendant l'engraissement sont une couverture vaccinale de 100 % des animaux avec une vaccination réalisée avant l'arrivée dans l'élevage avec un vaccin divalent.
- Une valorisation des broutards achetés vaccinés variable en fonction de la couverture vaccinale, mais pouvant être élevée.

IV/ Discussion

A) Puissance de calcul et production des simulations

Lors de ma thèse, j'ai utilisé un ordinateur portable fourni par INRAE et exclusivement dédié à ma thèse, fonctionnant sous Linux. Avec cet équipement, la production de mes simulations était relativement lente, avec une production de 50 simulations d'un scénario en 45 min, soit la

réalisation de mes 164 scénarios en plus de 123h. Faire fonctionner le logiciel autant de temps est à la source de multiples erreurs. Ainsi, je n'ai pas pu sortir tous les scénarios en une seule fois. J'ai dû lancer des simulations de plus petites tailles, afin de limiter la durée de fonctionnement. Pour corriger ce problème, il faut augmenter la puissance de calcul. Pour cela, on peut soit changer d'ordinateur, qui est effectivement peu performant, soit passer par un serveur de calcul. Sorin-Dupont (222) a réalisé les mêmes simulations que moi, mais sur un serveur de calcul externe appartenant à INRAE. Ainsi, il a pu réaliser 500 simulations pour chacun des 164 scénarios en environ 12h.

La réalisation en parallèle de résultats à partir de 500 simulations par scénario me permet de confirmer et d'affiner les résultats observés avec 50 simulations par scénario. En effet, les résultats obtenus sont similaires, c'est-à-dire que l'on observe les mêmes tendances, avec des courbes plus lisses, avec cependant de légères différences. En effet, dans les résultats de Sorin-Dupont, on observe que la métaphylaxie devient moins rentable pour les scénarios avec des vaccins réalisés avant l'arrivée dans l'élevage et avec une couverture vaccinale supérieure à 60 % (Annexe 13) (222).

B) Validité du modèle économique

1/ Les hypothèses des modèles

a) Les hypothèses du modèle BRDcoinfmodel

Plusieurs hypothèses ont été réalisées sur le modèle BRDcoinfmodel. La principale hypothèse est la réduction des agents pathogènes à un couple virus/bactérie. Cette hypothèse implique un manque de variabilités clinique, diagnostique et de réponses aux traitements. En effet, les traitements antibiotiques sont considérés comme efficaces et dirigés systématiquement contre les PASTEURELLACEAE, alors que, comme vu en **Partie 1.III.B**, d'autres bactéries peuvent aussi intervenir, et notamment les Mycoplasmes. Bien que certains antibiotiques aient un spectre dirigé contre les PASTEURELLACEAE et les Mycoplasmes, ce n'est pas le cas de tous les antibiotiques utilisés lors de BRD. Comme la majorité des modèles épidémiologiques, le modèle ne prend pas en compte la possibilité d'avoir des maladies concomitantes, qui le complexifierait fortement.

De plus, l'efficacité de la vaccination repose sur des résultats de laboratoire sur les vaccins dirigés contre le VRSB et *M. haemolytica*. Cependant, la vaccination contre les autres agents pathogènes semble moins efficace, avec un certain nombre d'échecs vaccinaux décrit (208,231).

Enfin, la réalisation des traitements métaphylactiques se base sur un seuil d'incidence de 10 % en 24h, qui est le seul seuil décrit pour choisir objectivement quand réaliser un traitement métaphylactique (215).

b) Les hypothèses du modèle économique

Il y a plusieurs limites dans les calculs réalisés. Sur le calcul du gain des ventes, la plus grosse limite est sur le calcul de la diminution du GMQ en fonction du statut clinique. En effet, ce calcul se base sur les valeurs trouvées par l'article de Blakebrough-Hall et al (8). Il s'agit de l'article

le plus récent que j'ai trouvé sur l'étude du GMQ en fin d'engraissement lors d'épidémies de BRD, mais c'est aussi un article avec des valeurs du GMQ, pour les animaux sains comme malades, plus élevées que les autres articles (12,31,88). Afin de limiter la surévaluation, j'ai réalisé un produit en croix en fonction du GMQ utilisé des animaux sains.

De plus, j'ai réalisé mes calculs sur une durée d'engraissement fixe, alors que sur le terrain, la durée d'engraissement est plutôt augmentée pour les animaux malades, ce qui induit des coûts supplémentaires d'alimentation, mais aussi un gain supplémentaire des ventes. Cependant, l'augmentation de la durée d'engraissement peut empêcher la mise en place d'un nouvel engraissement dans l'élevage, ce qui induit une perte économique importante pour l'élevage. Comme l'analyse économique est réalisée sur un engraissement, et non pas sur l'année, cet impact n'est pas pris en compte.

Concernant le coût de l'alimentation, j'ai trouvé un coût en fonction du poids gagné par l'animal. Cependant, un animal malade, qui respire mal, va avoir besoin de plus d'énergie qu'un animal en bonne santé, qui va plus facilement utiliser de l'énergie pour gagner en muscles et en graisse (232). A l'inverse, un animal malade peut avoir tendance à avoir de la dysorexie ou de l'anorexie, et moins consommer de nourriture.

Le coût des traitements est sous-évalué : la marge du vétérinaire n'est pas prise en compte, alors qu'elle compte pour 30 à 50 % du prix des traitements. Dans le cadre de nos résultats, cette différence est négligeable. En effet, le coût des traitements compte pour environ 2,6 % de nos résultats d'engraissement (calcul basé sur les moyennes issues de la Figure 34). Si on souhaite corriger cette approximation, il faudrait réaliser un sondage auprès des vétérinaires afin d'estimer correctement le prix actuel. Dans le cadre de l'outil d'aide à la décision, ces valeurs sont modifiables par les utilisateurs.

Les calculs du temps de travail ne prennent pas en compte le temps de détection de la maladie. Mais on peut se demander si le temps nécessaire pour le diagnostic de la maladie ne rentre pas dans un temps de surveillance du troupeau, qu'il y ait présence ou non d'animaux malades. De plus, les estimations des différents temps de traitements et de la vaccination sont approximatives, basées sur une source aux États-Unis, sur des sondages sur des veaux et des génisses (98). Enfin, ces temps peuvent être très variable en fonction des élevages, notamment en fonction des moyens de contention de l'élevage.

Enfin, les calculs économiques ne prennent pas en compte les faux positifs, qui sont rares dans le modèle. Dans le modèle de Heinen et al. moins de 1 % des animaux sont faux positifs, mais ces animaux représentent dans leur analyse économique une perte de 726,69 €¹/animal (119).

En somme, avec toutes les limites décrites, et sachant que l'on ne considère que la BRD comme maladie pendant l'engraissement, il est illusoire de penser que le modèle économique est prédictif. Son intérêt consiste à permettre de classer les scénarios les uns par rapport aux autres, afin de conseiller la mise en place de plan de contrôle de la BRD.

2/ Confrontation du modèle au terrain

Les résultats obtenus par l'analyse coût/bénéfice sont cohérents avec les résultats sur le terrain en France. En effet, on obtient par le modèle économique un coût de l'alimentation allant de 33 346,76 à 62 132,86 €¹ par engraissement. D'après l'élevage type de Inosys réseaux d'élevage, un élevage engraisseur de charolais à un coût de 82 562 €/an pour l'alimentation, soit de 53 732 €¹ par

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

engraissement (86). De même, un élevage engraisseur de charolais vend 171 460 kg de viande par an à 3,13 €/kg de viande, soit un gain des ventes de 348 821 €¹ par engraissement (86). Or, dans nos simulations, le gain des ventes varie entre 272 340,70 et 400 881,4 €¹, avec un gain maximal théorique à 401 450,30 €¹. Concernant le coût des traitements, un élevage engraisseur de charolais a 4 991 € de frais vétérinaires par an, soit 3 248 €¹ de frais vétérinaires par engraissement (86). Dans nos simulations, le coût des traitements varie entre 26 et 5 382 €¹. Comme précisé précédemment, je pense que l'on est légèrement trop faible par rapport au terrain, la moyenne du scénario « no_vax_mixed_batches_no_metaphylaxis » est de 2 978 €¹, alors qu'il s'agit d'un scénario très défavorable lors d'épidémie de BRD. Enfin, un élevage engraisseur de charolais a une marge brute de l'atelier d'engraissement de 136 289 €/an, soit de 88 698 €¹ par engraissement (86). Dans le modèle, les résultats varient entre 19 665,36 et 125 438 €¹, avec un maximum théorique à 125 894 €¹.

Ainsi, les valeurs obtenues pour les différents calculs du modèle économique sont dans les bons ordres de grandeurs, et semblent bien coller au terrain, pour les élevages du grand ouest. Il serait intéressant, en adaptant les paramètres économiques d'entrée, de vérifier la pertinence du modèle économique avec un autre type d'élevage d'engraissement français.

Cependant, ces résultats diffèrent de celles de la bibliographie avec des expérimentations sur le terrain. En effet, Blakebrough-Hall et al. obtiennent en Australie un rendement net par animal de 91,04 €¹ en moyenne, ce qui est très largement inférieur au rendement obtenu dans nos simulations (avec une moyenne de 536,79 €¹/JB). Cette différence provient d'une différence entre gain à l'abattoir et achat de broutard très faible dans l'article (378,88 €¹/animal) par rapport à notre modèle (853,26 €¹/animal) (8). Schneider et al. ont trouvé aux États-Unis un gain de vente des animaux non traités de 794,48 €¹/animal (13). Cette différence semble être liée à des cours différents de la viande et des animaux entre les pays. Cependant, on tombe sur des chiffres similaires avec d'autres modèles réalisés sur la BRD. Heinen et al. ont réalisé en 2024 un modèle économique basé sur la détection de la BRD, et ont trouvé des revenus net de 999,80 €¹/vrai négatif, 283,14 €¹/vrai positif (119).

Concernant le temps de travail, mes évaluations semblent réalistes, avec des simulations indiquant beaucoup d'heures supplémentaires et d'autres très peu. La bibliographie est très pauvre en données pour pouvoir correctement apprécier la pertinence des résultats trouvés avec le modèle. Chez les veaux avant sevrage, Dubrovsky et al. estiment que le coût du travail représente 40 % des coûts supplémentaires en tenant compte du coût des médicaments et de la perte due à la baisse du GMQ lors de cas de BRD (99). Dans nos résultats, le coût du travail représente moins de 2 % des pertes.

C) Discussion des résultats obtenus

Au vu des résultats, réaliser des lots aléatoirement lorsque la couverture vaccinale est comprise entre 50 et 80 % est plus bénéfique que trier les animaux en fonction de leur statut vaccinal. J'assimile ce résultat au phénomène de protection collectif lors de vaccination d'une forte proportion d'individus. En effet, lors de la vaccination d'une population suffisante d'individus, on diminue le taux de transmission de la maladie, même chez les individus non vaccinés. Cette proportion d'individus vaccinés à atteindre dépend de la maladie, de la taille de la population, de l'immunité des individus, et donc des vaccins réalisés (233,234). Peu d'articles font référence à ce

¹ Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

phénomène dans le cadre des maladies respiratoires bovines (235). Cependant, il a déjà été décrit chez les bovins dans le cadre de la vaccination contre la BVD, avec une diminution de la transmission du virus de 48 % (236).

Il serait intéressant de voir l'influence de la composition des lots si on choisit de réaliser un maximum de lots avec 50 à 80 % d'animaux vaccinés. Par exemple, pour mes 9 lots de 20 JB de mon expérimentation, si j'ai 45 JB vaccinés (soit 25% de mes 180), je réalise 3 lots avec 15 JB vaccinés (soit une couverture de 75% dans le lot) et je répartirais aléatoirement le reste dans les 6 lots restants. Ainsi, on diminuerait le risque individuel des 15 JB non vaccinés se trouvant dans les lots avec une couverture vaccinale de 75 %.

Les résultats montrent que la métaphylaxie augmente les bénéfices si la BRD est mal maîtrisée dans l'élevage et diminue fortement la variation, en diminuant le nombre de simulations très défavorables, notamment en diminuant la mortalité. A l'inverse, si la BRD est bien contrôlée, la métaphylaxie rajoute un coût associé à une augmentation du nombre de traitements antibiotiques et une charge de travail, sans effet bénéfique perceptible. Dans l'analyse précise des données, on se rend compte que les traitements métaphylactiques sont quasi-systématiquement réalisés malgré un contrôle satisfaisant par la vaccination. Ceci implique que le seuil choisi à ne pas dépasser pour ne pas réaliser de traitement métaphylactique n'est pas efficace. Ce seuil d'incidence de 10 % en 24h basé sur l'article de Edwards (215) ne se retrouve pas autre part dans la littérature et n'est pas efficace pour distinguer quand réaliser un traitement métaphylactique. Une modélisation montre qu'il faut au moins 20 % de morbidité prévue pour qu'un traitement métaphylactique soit rentable. En effet, pour que le traitement métaphylactique soit le plus efficace, il faut qu'il soit réalisé tôt, et non pendant l'épidémie. C'est pourquoi on parle de morbidité prévue (111). On peut aussi se demander s'il est pertinent de regarder une incidence ou une morbidité, qui décrit l'épidémie à un instant t , plutôt qu'une pente de courbe d'incidence ou de morbidité, qui décrit une évolution de l'épidémie.

Il n'y a pas d'évaluation économique liée à la réalisation de la vaccination avant l'engraissement des JB dans la bibliographie. Cependant, plusieurs études ont étudié la diminution de la morbidité et de la mortalité des différentes conditions de vaccination. Ainsi, Tresse et al. montrent que la vaccination avant l'arrivée en engraissement diminue la morbidité de 7 % et le nombre de traitements de 12 % (209). Mounaix et al. trouvent des résultats similaires, en montrant aussi une amélioration du GMQ et une diminution de la durée d'engraissement (90). Le temps nécessaire à l'acquisition de l'immunité lors de la réalisation de la vaccination en engraissement constitue une période à risque pour les JB. Dans l'étude, on a un résultat supérieur de 59 à 76 €/JB en moyenne de la vaccination avant l'arrivée en engraissement plutôt que à l'arrivée. Comme vu en **Partie 2.II.C.3.a**, le calcul économique ne prend pas en compte le coût plus élevé de ces broutards vaccinés. En **Partie 1.II.F** nous avons vu un coût supplémentaire entre 25 et 50 € en 2023 par animal vacciné, soit un coût supplémentaire entre 3 859 et 7 718 €¹ pour 180 animaux. Les résultats montrent que le montant de cette valorisation peut engranger des pertes par rapport à la réalisation des vaccins à l'arrivée pour des couvertures vaccinales faibles, dans les simulations les plus défavorables. Cependant, lors de couverture vaccinale élevée, les bénéfices par broutard vacciné semblent largement supérieur à la valorisation actuelle en France. De plus, les bénéfices sont différents selon le type de vaccin utilisé. Il pourrait être intéressant d'avoir une valorisation différente des broutards vaccinés en fonction du vaccin utilisé. Enfin, il ne semble pas aberrant de proposer au vu des résultats une augmentation de la valorisation des broutards pour les élevages naisseurs, ce qui permettrait de favoriser la mise en place d'une traçabilité de la vaccination entre

1 Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

naisseurs et engraisseurs.

Les résultats du modèle économique montrent de meilleures performances de la vaccination lors de l'utilisation d'un vaccin divalent, avec des résultats supérieurs de 21 à 37 €/JB en moyenne. Wildman et al. ont un résultat similaire en montrant un résultat plus élevé (+ 17 €/JB) chez les jeunes bovins vaccinés avec un vaccin ayant une couverture plus large contre les bactéries plutôt qu'un vaccin avec une meilleure couverture vaccinale contre les virus (97). Ces résultats sont cohérents, car en protégeant spécifiquement contre les agents pathogènes circulants, on diminue la transmission et l'apparition de signes cliniques, et donc l'impact de la BRD dans l'élevage.

D) Création d'un outil d'aide à la décision

Il n'existe que très peu de modèles épidémiologiques avec une co-infection de plusieurs agents pathogènes, et ces modèles sont sur des maladies humaines (237–239). Une revue de la littérature en 2024 sur les modèles de co-infections répertorie 69 articles, dont 72 % sont des modèles sur des maladies humaines, et 28 % sur des maladies animales, dont 2 sur les maladies respiratoires chez l'homme uniquement (240).

Aujourd'hui, il existe assez peu d'outils d'aide à la décision pour le contrôle de la BRD (241). La plupart de ces outils sont développés via des modèles épidémiologiques, socio-économiques ou les deux en même temps. Les outils existants ont pour objectif de mesurer les pertes dues aux BRD à l'échelle nationale (232,242), à l'échelle des élevages laitiers (243), ou à l'échelle des élevages engraisseurs (119). Le modèle développé en 2024 par Heinen et al. a pour objectif une détection précoce de cas de BRD, afin de diminuer le nombre de cas et le coût de la BRD, par la réalisation précoce de traitements individuels (119).

La discussion entre le vétérinaire et l'éleveur est importante afin de correctement mettre en place des mesures de contrôle de la BRD. Il est important que le vétérinaire prenne en compte les contraintes et les volontés de l'éleveur pour réaliser ses recommandations. Les résultats sur le temps de travail nécessaire aux différents contrôles de la BRD sont un argument à mettre en avant lors des discussions, afin de s'assurer que la charge soit acceptable pour l'éleveur. De plus, la survie des animaux a un impact sur les revenus de l'engraissement, l'éthique de l'élevage, et le bien-être de l'éleveur. En effet, l'éthique veut que l'on évite un maximum de morts pendant l'élevage, si réalisable. La notion de réalisable est subjective et la frontière entre réalisable et non réalisable peut être fine. La mort d'un animal dégrade le bien-être de l'éleveur. Ainsi, la diminution de la mortalité comme argument social peut être mis en avant par le vétérinaire. Enfin, dans la continuité du plan Ecoantibio mis en place en 2011 et poursuivi en 2023 par le plan Ecoantibio 3 (244), la diminution du nombre de traitements antibiotiques peut être conseillée par le vétérinaire.

Sur le terrain, les freins à la mise en place des traitements métaglyctiques et/ou de la vaccination sont leur coût et le temps de travail associé (208). Pourtant, on se rend compte que le coût est dérisoire par rapport aux autres coûts de l'engraissement. Cependant, en se mettant du point de vue de l'éleveur, les coûts d'achats et de l'alimentation ne sont pas des coûts variables. En effet, quoi qu'il arrive, l'éleveur va acheter les animaux, et les nourrir. Ce sont donc des coûts obligatoires, sur lesquels on ne peut pas jouer directement. Inversement, les coûts des soins et de vétérinaires sont des coûts variables, que l'on peut essayer de diminuer. Ainsi, malgré la faible part du coût des traitements, c'est le coût sur lequel les éleveurs jouent le plus. Pourtant, au vu des

1 Coût déflaté et converti en € si nécessaire (Annexe 5)

résultats de l'analyse coût/bénéfice, la mise en place de la métaphylaxie et de la vaccination augmente fortement les revenus lors d'épidémie de BRD. En effet, un certain nombre d'éleveurs ne voient pas les bénéfices réalisés par la vente des animaux lorsque la BRD est bien maîtrisée. De même, le temps nécessaire afin de réaliser les traitements métaphylactiques et la vaccination est nettement plus faible que le temps nécessaire pour réaliser les traitements individuels. De plus, il faut prendre en compte que le temps pour réaliser la métaphylaxie et la vaccination est un temps prévisible, l'éleveur peut organiser son emploi du temps en fonction.

De manière générale, on peut conseiller aux éleveurs engraisseurs d'acheter le plus possible d'animaux vaccinés, et de ne réaliser des traitements métaphylactiques que si nécessaire. En effet, les traitements métaphylactiques n'ont que peu d'intérêt lors de bonnes maîtrises de la BRD, mais constituent une source importante d'antibiotiques. Or, quand c'est possible, il est bon et nécessaire de réduire le nombre d'antibiotiques utilisés, afin de réduire l'apparition et le développement de résistances bactériennes (cf. **Partie 1.II.D.4**). Cependant, au vu de la structure de la filière française aujourd'hui, cela nécessite d'améliorer la transmission des informations vaccinales des brouards entre les naisseurs et les engraisseurs (5).

E) Perspectives

1/ Vers un outil d'aide à la décision ?

Un des objectifs de cette thèse était de se rapprocher de la création d'un outil d'aide à la décision pour les vétérinaires, afin de choisir avec les éleveurs les mesures de contrôle à mettre en place pendant l'engraissement des jeunes bovins (JB). Nous avons vu qu'il restait cependant un certain nombre de corrections à réaliser afin d'aboutir à un outil fonctionnel et mobilisable sur le terrain. L'équipe DYNAMO n'a pas pour objectif de créer des outils commerciaux. La poursuite de ce travail ne peut se réaliser que si une entreprise extérieure à INRAE décide de s'intéresser à ce travail, et à reprendre le projet pour développer et vendre un tel outil.

Afin d'installer PASTE sur un ordinateur, il faut installer un certain nombre de logiciels en amont. Certains de ces logiciels ne sont pas prévus pour fonctionner sur le système d'exploitation Windows. Dans le cadre de ma thèse, j'ai dû utiliser un ordinateur avec un système d'exploitation Linux, que je ne connaissais pas. Il a fallu donc que j'appréhende ce nouveau système. Afin de produire un outil d'aide à la décision plus accessible, il peut être intéressant que PASTE puisse fonctionner sous Windows, afin d'élargir le nombre d'utilisateurs susceptibles de l'utiliser.

De plus, il est possible de complexifier l'analyse coût/bénéfice, afin d'être prédictif. Pour cela, il faudrait réaliser un bilan annuel des élevages engraisseurs, et pour cela, prendre en compte les charges/gains fixes, ignorés ici. De plus, il serait pertinent de considérer une durée d'engraissement modulable, notamment augmentée lors de signes cliniques, avec un impact sur les saisons de mise en place de nouveaux lots dans un élevage, et donc des répercussions économiques sur l'année.

Enfin, une analyse de sensibilité en réalisant des variations de chaque paramètre économique serait intéressante à faire, afin de voir l'implication des paramètres dans la variation des résultats. La connaissance de la sensibilité d'un modèle permet d'affiner les limites et forces du modèle.

2/ Création d'autres modèles économiques ?

Au cours de cette thèse, j'ai réalisé des présentations avec des chercheurs internationaux afin de présenter le modèle économique et de discuter sur la possible élaboration d'un nouveau modèle économique, basé sur celui de cette thèse, mais destiné aux veaux de boucherie, notamment aux Pays-bas et/ou en Belgique. La mise en place de ce modèle nécessiterait d'adapter le modèle BRDcoinfmodel, notamment en changeant les paramètres d'infection et en rajoutant une machine d'état décrivant la couleur de la viande lors de l'abattage, et en adaptant le modèle économique, en rajoutant un calcul de gain en fonction de la couleur de la viande de veaux, et en changeant les paramètres économiques.

Conclusions

Les maladies respiratoires chez les jeunes bovins sont une source importante de pertes économiques chez les engraisseurs. La mise en place des bons traitements curatifs et préventifs, ainsi que l'amélioration de la maîtrise de l'élevage peuvent permettre une amélioration des revenus et de la charge de travail des éleveurs.

Le développement d'outils d'aide à la décision favorise la communication entre vétérinaires et éleveurs afin de mettre en place des mesures adaptées à l'élevage, et acceptées par l'éleveur. Cependant, le développement d'outils spécifiques est long et coûteux. Ainsi, le développement d'un logiciel d'aide à la création de tels outils permettrait d'accélérer leur développement et de diminuer leur coût de production. PASTE remplit correctement ce rôle, mais pourrait être encore plus performant en réalisant certaines modifications ergonomiques et fonctionnelles.

La création d'un prototype d'outil d'aide à la décision basé sur le modèle BRDcoinfmodel développé par Baptiste Sorin-Dupont a permis de réaliser une analyse coût-bénéfice sur différentes mesures de contrôle de la BRD, en prenant en compte la charge de travail supplémentaire induite par ces mesures, ainsi que la quantité d'antibiotiques utilisés. Cette analyse ne permet pas de prédire les coûts et les pertes réalisés pendant un engraissement de jeunes bovins, mais permet cependant de différencier les modalités de contrôle de la BRD entre elles. Ce modèle économique peut cependant être amélioré, en réalisant une analyse sur l'année plutôt que sur l'engraissement, permettant ainsi d'aboutir à un outil à visée prédictive.

Dans ma thèse, j'ai pu montrer que la vaccination avant l'engraissement avec un vaccin dirigé contre les virus et les bactéries permettrait de diminuer les pertes et la charge de travail. Plus il y a d'animaux vaccinés, moins la BRD a d'impact économique et moins on utilise d'antibiotiques. Il est donc nécessaire d'avoir en France une meilleure communication et une traçabilité de la vaccination réalisée chez les élevages naisseurs. De plus, cette vaccination chez le naisseur pourrait être valorisée. Par ailleurs, la réalisation d'un traitement métaphylactique permettrait de limiter l'impact de la BRD lors d'engraissements à risque, en diminuant les pertes et leur variabilité, ainsi qu'en diminuant la mortalité en élevage. Cependant, la métaphylaxie n'est pas intéressante lorsque le risque épidémique est faible. Le seuil pour réaliser un traitement métaphylactique de 10 % d'incidence en 24h mobilisé pour l'heure n'est pas pertinent, et ne devrait plus être utilisé. Enfin, la réalisation de lots en regroupant les animaux selon leur statut vaccinal n'est pas pertinent. En effet, dans le modèle, les animaux bénéficient d'une protection collective contre les BRD lors d'une couverture vaccinale entre 50 et 80 %.

Bibliographie

1. INSEE. Répartition des élevages sur le territoire – Transformations de l’agriculture et des consommations alimentaires [Internet]. 2024 [cité 2 avr 2024]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/7728857?sommaire=7728903#graphique-figure1>
2. Champanhet F. Arrêté du 19 décembre 2012 fixant les exigences et recommandations en matière de certification de conformité de la viande bovine [Internet]. 81 déc 26, 2012 p. 14. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2012/12/19/AGRT1239838A/jo/texte>
3. Ministère de l’agriculture. Le bien-être et la protection des vaches à viande [Internet]. 2019 févr [cité 12 avr 2024]. Disponible sur: <https://agriculture.gouv.fr/le-bien-etre-et-la-protection-des-vaches-viande>
4. Jolivet F. Relation entre les signes cliniques et les agents étiologiques de BPI - Etude sur deux automnes consécutifs dans un atelier d’engraissement de jeunes bovins. [Nantes]: Faculté de Médecine de Nantes, Oniris, Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l’alimentation; 2021.
5. Poizat A, Duvaleix-Tréguer S, Rault A, Bonnet-Beaugrand F. Le marché des broutards en France. Organisation de la filière, transmission de l’information et qualité. *Économie Rurale*. 2019;368(2):107-27.
6. Lapuyade MA. Production bovine en 2021 : des cours élevés. *Agreste*; 2022 mai p. 9.
7. Minery S, Benoit F. Bilan de variabilité génétique à partir des données de généalogies - Races bovine allaitantes [Internet]. Institut de l’élevage; 2022 [cité 19 juin 2024]. Disponible sur: https://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F095279fc-edce-45de-928f-c50a5b3cbb72&cHash=386b36469c109971ed4d645a5f6435bf
8. Blakebrough-Hall C, McMeniman JP, González LA. An evaluation of the economic effects of bovine respiratory disease on animal performance, carcass traits, and economic outcomes in feedlot cattle defined using four BRD diagnosis methods. *J Anim Sci*. 13 janv 2020;98(2):skaa005.
9. Bonnet-Beaugrand F, Poizat A, Cornette B, Duvaleix-Treguer S, Assié S, Fourichon C, et al. Organisation économique de la filière française des jeunes bovins de boucherie, quelle influence sur une moindre utilisation d’antibiotiques ? 2018;
10. USDA. Death Loss in U.S. Cattle and calves due to predator and non-predator causes, 2015 [Internet]. United states; 2017 déc [cité 24 janv 2024]. Disponible sur: https://www.aphis.usda.gov/animal_health/nahms/general/downloads/cattle_calves_deathloss_2015.pdf
11. Griffin D. Economic impact associated with respiratory disease in beef cattle. *Vet Clin N Am FOOD Anim Pract*. 1997;13(3).
12. Joly M. Incidence, effet sur les performances et impact économique des troubles de santé des jeunes bovins en ateliers d’engraissement en Pays de la Loire. [Nantes]: Ecole Nationale

13. Schneider MJ, Tait RG, Busby WD, Reecy JM. An evaluation of bovine respiratory disease complex in feedlot cattle: Impact on performance and carcass traits using treatment records and lung lesion scores. *J Anim Sci.* mai 2009;87(5):1821-7.
14. Horton LM, Depenbusch BE, Dewsbury DM, McAtee TB, Betts NB, Renter DG. Comprehensive Outcomes Affected by Antimicrobial Metaphylaxis of Feedlot Calves at Medium-Risk for Bovine Respiratory Disease from a Randomized Controlled Trial. *Vet Sci.* 17 janv 2023;10(2):67.
15. Smith DRM, Chervet S, Pinettes T, Shirreff G, Jijón S, Oodally A, et al. How have mathematical models contributed to understanding the transmission and control of SARS-CoV-2 in healthcare settings? A systematic search and review. *J Hosp Infect.* nov 2023;141:132-41.
16. Duval A, Leclerc QJ, Guillemot D, Temime L, Opatowski L. An algorithm to build synthetic temporal contact networks based on close-proximity interactions data. *PLoS Comput Biol.* juin 2024;20(6):e1012227.
17. Djidjou-Demasse R, Selinger C, Sofonea MT. Épidémiologie mathématique et modélisation de la pandémie de Covid-19 : enjeux et diversité. *Rev Francoph Lab.* nov 2020;2020(526):63-9.
18. Sorin-Dupont B, Picault S, Pardon B, Ezanno P, Assié S. Modeling the effects of farming practices on bovine respiratory disease in a multi-batch cattle fattening farm. *Prev Vet Med.* 1 oct 2023;219:106009.
19. Picault S, Ezanno P, Smith K, Amrine D, White B, Assié S. Modelling the effects of antimicrobial metaphylaxis and pen size on bovine respiratory disease in high and low risk fattening cattle. *Vet Res.* 4 oct 2022;53(1):77.
20. Ezanno P, Fourichon C, Seegers H. Influence of herd structure and type of virus introduction on the spread of bovine viral diarrhoea virus (BVDV) within a dairy herd. *Vet Res.* 2008;39(5):39.
21. Arnoux S, Bidan F, Damman A, Petit E, Assié S, Ezanno P. To Vaccinate or Not: Impact of Bovine Viral Diarrhoea in French Cow-Calf Herds. *Vaccines.* 6 oct 2021;9(10):1137.
22. Cristancho-Fajardo L, Vergu E, Beaunée G, Arnoux S, Ezanno P. Learning and strategic imitation in modelling farmers' dynamic decisions on bovine viral diarrhoea vaccination. *Vet Res.* 2 déc 2022;53(1):102.
23. Qi L, Beaunée G, Arnoux S, Dutta BL, Joly A, Vergu E, et al. Neighbourhood contacts and trade movements drive the regional spread of bovine viral diarrhoea virus (BVDV). *Vet Res.* 29 avr 2019;50(1):30.
24. Assié S, Seegers H, Makoschey B, Désiré-Bousquié L, Bareille N. Exposure to pathogens and incidence of respiratory disease in young bulls on their arrival at fattening operations in France. *Vet Rec.* août 2009;165(7):195-9.
25. Ives SE, Richeson JT. Use of Antimicrobial Metaphylaxis for the Control of Bovine Respiratory Disease in High-Risk Cattle. *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* nov 2015;31(3):341-50.
26. Pardon B, Callens J, Maris J, Allais L, Van Praet W, Deprez P, et al. Pathogen-specific risk

factors in acute outbreaks of respiratory disease in calves. *J Dairy Sci.* mars 2020;103(3):2556-66.

27. Pratelli A, Cirone F, Capozza P, Trotta A, Corrente M, Balestrieri A, et al. Bovine respiratory disease in beef calves supported long transport stress: An epidemiological study and strategies for control and prevention. *Res Vet Sci.* 1 mars 2021;135:450-5.
28. Fanuel P. Points critiques d'une métaphylaxie raisonnée lors de troubles respiratoires des jeunes bovins de boucherie. *Bull Académie Vét Fr.* 2012;165(1):21-6.
29. Assié S, Seegers H, Beaudeau F. Incidence of respiratory disorders during housing in non-weaned Charolais calves in cow-calf farms of Pays de la Loire (western France). *Prev Vet Med.* mai 2004;63(3):271-82.
30. Jourquin S, Lowie T, Debruyne F, Chantillon L, Clinquart J, Pas ML, et al. Effect of on-arrival bovine respiratory disease vaccination on ultrasound-confirmed pneumonia and production parameters in male dairy calves: A randomized clinical trial. *J Dairy Sci.* 1 déc 2023;106(12):9260-75.
31. Thompson PN, Stone A, Schultheiss WA. Use of treatment records and lung lesion scoring to estimate the effect of respiratory disease on growth during early and late finishing periods in South African feedlot cattle. *Am Soc Anim Sci.* 2006;
32. Ruiz M, Puig A, Bassols M, Fraile L, Armengol R. Influenza D Virus: A Review and Update of Its Role in Bovine Respiratory Syndrome. *Viruses.* 5 déc 2022;14(12):2717.
33. Sreenivasan CC, Sheng Z, Wang D, Li F. Host Range, Biology, and Species Specificity of Seven-Segmented Influenza Viruses—A Comparative Review on Influenza C and D. *Pathogens.* 5 déc 2021;10(12):1583.
34. Gupta RS, Sawnani S, Adeolu M, Alnajjar S, Oren A. Phylogenetic framework for the phylum Tenericutes based on genome sequence data: proposal for the creation of a new order Mycoplasmoidales ord. nov., containing two new families Mycoplasmoidaceae fam. nov. and Metamycoplasmataceae fam. nov. harbouring Eperythrozoon, Ureaplasma and five novel genera. *Antonie Van Leeuwenhoek.* 1 sept 2018;111(9):1583-630.
35. Oren A, Garrity GM. List of new names and new combinations previously effectively, but not validly, published. *Int J Syst Evol Microbiol.* 2018;68(11):3379-93.
36. Lachowicz-Wolak A, Klimowicz-Bodys MD, Płoneczka-Janeczko K, Bykowsy M, Siedlecka M, Cinciała J, et al. The Prevalence, Coexistence, and Correlations between Seven Pathogens Detected by a PCR Method from South-Western Poland Dairy Cattle Suffering from Bovine Respiratory Disease. *Microorganisms.* 24 juill 2022;10(8):1487.
37. Antonis AFG, Swanenburg M, Wisselink HJ, Smid B, van Klink E, Hagenaars TJ. Respiratory pathogens in veal calves: Inventory of circulating pathogens. *Vet Microbiol.* nov 2022;274:109571.
38. Cirone F, Padalino B, Tullio D, Capozza P, Losurdo M, Lanave G, et al. Prevalence of Pathogens Related to Bovine Respiratory Disease Before and After Transportation in Beef Steers: Preliminary Results. *Anim Open Access J MDPI.* 6 déc 2019;9(12):1093.

39. Centeno-Martinez RE, Glidden N, Mohan S, Davidson JL, Fernández-Juricic E, Boerman JP, et al. Identification of bovine respiratory disease through the nasal microbiome. *Anim Microbiome*. 22 févr 2022;4:15.
40. Studer E, Schönecker L, Meylan M, Stucki D, Dijkman R, Holwerda M, et al. Prevalence of BRD-Related Viral Pathogens in the Upper Respiratory Tract of Swiss Veal Calves. *Anim Open Access J MDPI*. 29 juin 2021;11(7):1940.
41. Breuer W, Stoll A, Hörmansdorfer S, Knubben-Schweizer G, Hafner-Marx A, Deischl K. [Nasal, pulmonary, and abomasal aspergillosis (*Aspergillus fumigatus*) in a calf]. *Schweiz Arch Tierheilkd*. juill 2015;157(7):407-11.
42. Vestweber JG, Leipold HW. Pulmonary and mammary aspergillosis in a dairy cow. *Can Vet J*. déc 1994;35(12):780.
43. Centeno-Martinez RE, Mohan S, Davidson JL, Schoonmaker JP, Ault A, Verma MS, et al. The bovine nasal fungal community and associations with bovine respiratory disease. *Front Vet Sci*. 27 juin 2023;10:1165994.
44. Macedo LO de, Ubirajara Filho CRC, Brito RS, Santos KKF dos, Mendonça CL de, Carvalho GA de, et al. Larvoscopic study on *Dictyocaulus* sp. in the faeces of beef cattle in northeastern Brazil. *Rev Bras Parasitol Veterinária*. 19 août 2022;31:e009122.
45. McCarthy C, Dijk V. Spatiotemporal trends in cattle lungworm disease (*Dictyocaulus viviparus*) in Great Britain from 1975 to 2014. *Vet Rec*. 27 juin 2020;186(19):642.
46. National Agricultural Statistics Service. Cattle Death loss 05-12-2011 [Internet]. United states: USDA; 2011 mai [cité 24 janv 2024]. Disponible sur: <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/vh53wv75j/xp68kk00g/v405sd14m/CattDeath-05-12-2011.pdf>
47. Boissard V. Etude de la mortalité bovine en France métropolitaine. [Lyon]: VetAgro Sup; 2011.
48. Stokstad M, Klem T, Myrmel M, Oma V, Toftaker I, Østerås O, et al. Using Biosecurity Measures to Combat Respiratory Disease in Cattle: The Norwegian Control Program for Bovine Respiratory Syncytial Virus and Bovine Coronavirus. *Front Vet Sci* [Internet]. 4 juill 2020 [cité 18 juin 2024];7. Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32318587/>
49. Mars MH, Brusckhe CJM, van Oirschot JT. Airborne transmission of BHV1, BRSV, and BVDV among cattle is possible under experimental conditions. *Vet Microbiol*. avr 1999;66(3):197-207.
50. Sarmiento-Silva RE, Nakamura-Lopez Y, Vaughan G. Epidemiology, molecular epidemiology and evolution of bovine respiratory syncytial virus. *Viruses*. 30 nov 2012;4(12):3452-67.
51. DeRosa DC, Mechor GD, Staats JJ, Chengappa MM, Shryock TR. Comparison of *Pasteurella* spp. Simultaneously Isolated from Nasal and Transtracheal Swabs from Cattle with Clinical Signs of Bovine Respiratory Disease. *J Clin Microbiol*. janv 2000;38(1):327-32.
52. Tjørnehøj K, Uttenthal Å, Viuff B, Larsen LE, Røntved C, Rønsholt L. An experimental infection model for reproduction of calf pneumonia with bovine respiratory syncytial virus (BRSV) based on one combined exposure of calves. *Res Vet Sci*. févr 2003;74(1):55-65.

53. Valarcher JF, Taylor G. Bovine respiratory syncytial virus infection. *Vet Res.* mars 2007;38(2):153-80.
54. Sacco RE, McGill JL, Pillatzki AE, Palmer MV, Ackermann MR. Respiratory Syncytial Virus Infection in Cattle. *Vet Pathol.* mars 2014;51(2):427-36.
55. Makoschey B, Berge AC. Review on bovine respiratory syncytial virus and bovine parainfluenza – usual suspects in bovine respiratory disease – a narrative review. *BMC Vet Res.* juill 2021;17(1):261.
56. Oma VS, Tråvén M, Alenius S, Myrmel M, Stokstad M. Bovine coronavirus in naturally and experimentally exposed calves; viral shedding and the potential for transmission. *Virology*. 13 juin 2016;13:100.
57. Muylkens B, Thiry J, Kirten P, Schynts F, Thiry E. Bovine herpesvirus 1 infection and infectious bovine rhinotracheitis. *Vet Res.* 2007;38(2):181-209.
58. Biswas S, Bandyopadhyay S, Dimri U, Patra P. Bovine herpesvirus-1 (BHV-1) – a re-emerging concern in livestock: a revisit to its biology, epidemiology, diagnosis, and prophylaxis. *Vet Q.* juin 2013;33(2):68-81.
59. Ellis JA. Bovine Parainfluenza-3 Virus. *Vet Clin Food Anim Pract.* 1 nov 2010;26(3):575-93.
60. Vlasova AN, Saif LJ. Bovine Coronavirus and the Associated Diseases. *Front Vet Sci.* 31 mars 2021;8:643220.
61. Evans C, Reichel M. Non-Bovine Species and the Risk to Effective Control of Bovine Viral Diarrhoea (BVD) in Cattle. *Pathog Basel Switz* [Internet]. 30 sept 2021 [cité 19 juin 2024];10(10). Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34684212/>
62. Schweizer M, Stalder H, Haslebacher A, Grisiger M, Schwermer H, Di Labio E. Eradication of Bovine Viral Diarrhoea (BVD) in Cattle in Switzerland: Lessons Taught by the Complex Biology of the Virus. *Front Vet Sci* [Internet]. 9 juill 2021 [cité 19 juin 2024];8. Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34557540/>
63. Hage J, Schukken Y, Schols H, Maris-Veldhuis M, Rijsewijk F, Klaassen C. Transmission of bovine herpesvirus 1 within and between herds on an island with a BHV1 control programme. *Epidemiol Infect* [Internet]. juin 2003 [cité 19 juin 2024];130(3). Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12825740/>
64. Oliva J, Eichenbaum A, Belin J, Gaudino M, Guillotin J, Alzieu JP, et al. Serological Evidence of Influenza D Virus Circulation Among Cattle and Small Ruminants in France. *Viruses.* 5 juin 2019;11(6):516.
65. Neupane S, Nayduch D, Zurek L. House Flies (*Musca domestica*) Pose a Risk of Carriage and Transmission of Bacterial Pathogens Associated with Bovine Respiratory Disease (BRD). *Insects* [Internet]. 18 oct 2019 [cité 19 juin 2024];10(10). Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31635391/>
66. Richomme C, Gauthier D, Fromont E. Contact rates and exposure to inter-species disease transmission in mountain ungulates. *Epidemiol Infect* [Internet]. févr 2006 [cité 19 juin 2024];134(1). Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16409647/>

67. Griffin D. Bovine Pasteurellosis and Other Bacterial Infections of the Respiratory Tract. *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* mars 2010;26(1):57-71.
68. Maunsell F, Woolums A, Francoz D, Rosenbusch R, Step D, Wilson D, et al. *Mycoplasma bovis* Infections in Cattle. *J Vet Intern Med.* 2011;25(4):772-83.
69. Caswell JL, Archambault M. *Mycoplasma bovis* pneumonia in cattle. *Anim Health Res Rev.* déc 2007;8(2):161-86.
70. Padalino B, Cirone F, Zappaterra M, Tullio D, Ficco G, Giustino A, et al. Factors Affecting the Development of Bovine Respiratory Disease: A Cross-Sectional Study in Beef Steers Shipped From France to Italy. *Front Vet Sci.* 28 juin 2021;8:627894.
71. Saegerman C, Gaudino M, Savard C, Broes A, Ariel O, Meyer G, et al. Influenza D virus in respiratory disease in Canadian, province of Québec, cattle: Relative importance and evidence of new reassortment between different clades. *Transbound Emerg Dis.* mai 2022;69(3):1227-45.
72. Sharma R, Woldehiwet Z. Increased susceptibility to *Pasteurella haemolytica* in lambs infected with bovine respiratory Syncytial Virus. *J Comp Pathol.* nov 1990;103(4):411-20.
73. Sudaryatma PE, Nakamura K, Mekata H, Sekiguchi S, Kubo M, Kobayashi I, et al. Bovine respiratory syncytial virus infection enhances *Pasteurella multocida* adherence on respiratory epithelial cells. *Vet Microbiol.* juill 2018;220:33-8.
74. Gershwin LJ, Berghaus LJ, Arnold K, Anderson ML, Corbeil LB. Immune mechanisms of pathogenetic synergy in concurrent bovine pulmonary infection with *Haemophilus somnus* and bovine respiratory syncytial virus. *Vet Immunol Immunopathol.* août 2005;107(1):119-30.
75. Leite F, Kuckleburg C, Atapattu D, Schultz R, Czuprynski CJ. BHV-1 infection and inflammatory cytokines amplify the interaction of *Mannheimia haemolytica* leukotoxin with bovine peripheral blood mononuclear cells in vitro. *Vet Immunol Immunopathol.* juin 2004;99(3):193-202.
76. Lion A, Secula A, Rançon C, Boulesteix O, Pinard A, Deslis A, et al. Enhanced Pathogenesis Caused by Influenza D Virus and *Mycoplasma bovis* Coinfection in Calves: a Disease Severity Linked with Overexpression of IFN- γ as a Key Player of the Enhanced Innate Immune Response in Lungs. *Microbiol Spectr.* 22 déc 2021;9(3):e0169021.
77. Paller T, Hostnik P, Pogacnik M, Toplak I. The prevalence of ten pathogens detected by a real-time PCR method in nasal swab samples collected from live cattle with respiratory disease. *Slov Vet Res.* 1 janv 2017;54:101-7.
78. Sanderson MW, Dargatz DA, Wagner BA. Risk factors for initial respiratory disease in United States' feedlots based on producer-collected daily morbidity counts. *Can Vet J.* avr 2008;49(4):373-8.
79. Martin SW, Meek AH, Davis DG, Johnson JA, Curtis RA. Factors associated with morbidity and mortality in feedlot calves: the Bruce County beef project, year two. *Can J Comp Med Rev Can Med Comp.* avr 1981;45(2):103-12.
80. Snowden GD, Van Vleck LD, Cundiff LV, Bennett GL. Bovine respiratory disease in feedlot cattle: environmental, genetic, and economic factors. *J Anim Sci.* août 2006;84(8):1999-2008.

81. Urban-Chmiel R, Grooms DL. Prevention and control of bovine respiratory disease. *J Livest Sci.* 1 janv 2012;3:27-36.
82. Faber R, Hartwig N. The Costs and Predictive Factors of Bovine Respiratory Disease in Standardized Steer Tests. 1999;
83. Cernicchiaro N, White BJ, Renter DG, Babcock AH. Evaluation of economic and performance outcomes associated with the number of treatments after an initial diagnosis of bovine respiratory disease in commercial feeder cattle. *Am J Vet Res.* févr 2013;74(2):300-9.
84. Bareille N, Seegers H, Denis G, Quillet JM, Assié S. Impact technique et économique des troubles respiratoires des jeunes bovins lors de l'engraissement. 1 janv 2009;
85. ATM Ruminants. L'association en charge de l'organisation de l'équarrissage des animaux trouvés morts dans les élevages [Internet]. 2020 [cité 2 févr 2024]. Disponible sur: <https://atmruminants.fr/>
86. Benoteau G, Breton D, Grosbois C, Lambrecht V, Pertuisel C, Richard A, et al. Engraisseur de jeunes bovins et cultures de vente [Internet]. inosys réseaux d'élevage; 2024 [cité 14 août 2024]. Report No.: 0712T1025. Disponible sur: https://portail.inosys-reseaux-elevage.fr/CasType/Filiere_2/0712T1025-2023-Edition-Cas-Type.pdf
87. Rigot F, Cabon G, Garcia F, Micol D, Agabriel J. Construction d'un simulateur de croissance des jeunes bovins en engraissement. 2009;
88. Herve L, Bareille N, Cornette B, Loiseau P, Assié S. To what extent does the composition of batches formed at the sorting facility influence the subsequent growth performance of young beef bulls? A French observational study. *Prev Vet Med.* 1 mars 2020;176:104936.
89. Cortes JA, Hendrick S, Janzen E, Pajor EA, Orsel K. Economic impact of digital dermatitis, foot rot, and bovine respiratory disease in feedlot cattle. *Transl Anim Sci.* avr 2021;5(2):txab076.
90. Mounaix B., Brun-Lafleur L., Assié S., Jozan T. Comparaison de trois modalités de vaccination contre les maladies respiratoires dans des élevages commerciaux d'engraissement de jeunes bovins. 2018;
91. Turenne J, Homobono N. Arrêté du 20 décembre 2010 relatif au classement, au marquage et à l'étiquetage des carcasses de veaux et à l'étiquetage des carcasses de bovins de plus de huit mois - Légifrance [Internet]. déc 20, 2010. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGITEXT000023451733/2021-02-05>
92. Duflot B. Dossier annuel Bovins viande - Année 2023 - Perspectives 2024 [Internet]. Institut de l'élevage; 2024 févr [cité 11 avr 2024]. Report No.: 546. Disponible sur: <https://idele.fr/detail-article/dossier-annuel-bovins-viande-annee-2023-perspectives-2024>
93. Blézat Consulting. Etude sur la valorisation du Ve quartier des filières bovine, ovine et porcine en France. FranceAgriMer [Internet]. mai 2013 [cité 15 avr 2024]; Disponible sur: <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/24724/document/ETU-VIA-2013-%20Valorisation%20du%205%C3%A8%20quartier%20%28version%20longue%29%20-%20B1%C3%A9zat.pdf?version=3>

94. Dupuy C, Morignat É, Demont P, Maugey X, Vinard JL, Hendrikx P, et al. Valorisation des données de saisie des bovins. *Point Vét.* avr 2014;(344).
95. Agreste BDNI. Animaux de boucherie : Abattage et Production [Internet]. 2024 [cité 15 avr 2024]. Disponible sur:
<https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/GROSANIMAUX/detail/>
96. Vergonjeanne R. *Web-agri.fr.* 2016 [cité 22 janv 2024]. Un éleveur sur deux vaccine contre les diarrhées et les maladies respiratoires. Disponible sur: <https://www.web-agri.fr/veaux-et-genisses/article/122868/un-eleveur-sur-deux-vaccine-contre-les-diarrhees-et-les-maladies-respiratoires>
97. Wildman BK, Perrett T, Abutarbush SM, Guichon PT, Pittman TJ, Booker CW, et al. A comparison of 2 vaccination programs in feedlot calves at ultra-high risk of developing undifferentiated fever/bovine respiratory disease. *Can Vet J.* mai 2008;49(5):463-72.
98. Wang M, Schneider LG, Hubbard KJ, Grotelueschen DM, Daly RF, Stokka GS, et al. Beef producer survey of the cost to prevent and treat bovine respiratory disease in preweaned calves. *J Am Vet Med Assoc.* 1 sept 2018;253(5):617-23.
99. Dubrovsky SA, Van Eenennaam AL, Aly SS, Karle BM, Rossitto PV, Overton MW, et al. Preweaning cost of bovine respiratory disease (BRD) and cost-benefit of implementation of preventative measures in calves on California dairies: The BRD 10K study. *J Dairy Sci.* 1 févr 2020;103(2):1583-97.
100. Macartney JE, Bateman KG, Ribble CS. Health performance of feeder calves sold at conventional auctions versus special auctions of vaccinated or conditioned calves in Ontario. *J Am Vet Med Assoc.* 1 sept 2003;223(5):677-83.
101. Fulton RW, Cook BJ, Step DL, Confer AW, Saliki JT, Payton ME, et al. Evaluation of health status of calves and the impact on feedlot performance: assessment of a retained ownership program for postweaning calves. *Can J Vet Res.* juill 2002;66(3):173-80.
102. USDA. Part III : Health Management and Biosecurity in U.S. Feedlots, 1999 [Internet]. US; 2000 [cité 23 avr 2024]. Disponible sur:
https://www.aphis.usda.gov/sites/default/files/feedlot99_dr_partiii.pdf
103. USDA. Types and Costs of Respiratory Disease Treatments in U.S. Feedlots [Internet]. US: APHIS; 2013 [cité 26 avr 2024]. Disponible sur:
https://www.aphis.usda.gov/sites/default/files/feed11_is_respdis.pdf
104. Corbin MJ, Gould JA, Carter BL, McClary DG, Portillo TA. Effects and economic implications of metaphylactic treatment of feeder cattle with two different dosages of tilmicosin on the incidence of bovine respiratory disease (BRD): A Summary of Two Studies. *Bov Pract.* 1 juin 2009;140-52.
105. Richeson JT, Beck PA, Poe KD, Gadberry MS, Hess TW, Hubbell DS. Effects of administration of a modified-live virus respiratory vaccine and timing of vaccination on health and performance of high-risk beef stocker calves. *Bov Pract.* 1 févr 2015;37-42.
106. Schelcher F, Valarcher, J.F. Bronchopneumonies infectieuses des bovins. 1999;

107. Maples WE, Brorsen BW, Peel D, Hicks B. Observational study of the effect of metaphylaxis treatment on feedlot cattle productivity and health. *Front Vet Sci.* 22 juill 2022;9:947585.
108. Dennis EJ, Schroeder TC, Renter DG. Net return distributions when metaphylaxis is used to control bovine respiratory disease in high health-risk cattle. *Transl Anim Sci.* avr 2020;4(2):1091-102.
109. Booker CW, Schunicht OC, Guichon PT, Jim GK, Wildman BK, Pittman TJ, et al. An evaluation of the metaphylactic effect of ceftiofur crystalline free Acid in feedlot calves. *Vet Ther Res Appl Vet Med.* 2006;7(3):257-74.
110. Van Donkersgoed J, Merrill J, Hendrick S. Comparative efficacy of tilmicosin versus tulathromycin as a metaphylactic antimicrobial in feedlot calves at moderate risk for respiratory disease. *Vet Ther Res Appl Vet Med.* 2008;9(4):291-7.
111. Nickell JS, White BJ. Metaphylactic Antimicrobial Therapy for Bovine Respiratory Disease in Stocker and Feedlot Cattle. *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* juill 2010;26(2):285-301.
112. Valencia DMA, Liebstein ML, Thompson PAR, Renter DG. A randomized trial comparing effects of respiratory disease metaphylaxis with gamithromycin or ceftiofur crystalline free acid on the health, performance, and economic return of auction market-derived stocker calves backgrounded on Missouri pastures. *Bov Pract.* 1 févr 2019;10-7.
113. Georgoutsou-Spyridonos M, Ricklin D, Pratsinis H, Perivolioti E, Pirmettis I, Garcia BL, et al. Attenuation of Staphylococcus aureus–Induced Bacteremia by Human Mini-Antibodies Targeting the Complement Inhibitory Protein Efb. *J Immunol.* 15 oct 2015;195(8):3946-58.
114. National Center For Scientific Research. Exploiting innate immune evasion strategies of Staphylococcus aureus for the design of novel antibody-based therapeutic agents for the treatment of bacteremia [Internet]. DEMOKRITOS; 2014 [cité 19 avr 2024] p. 2. Disponible sur: <https://cordis.europa.eu/project/id/268291/reporting/fr>
115. Klompmaker AF, Brydensholt M, Michelsen AM, Denwood MJ, Kirkeby CT, Larsen LE, et al. Estimating Clinically Relevant Cut-Off Values for a High-Throughput Quantitative Real-Time PCR Detecting Bacterial Respiratory Pathogens in Cattle. *Front Vet Sci* [Internet]. 25 mai 2021 [cité 31 janv 2024]; Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fvets.2021.674771/full>
116. ANSES. Réseau d'épidémiosurveillance de l'antibiorésistance des bactéries pathogènes animales (RESAPATH) [Internet]. 2024 [cité 19 avr 2024]. Disponible sur: <https://resapath.anses.fr/>
117. Amat JP, Cazeau G, Collineau L, Haenni M, JARRIGE N, Jouy E, et al. Résapath - Réseau d'épidémiosurveillance de l'antibiorésistance des bactéries pathogènes animales, bilan 2022 [Internet]. Lyon et Ploufragan-Plouzané-Niort, France: Anses; 2023 nov [cité 22 janv 2024] p. 53. Disponible sur: https://resapath.anses.fr/resapath_uploadfiles/files/Documents/Rapport%20annuel/2022_Resapath_Rapport%20annuel_FR.pdf
118. ANSES. RESAPATH online. 2024 [cité 19 avr 2024]. RESAPATH online. Disponible sur: <https://shiny-public.anses.fr/resapath2/>

119. Heinen L, White BJ, Larson RL, Kopp D, Pendell DL. Economic impact of mortality prediction by predictive model at first and second treatment for bovine respiratory disease. 16 sept 2024 [cité 15 oct 2024]; Disponible sur: <https://avmajournals.avma.org/view/journals/ajvr/aop/ajvr.24.06.0169/ajvr.24.06.0169.xml>
120. Pollreisz JP, Cull C, Lechtenberg K, Short T, Blanding M, Hinrichs J, et al. Comparison of two distinct arrival and treatment programs for bovine respiratory disease in high-risk feeder cattle entering a feedlot. *Transl Anim Sci.* juill 2022;6(3):txac102.
121. Institut de l'Élevage [Internet]. 2020 [cité 7 août 2024]. [GAV2020] Broutard max 2.0 : Retour sur 10 ans de pratique et 1 an de changement. Disponible sur: <https://idele.fr/detail-article/gav2020-broutard-max-20-retour-sur-10-ans-de-pratique-et-1-an-de-changement>
122. Ter'elevage [Internet]. [cité 7 août 2024]. Broutard Max. Disponible sur: <https://www.tereleveage.fr/broutard-max/>
123. Labille M. Agri 71 - L'Exploitant Agricole de Saône-et-Loire. [cité 8 août 2024]. Le Gaec du Petit Chêne produit des « broutards d'excellence ». Disponible sur: <https://www.agri71.fr/articles/05/04/2024/Le-Gaec-du-Petit-Chene-produit-des-broutards-d-excellence-94504/>
124. Bernard E. Cahier des charges : préparation sanitaire des broutards [Internet]. France: interbev; [cité 8 août 2024]. Disponible sur: <https://www.interbev.fr/wp-content/uploads/2021/01/cahier-des-charges-broutards-prepares-section15dec20-signé.pdf>
125. Afonso CL, Amarasinghe GK, Bányai K, Bào Y, Basler CF, Bavari S, et al. Taxonomy of the order MONONEGAVIRALES: update 2016. *Arch Virol.* août 2016;161(8):2351-60.
126. Bergeron HC, Tripp RA. Immunopathology of RSV: An Updated Review. *Viruses.* 10 déc 2021;13(12):2478.
127. Thammawat S, Sadlon TA, Hallsworth PG, Gordon DL. Role of Cellular Glycosaminoglycans and Charged Regions of Viral G Protein in Human Metapneumovirus Infection. *J Virol.* déc 2008;82(23):11767-74.
128. Soto JA, Gálvez NMS, Benavente FM, Pizarro-Ortega MS, Lay MK, Riedel C, et al. Human Metapneumovirus: Mechanisms and Molecular Targets Used by the Virus to Avoid the Immune System. *Front Immunol.* 24 oct 2018;9:2466.
129. Stokes HL, Easton AJ, Marriott AC. Chimeric pneumovirus nucleocapsid (N) proteins allow identification of amino acids essential for the function of the respiratory syncytial virus N protein. *J Gen Virol.* 2003;84(10):2679-83.
130. Renner M, Bertinelli M, Leyrat C, Paesen GC, Saraiva de Oliveira LF, Huiskonen JT, et al. Nucleocapsid assembly in pneumoviruses is regulated by conformational switching of the N protein. *eLife.* 15 févr 2016;5:e12627.
131. Shahriari S, Wei K jun, Ghildyal R. Respiratory Syncytial Virus Matrix (M) Protein Interacts with Actin In Vitro and in Cell Culture. *Viruses.* 30 sept 2018;10(10):535.
132. Cheng X, Park H, Zhou H, Jin H. Overexpression of the M2-2 Protein of Respiratory

- Syncytial Virus Inhibits Viral Replication. *J Virol.* nov 2005;79(22):13943-52.
133. Childs K, Stock N, Ross C, Andrejeva J, Hilton L, Skinner M, et al. mda-5, but not RIG-I, is a common target for paramyxovirus V proteins. *Virology.* 1 mars 2007;359(1):190-200.
 134. Yunxin R, Cheng T, Hua Y. Prevalence and Molecular Characterization of Bovine Parainfluenza Virus Type 3 in Cattle Herds in China - PMC. *Anim Open Access J MDPI [Internet].* 2023 [cité 29 janv 2024]; Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10000086/>
 135. Franzo G, Drigo M, Legnardi M, Grassi L, Pasotto D, Menandro ML, et al. Bovine Coronavirus: Variability, Evolution, and Dispersal Patterns of a No Longer Neglected Betacoronavirus. *Viruses.* 10 nov 2020;12(11):1285.
 136. Schoch CL, Ciufu S, Domrachev M, Hotton CL, Kannan S, Khovanskaya R, et al. NCBI Taxonomy: a comprehensive update on curation, resources and tools. *Database.* 1 janv 2020;2020:baaa062.
 137. ICTV. Taxon Details [Internet]. [cité 21 juin 2024]. Disponible sur: https://ictv.global/taxonomy/taxondetails?taxnode_id=202303153
 138. Chi S, Chen S, Jia W, He Y, Ren L, Wang X. Non-structural proteins of bovine viral diarrhoea virus. *Virus Genes.* 2022;58(6):491-500.
 139. Callens N, Brügger B, Bonnafous P, Drobecq H, Gerl MJ, Krey T, et al. Morphology and Molecular Composition of Purified Bovine Viral Diarrhoea Virus Envelope. *PLoS Pathog.* mars 2016;12(3):e1005476.
 140. Chen X, Ding X, Zhu L, Zhang G. The identification of a B-cell epitope in bovine viral diarrhoea virus (BVDV) core protein based on a mimotope obtained from a phage-displayed peptide library. *Int J Biol Macromol.* 31 juill 2021;183:2376-86.
 141. Praena B, Wan XF. Influenza Virus Infections in Polarized Cells. *Viruses.* 15 juin 2022;14(6):1307.
 142. Cui G, Zhu R, Qian Y, Deng J, Zhao L, Sun Y, et al. Genetic Variation in Attachment Glycoprotein Genes of Human Respiratory Syncytial Virus Subgroups A and B in Children in Recent Five Consecutive Years. *PLoS ONE.* 17 sept 2013;8(9):e75020.
 143. El-Mayet FS, Jones C. Specificity protein 1 (Sp1) and glucocorticoid receptor (GR) stimulate bovine alphaherpesvirus 1 (BoHV-1) replication and cooperatively transactivate the immediate early transcription unit 1 promoter. *J Virol.* 98(1):e01436-23.
 144. Ostler JB, Jones C. The Bovine Herpesvirus 1 Latency-Reactivation Cycle, a Chronic Problem in the Cattle Industry. *Viruses.* 16 févr 2023;15(2):552.
 145. Khodakaram-Tafti A, Farjanikish GH. Persistent bovine viral diarrhoea virus (BVDV) infection in cattle herds. *Iran J Vet Res.* 2017;18(3):154-63.
 146. McClurkin AW, Littledike ET, Cutlip RC, Frank GH, Coria MF, Bolin SR. Production of cattle immunotolerant to bovine viral diarrhoea virus. *Can J Comp Med.* avr 1984;48(2):156.

147. Smirnova NP, Bielefeldt-Ohmann H, Van Campen H, Austin KJ, Han H, Montgomery DL, et al. Acute non-cytopathic bovine viral diarrhoea virus infection induces pronounced type I interferon response in pregnant cows and fetuses. *Virus Res.* 1 mars 2008;132(1):49-58.
148. Presi P, Heim D. BVD eradication in Switzerland--a new approach. *Vet Microbiol.* 21 avr 2010;142(1-2):137-42.
149. Schulz M, Hennis-Plasschaert J. Règlement (UE) 2016/429 du Parlement Européen et du Conseil du 9 mars 2016 relatif aux maladies animales transmissibles et modifiant et abrogeant certains actes dans le domaine de la santé animale («*législation sur la santé animale*») (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) [Internet]. OJ L mars 9, 2016. Disponible sur: <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/429/oj/fra>
150. Juncker J. Règlement d'exécution - 2018/1882 - EN - EUR-Lex [Internet]. [cité 4 juill 2024]. Disponible sur: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2018/1882/oj/fra
151. OMSA. Code sanitaire pour les animaux terrestres [Internet]. [cité 4 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.woah.org/fr/ce-que-nous-faisons/normes/codes-et-manuels/acces-en-ligne-au-code-terrestre/>
152. Faipoux M. Arrêté du 10 juin 2024 fixant les mesures de prévention, de surveillance et de lutte contre la rhinotrachéite infectieuse bovine [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000049765236>
153. Moulin C. Rapport d'activité [Internet]. GDS France; 2023 [cité 28 juin 2024]. Disponible sur: https://www.gdsfrance.org/wp-content/uploads/GDSF_Congres2024_Rapport-activite2023_VF.pdf?highlight=IBR
154. ANSES. Rhinotrachéite infectieuse bovine [Internet]. 2023 [cité 28 juin 2024]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/SANT-Fi-Rhinotracheite-infectieuse-bovine.pdf>
155. Evain L. Arrêté du 31 juillet 2019 fixant des mesures de surveillance et de lutte contre la maladie des muqueuses/diarrhée virale bovine (BVD) [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000038858861>
156. GDS France. La Diarrhée Virale Bovine (BVD) : où en sommes-nous ? [Internet]. 2023 juill [cité 28 juin 2024]. Report No.: 6. Disponible sur: https://www.gdsfrance.org/wp-content/uploads/Laetter_de_GDS_France_N006.pdf?highlight=IBR
157. GDS Bretagne. BVD, le plan d'éradication de GDS Bretagne [Internet]. [cité 1 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.gds-bretagne.fr/mes-besoins/bvd-plan-deradication-de-gds-bretagne/>
158. GDS Sanitea. Eradication BVD tous concernés. [cité 1 juill 2024]. Calendrier d'éradication. Disponible sur: <https://contrelabvd.com/calendrier-d-eradication/>
159. Zhu Q, Li B, Sun D. Advances in Bovine Coronavirus Epidemiology. *Viruses.* 21 mai 2022;14(5):1109.
160. Richter V, Kattwinkel E, Firth CL, Marschik T, Dangelmaier M, Trauffler M, et al. Mapping the global prevalence of bovine viral diarrhoea virus infection and its associated mitigation

programmes. Vet Rec. 8 juin 2019;184(23):711.

161. Ståhl K, Alenius S. BVDV control and eradication in Europe--an update. Jpn J Vet Res. févr 2012;60 Suppl:S31-39.
162. Dutheil LM. Préparation des jeunes bovins à la période d'engraissement: résultats d'une analyse intégrative à partir d'un essai réalisé en France. Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse; 2021.
163. de Pixabay II. La rhinotrachéite infectieuse bovine (IBR) : où en sommes-nous ? GDS France; 2023.
164. Sala C, Perié P. Éradication de la BVD en France : points de situation et perspectives du dispositif de surveillance. Le Point Vétérinaire.fr [Internet]. 1 sept 2023 [cité 1 juill 2024]; (445). Disponible sur: <https://www.lepointveterinaire.fr/publications/le-point-veterinaire/article/n-445/eradication-de-la-bvd-en-france-points-de-situation-et-perspectives-du-dispositif-de-surveillance.html>
165. Global Biodiversity Information Facility (GBIF) [Internet]. [cité 2 juill 2024]. Pasteurellaceae. Disponible sur: <https://www.gbif.org/fr/species/9536>
166. Richardson NI, Ravenscroft N, Kuttel MM. Conformational comparisons of Pasteurella multocida types B and E and structurally related capsular polysaccharides. Glycobiology. sept 2023;33(9):745.
167. Smith E, Miller E, Aguayo JM, Figueroa CF, Nezworski J, Studniski M, et al. Genomic diversity and molecular epidemiology of Pasteurella multocida. PLoS ONE. 6 avr 2021;16(4):e0249138.
168. Harper M, John M, Turni C, Edmunds M, St. Michael F, Adler B, et al. Development of a Rapid Multiplex PCR Assay To Genotype Pasteurella multocida Strains by Use of the Lipopolysaccharide Outer Core Biosynthesis Locus. J Clin Microbiol. févr 2015;53(2):477-85.
169. Heddleeston KL, Gallagher JE, Rebers PA. Fowl Cholera: Gel Diffusion Precipitin Test for Serotyping Pasteurella multocida from Avian Species. Vol. 16. American Association of Avian Pathologists; 1972.
170. Calderón Bernal JM, Fernández A, Arnal JL, Sanz Tejero C, Fernández-Garayzábal JF, Vela AI, et al. Molecular Epidemiology of Pasteurella multocida Associated with Bovine Respiratory Disease Outbreaks. Anim Open Access J MDPI. 24 déc 2022;13(1):75.
171. Mason C, Errington J, Foster G, Thacker J, Grace O, Baxter-Smith K. Mannheimia haemolytica serovars associated with respiratory disease in cattle in Great Britain. BMC Vet Res. 3 janv 2022;18:5.
172. Timsit E, Hallewell J, Booker C, Tison N, Amat S, Alexander TW. Prevalence and antimicrobial susceptibility of Mannheimia haemolytica, Pasteurella multocida, and Histophilus somni isolated from the lower respiratory tract of healthy feedlot cattle and those diagnosed with bovine respiratory disease. Vet Microbiol. sept 2017;208:118-25.
173. Angen Ø, Ahrens P, Kuhnert P, Christensen H, Mutters R. Proposal of Histophilus somni gen. nov., sp. nov. for the three species incertae sedis « Haemophilus somnus », « Haemophilus

- agni » and « *Histophilus ovis* ». *Int J Syst Evol Microbiol.* sept 2003;53(Pt 5):1449-56.
174. Sandal I, Inzana TJ, Molinaro A, Castro CD, Shao JQ, Apicella MA, et al. Identification, structure, and characterization of an exopolysaccharide produced by *Histophilus somni* during biofilm formation. *BMC Microbiol.* 19 août 2011;11:186.
175. Cai Y, Varasteh S, van Putten JPM, Folkerts G, Braber S. *Mannheimia haemolytica* and lipopolysaccharide induce airway epithelial inflammatory responses in an extensively developed ex vivo calf model. *Sci Rep.* 3 août 2020;10:13042.
176. Clawson ML, Schuller G, Dickey AM, Bono JL, Murray RW, Sweeney MT, et al. Differences between predicted outer membrane proteins of genotype 1 and 2 *Mannheimia haemolytica*. *BMC Microbiol.* 12 août 2020;20:250.
177. Andrés-Lasheras S, Zaheer R, Jelinski M, McAllister TA. Role of biofilms in antimicrobial resistance of the bacterial bovine respiratory disease complex. *Front Vet Sci.* 12 juin 2024;11:1353551.
178. Andrés-Lasheras S, Ha R, Zaheer R, Lee C, Booker CW, Dorin C, et al. Prevalence and Risk Factors Associated With Antimicrobial Resistance in Bacteria Related to Bovine Respiratory Disease—A Broad Cross-Sectional Study of Beef Cattle at Entry Into Canadian Feedlots. *Front Vet Sci.* 1 juill 2021;8:692646.
179. Suwanruengsri M, Uemura R, Kanda T, Fuke N, Nueangphuet P, Pornthummawat A, et al. Production of granulomas in *Mycoplasma bovis* infection associated with meningitis-meningoencephalitis, endocarditis, and pneumonia in cattle. *J Vet Diagn Investig Off Publ Am Assoc Vet Lab Diagn Inc.* janv 2022;34(1):68-76.
180. Caswell JL, Bateman KG, Cai HY, Castillo-Alcala F. *Mycoplasma bovis* in Respiratory Disease of Feedlot Cattle. *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* juill 2010;26(2):365-79.
181. Thézé J, Ambroset C, Barry S, Masegla S, Colin A, Tricot A, et al. Genome-wide phylodynamic approach reveals the epidemic dynamics of the main *Mycoplasma bovis* subtype circulating in France. *Microb Genomics.* juill 2023;9(7):mgen001067.
182. Register KB, Lysnyansky I, Jelinski MD, Boatwright WD, Waldner M, Bayles DO, et al. Comparison of Two Multilocus Sequence Typing Schemes for *Mycoplasma bovis* and Revision of the PubMLST Reference Method. *J Clin Microbiol.* 26 mai 2020;58(6):e00283-20.
183. Kamel MS, Davidson JL, Verma MS. Strategies for Bovine Respiratory Disease (BRD) Diagnosis and Prognosis: A Comprehensive Overview. *Anim Open Access J MDPI.* 16 févr 2024;14(4):627.
184. Ferraro S, Fecteau G, Dubuc J, Francoz D, Rousseau M, Roy JP, et al. Scoping review on clinical definition of bovine respiratory disease complex and related clinical signs in dairy cows. *J Dairy Sci.* juin 2021;104(6):7095-108.
185. Flattot EAL, Batterham TR, Timsit E, White BJ, McMeniman JP, Ward MP, et al. Evaluation of reticulorumen temperature boluses for the diagnosis of subclinical cases of bovine respiratory disease in feedlot cattle. *J Anim Sci.* 12 nov 2021;99(12):skab337.
186. Timsit E, Assié S, Quiniou R, Seegers H, Bareille N. Early detection of bovine respiratory

- disease in young bulls using reticulo-rumen temperature boluses. *Vet J.* oct 2011;190(1):136-42.
187. Berman J. Literature Review of the Principal Diagnostic Tests to Detect Bovine Respiratory Disease in Pre-Weaned Dairy and Veal Calves. *Anim Open Access J MDPI.* 21 janv 2024;14(2):329.
 188. Buczinski S, Fecteau G, Dubuc J, Francoz D. Validation of a clinical scoring system for bovine respiratory disease complex diagnosis in preweaned dairy calves using a Bayesian framework. *Prev Vet Med.* 1 août 2018;156:102-12.
 189. Love WJ, Lehenbauer TW, Van Eenennaam AL, Drake CM, Kass PH, Farver TB, et al. Sensitivity and specificity of on-farm scoring systems and nasal culture to detect bovine respiratory disease complex in preweaned dairy calves. *J Vet Diagn Invest.* 1 mars 2016;28(2):119-28.
 190. Sivula NJ, Ames TR, Marsh WE, Werdin RE. Descriptive epidemiology of morbidity and mortality in Minnesota dairy heifer calves. *Prev Vet Med.* juill 1996;27(3):155-71.
 191. Mahendran SA. Use of fever detection in combination with thoracic ultrasonography to identify respiratory disease, and compare treatments of antimicrobials and NSAID: a randomised study in dairy calves. *Vet Rec Open.* 4 nov 2020;7(1):e000415.
 192. Berman J, Masseur I, Fecteau G, Buczinski S, Francoz D. Comparison of thoracic ultrasonography and thoracic radiography to detect active infectious bronchopneumonia in hospitalized dairy calves. *J Vet Intern Med.* 2021;35(4):2058-68.
 193. Kayser WC, Carstens GE, Jackson KS, Pinchak WE, Banerjee A, Fu Y. Evaluation of statistical process control procedures to monitor feeding behavior patterns and detect onset of bovine respiratory disease in growing bulls. *J Anim Sci.* mars 2019;97(3):1158-70.
 194. Ollivett TL, Caswell JL, Nydam DV, Duffield T, Leslie KE, Hewson J, et al. Thoracic Ultrasonography and Bronchoalveolar Lavage Fluid Analysis in Holstein Calves with Subclinical Lung Lesions. *J Vet Intern Med.* déc 2015;29(6):1728.
 195. Ollivett TL, Buczinski S. On-Farm Use of Ultrasonography for Bovine Respiratory Disease. *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* mars 2016;32(1):19-35.
 196. Rabeling B, Rehage J, Döpfer D, Scholz H. Ultrasonographic findings in calves with respiratory disease. *Vet Rec.* 24 oct 1998;143(17):468-71.
 197. Buczinski S, Ménard J, Timsit E. Incremental Value (Bayesian Framework) of Thoracic Ultrasonography over Thoracic Auscultation for Diagnosis of Bronchopneumonia in Preweaned Dairy Calves. *J Vet Intern Med.* 2016;30(4):1396-401.
 198. Capik SF, White BJ, Lubbers BV, Apley MD, DeDonder KD, Larson RL, et al. Comparison of the diagnostic performance of bacterial culture of nasopharyngeal swab and bronchoalveolar lavage fluid samples obtained from calves with bovine respiratory disease. *Am J Vet Res.* 1 mars 2017;78(3):350-8.
 199. Pansri P, Katholm J, Krogh KM, Aagaard AK, Schmidt LMB, Kudirkiene E, et al. Evaluation of novel multiplex qPCR assays for diagnosis of pathogens associated with the bovine respiratory disease complex. *Vet J.* 1 févr 2020;256:105425.

200. Moisé SJ, Aly SS, Lehenbauer TW, Love WJ, Rossitto PV, Van Eenennaam AL, et al. Association of plasma haptoglobin concentration and other biomarkers with bovine respiratory disease status in pre-weaned dairy calves. *J Vet Diagn Investig Off Publ Am Assoc Vet Lab Diagn Inc.* janv 2019;31(1):40-6.
201. Godson DL, Campos M, Attah-Poku SK, Redmond MJ, Cordeiro DM, Sethi MS, et al. Serum haptoglobin as an indicator of the acute phase response in bovine respiratory disease. *Vet Immunol Immunopathol.* 1 juin 1996;51(3-4):277-92.
202. Bushby EV, Thomas M, Vázquez-Diosdado JA, Occhiuto F, Kaler J. Early detection of bovine respiratory disease in pre-weaned dairy calves using sensor based feeding, movement, and social behavioural data. *Sci Rep.* 28 avr 2024;14:9737.
203. Dorso L, Rouault M, Barbotin C, Chartier C, Assié S. Infectious Bovine Respiratory Diseases in Adult Cattle: An Extensive Necropsic and Etiological Study. *Anim Open Access J MDPI.* 2 août 2021;11(8):2280.
204. Fulton RW, Blood KS, Panciera RJ, Payton ME, Ridpath JF, Confer AW, et al. Lung pathology and infectious agents in fatal feedlot pneumonias and relationship with mortality, disease onset, and treatments. *J Vet Diagn Investig Off Publ Am Assoc Vet Lab Diagn Inc.* juill 2009;21(4):464-77.
205. Baruch J, Cernicchiaro N, Cull CA, Lechtenberg KF, Nickell JS, Renter DG. Performance of multiple diagnostic methods in assessing the progression of bovine respiratory disease in calves challenged with infectious bovine rhinotracheitis virus and *Mannheimia haemolytica* 1. *J Anim Sci.* juin 2019;97(6):2357-67.
206. Hanzlicek GA, White BJ, Mosier D, Renter DG, Anderson DE. Serial evaluation of physiologic, pathological, and behavioral changes related to disease progression of experimentally induced *Mannheimia haemolytica* pneumonia in postweaned calves. *Am J Vet Res.* mars 2010;71(3):359-69.
207. Booker CW, Abutarbush SM, Morley PS, Jim GK, Pittman TJ, Schunicht OC, et al. Microbiological and histopathological findings in cases of fatal bovine respiratory disease of feedlot cattle in western Canada. 49:9.
208. Deleu A. Les freins et motivations à la vaccination en élevage bovin : résultats d'études qualitative et quantitative. *Bull Académie Vét Fr.* 2015;168(2):184-9.
209. Tresse C, Risson K, Makoschey B, Oliviero L. Comparison of different vaccination protocols against bovine respiratory disease complex in fattening units. 2008;
210. Santinello M, De Marchi M, Scali F, Lorenzi V, Romeo C, Alborali GL, et al. Effects of vaccination timing and target pathogens on performances and antimicrobial use in long-transported Charolais beef cattle from France to Italy - A retrospective study. *Prev Vet Med.* mars 2024;224:106130.
211. Vallet B. Arrêté du 18 mars 2016 fixant la liste des substances antibiotiques d'importance critique prévue à l'article L. 5144-1-1 du code de la santé publique et fixant la liste des méthodes de réalisation du test de détermination de la sensibilité des souches bactériennes prévue à l'article R. 5141-117-2 - Légifrance [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000032291325/>

212. Section 10 : Dispositions particulières. (Articles R5141-111 à D5141-142) - Légifrance [Internet]. Code de la santé publique. Sect. 10, R5141-111 avr 1, 2016. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/codes/id/LEGIARTI000032256759/2016-04-01>
213. USDA. Feedlot 2011, Part IV, Health and Health Management on. United states: USDA; 2013 sept p. 100.
214. Francoz D, Buczinski S, Apley M. Evidence Related to the Use of Ancillary Drugs in Bovine Respiratory Disease (Anti-Inflammatory and Others): Are They Justified or Not? *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* 1 mars 2012;28(1):23-38.
215. Edwards TA. Control methods for bovine respiratory disease for feedlot cattle. *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* juill 2010;26(2):273-84.
216. USDA. Antimicrobial Use and Stewardship on U.S. Feedlots, 2017. United states: United States Department of Agriculture; 2019.
217. Tajani A. Règlement (UE) 2019/6 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2018 relatif aux médicaments vétérinaires et abrogeant la directive 2001/82/CE (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) [Internet]. OJ L déc 11, 2018. Disponible sur: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/6/oj/fra>
218. Tajani A, Bogner-Strauss J. Règlement (UE) 2019/4 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2018 concernant la fabrication, la mise sur le marché et l'utilisation d'aliments médicamenteux pour animaux, modifiant le règlement (CE) no 183/2005 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 90/167/CEE du Conseil (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) [Internet]. OJ L déc 11, 2018. Disponible sur: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/4/oj/fra>
219. Guthrie CA, Rogers KC, Christmas RA, Vogel GJ, Laudert SB, Mechor GD. Efficacy of metaphylactic tilmicosin for controlling bovine respiratory disease in high-risk northern feeder calves. *Bov Pract.* 1 févr 2004;46-53.
220. Baggott D, Casartelli A, Fraisse F, Manavella C, Marteau R, Rehbein S, et al. Demonstration of the metaphylactic use of gamithromycin against bacterial pathogens associated with bovine respiratory disease in a multicentre farm trial. *Vet Rec.* 5 mars 2011;168(9):241.
221. Schumann FJ, Janzen ED, McKinnon JJ. Prophylactic tilmicosin medication of feedlot calves at arrival. *Can Vet J.* avr 1990;31(4):285-8.
222. Sorin-Dupont B. Stochastic modeling of Bovine Respiratory Disease: Using mathematical models to rank interventions and control strategies, soumis.
223. Picault S, Niang G, Sicard V, Sorin-Dupont B, Assié S, Ezanno P. Leveraging artificial intelligence and software engineering methods in epidemiology for the co-creation of decision-support tools based on mechanistic models. *Prev Vet Med.* 1 juill 2024;228:106233.
224. Valleron A. Les rôles de la modélisation en épidémiologie. *Comptes Rendus Académie Sci - Ser III - Sci Vie.* 1 mai 2000;323(5):429-33.
225. Choisy M, Guégan JF, Rohani P. *Mathematical Modeling of Infectious Diseases Dynamics.*

In: Tibayrenc M, éditeur. Encyclopedia of Infectious Diseases [Internet]. 1^{re} éd. Wiley; 2007 [cité 2 sept 2024]. p. 379-404. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470114209.ch22>

226. Picault S, Huang YL, Sicard V, Arnoux S, Beaunée G, Ezanno P. EMULSION: Transparent and flexible multiscale stochastic models in human, animal and plant epidemiology. *PLOS Comput Biol*. 13 sept 2019;15(9):e1007342.
227. Legrand I, Tribot Laspière P, Repplinger M. Caractérisation fine des carcasses : analyse des rendements selon les races, les types, les âges des bovins [Internet]. 2019 déc 3 [cité 19 juill 2024]; France. Disponible sur: https://fr.slideshare.net/idele_institut_de_l_elevage/caractrisation-fine-des-carcasses-analyse-des-rendements-selon-les-races-les-types-les-ages-des-bovins
228. CCNA [Internet]. [cité 19 juill 2024]. Mise à jour de la grille des salaires. Disponible sur: <https://convention-agricole.fr/#/article/31?s=0.8953379449659475&type>
229. Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biom Bull*. 1945;1(6):80-3.
230. Harris T, Hardin JW. Exact Wilcoxon Signed-Rank and Wilcoxon Mann–Whitney Ranksum Tests. *Stata J* [Internet]. 2013 [cité 18 oct 2024]; Disponible sur: <https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.1177/1536867X1301300208>
231. Fontaine C. Echec vaccinal en élevage bovin : Résultats d’une enquête auprès des vétérinaires praticiens français [Internet] [other]. 2018 [cité 23 avr 2024]. Disponible sur: <https://oatao.univ-toulouse.fr/24042/>
232. Johnson KK, Pendell DL. Market Impacts of Reducing the Prevalence of Bovine Respiratory Disease in United States Beef Cattle Feedlots. *Front Vet Sci*. 9 nov 2017;4:189.
233. Ashby B, Best A. Herd immunity. *Curr Biol*. 22 févr 2021;31(4):R174-7.
234. Halloran ME, Haber MJ, Longini I, Struchiner C. Direct and Indirect Effects in Vaccine Efficacy and Effectiveness. *Am J Epidemiol*. 1 mars 1991;133:323-31.
235. Windeyer MC, Leslie KE, Godden SM, Hodgins DC, Lissemore KD, LeBlanc SJ. The effects of viral vaccination of dairy heifer calves on the incidence of respiratory disease, mortality, and growth. *J Dairy Sci*. 1 nov 2012;95(11):6731-9.
236. Thurmond MC, Muñoz-Zanzi CA, Hietala SK. Effect of calthood vaccination on transmission of bovine viral diarrhoea virus under typical drylot dairy conditions. 1 oct 2001 [cité 16 oct 2024]; Disponible sur: <https://avmajournals.avma.org/view/journals/javma/219/7/javma.2001.219.968.xml>
237. AlShamrani NH, Alshaikh MA, Elaiw AM, Hattaf K. Dynamics of HIV-1/HTLV-I Co-Infection Model with Humoral Immunity and Cellular Infection. *Viruses*. 4 août 2022;14(8):1719.
238. Mukandavire Z, Gumel AB, Garira W, Tchuenche JM. Mathematical analysis of a model for HIV-malaria co-infection. *Math Biosci Eng*. 1 mars 2009;6(2):333-62.
239. Oname A, Abbas M, Onyenegecha CP. A fractional-order model for COVID-19 and

tuberculosis co-infection using Atangana–Baleanu derivative. *Chaos Solitons Fractals*. 1 déc 2021;153:111486.

240. Powell-Romero F, Wells K, Clark NJ. A systematic review and guide for using multi-response statistical models in co-infection research. *R Soc Open Sci*. 4 oct 2024;11(10):231589.
241. Ezanno P, Beaunée G, Picault S, Arnoux S, Sicard V, Beaudeau F, et al. Gestion des maladies endémiques du troupeau aux territoires : contribution de la modélisation épidémiologique pour soutenir la prise de décision (projet MIHMES, 2012-2017). *Innov Agron*. 2018;66:53-65.
242. Wang M, Schneider LG, Hubbard KJ, Smith DR. Cost of bovine respiratory disease in preweaned calves on US beef cow–calf operations (2011–2015). *JAVMA*. 2018;253(5):8.
243. van der Fels-Klerx HJ, Sørensen JT, Jalvingh AW, Huirne RBM. An economic model to calculate farm-specific losses due to bovine respiratory disease in dairy heifers. *Prev Vet Med*. 20 sept 2001;51(1):75-94.
244. Ministère de l’agriculture et de la souveraineté alimentaire. *Ecoantibio 3 - Réduire les risques d’antibiorésistance et promouvoir le bon usage des antimicrobiens en médecine vétérinaire*. 2023.
245. Le Point Vétérinaire.fr [Internet]. 2024 [cité 22 janv 2024]. Consulter le DMV - Dictionnaire des médicaments vétérinaires en ligne. Disponible sur: <https://www.lepointveterinaire.fr/dmv/consulter.html>
246. INSEE [Internet]. 2024 [cité 5 avr 2024]. Indice des prix à la consommation - Base 2015 - Ensemble des ménages - France - Ensemble hors tabac. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/001763852>
247. OCDE [Internet]. 2024 [cité 5 avr 2024]. Prix - Inflation (IPC). Disponible sur: <http://data.oecd.org/fr/price/inflation-ipc.htm>
248. INSEE [Internet]. 2024 [cité 5 avr 2024]. Cours des monnaies en euros - Dollar australien. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010002067#Tableau>
249. Exchange-rates.org [Internet]. 2024 [cité 5 avr 2024]. Historique du taux de change de l’euro (EUR) en dollar canadien (CAD) pour 2020. Disponible sur: <https://www.exchange-rates.org/fr/historique/eur-cad-2020>
250. Statista [Internet]. 2022 [cité 5 avr 2024]. Taux de change euro dollar 1999-2022. Disponible sur: <https://fr.statista.com/statistiques/577988/taux-de-change-moyen-annuel-du-dollar-etats-unis-contre-l-euro/>
251. Love WJ, Lehenbauer TW, Kass PH, Van Eenennaam AL, Aly SS. Development of a novel clinical scoring system for on-farm diagnosis of bovine respiratory disease in pre-weaned dairy calves. *PeerJ*. 2 janv 2014;2:e238.

Annexe

Annexe 1 : Caractéristiques des vaccins respiratoires bovins disponibles en France (245)

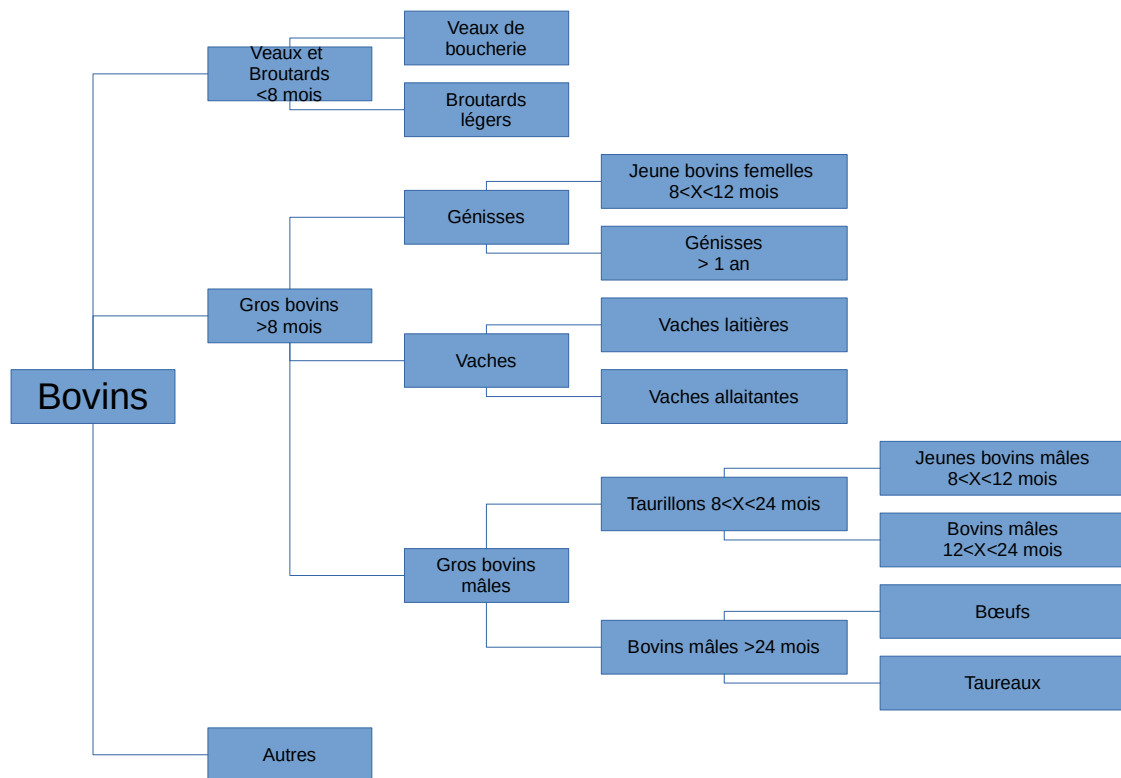
Annexe 1A : Technologies et commercialisation des vaccins respiratoires bovins disponibles en France

	Vaccins	Agents pathogènes	Type de vaccin	Souches	Date 1er AMM	Date mise à jour RCP
1	BOVALTO RESPI® INTRANASAL	BPI-3 VRSB	Vivant atténué	Bio 23/A Bio 23/A	19/02/18	16/12/22
2	BOVALTO RESPI® 3 Suspension injectable	VRSB BPI-3 Mannheimia haemolytica (A1)	Vivant inactivé	BIO-24 BIO-23 DSM 5283	10/11/15	10/10/23
3	BOVALTO RESPI® 4 Suspension injectable	VRSB Pi3 Mannheimia haemolytica (A1)	Vivant inactivé	BIO-24 BIO-23 DSM 5283	10/11/15	10/10/23
4	BOVELA®	BVDV BVDV-1 BVDV-2	Vivant modifié	KE-9 NY-93	22/12/14	22/12/14
5	BOVILIS® Bovigrip	VRSB BPI-3 BVDV	Vivant inactivé	EV 908 SF-4 Reisinger M4/1	31/05/02	08/03/23
6	BOVILIS® IBR Marker Inac	HVB-1	Vivant inactivé	GK/D	17/10/06	09/05/17
7	BOVILIS® IBR Marker Live	HVB-1	Vivant	GK/D	20/03/02	21/03/17
8	BOVILIS® Intranasal RSP Live	VRSB Pi3	Vivant	Jencine-2013 INT2-2013	23/05/19	08/03/23
9	BOVILIS® Nasalgen-C	Coronavirus	Vivant atténué	CA25	31/03/23	21/03/23
10	HIPRABOVIS® IBR Marker Live	HVB-1	Vivant atténué	CEDDEL	27/01/11	27/01/11
11	HIPRABOVIS® SOMNI/LKT	Mannheimia haemolytica (A1) Histophilus somni	Leucotoxine inactivé Vivant inactivé	Biotype A Baillie	31/07/07	22/12/14
12	NASYM®	VRSB	Vivant atténué	Lym-56	29/07/19	29/07/19
13	RISPOVAL® 2 BRSV Pi3	VRSB BPI-3	Vivant atténué	375 RLB 103	16/11/20	16/11/20
14	RISPOVAL® 3 BRSV Pi3 BVD	VRSB BPI-3 BVDV-1	Vivant atténué Vivant inactivé	375 RLB 103 5960 et 6309	21/08/03	15/09/17
15	RISPOVAL® 4 BVD RS Pi3 IBR	VRSB BPI-3 BVDV-1 IBR	Vivant atténué Vivant inactivé	375 RLB 103 5960 et 6309 Cooper	12/10/00	25/04/23
16	RISPOVAL® BVD	BVDV	Vivant	Virus de la maladie de Gumboro	04/02/85	16/01/23
17	RISPOVAL® Pasteurella	Mannheimia haemolytica (A1)	Leucotoxine inactivé Antigène capsulaire	NL 1009	09/07/99	19/04/18
18	RISPOVAL® RS	VRSB	Vivant atténué	RB94	21/03/83	14/02/23
19	RISPOVAL® RS BVD	VRSB BVDV	Vivant atténué	RB94 RIT4350	06/05/88	03/03/23
20	RISPOVAL® RS+Pi3 Intranasal veau	VRSV BPI-3	NR Vivant	375 RLB 103	14/09/06	05/12/16
Légende				NR : Non Renseigné		
D'après le DMV® du Point vétérinaire, 22/01/2024						

Annexe 1B : Caractéristiques immunologiques des vaccins respiratoires bovins disponibles en France

	Vaccins	Voie	Stade des animaux	Durée avant immunité	Primovaccination	Durée de l'immunité	TA
1	BOVALTO RESPI® INTRANASAL	Intranasale	≥ 10 jours	10 jours	1 injection	12 semaines	0 jour
2	BOVALTO RESPI® 3 Suspension injectable	Injectable SC	≥ 2 semaines ¹	3 semaines	2 injections à 3 semaines d'intervalle	6 mois	0 jour
3	BOVALTO RESPI® 4 Suspension injectable	Injectable SC	≥ 2 semaines ¹	3 semaines	2 injections à 3 semaines d'intervalle	6 mois	0 jour
4	BOVELA®	Injectable IM	≥ 3 mois	3 semaines	Veaux : 2 injections à 2-3 mois puis 5-6 mois bovins ≥ 6 mois : 1 injection	1 an	0 jour
5	BOVILIS® Bovigrip	Injectable SC	≥ 2 semaines	NR	2 injections à 4 semaines d'intervalle	3 semaines 6 semaines	0 jour
6	BOVILIS® IBR Marker Inac	Injectable IM	≥ 3 mois	3 semaines ¹	2 injections à 4 semaines d'intervalle	6 mois	0 jour
7	BOVILIS® IBR Marker Live	Injectable IM Intranasale	≥ 3 mois 2 semaines ≤ Veaux ≤ 3 mois	14 jours ¹ 4 jours	1 injection après 3 mois	6 mois PV, 12 mois Jusqu'à 3-4 mois	0 jour
8	BOVILIS® Intranasal RSP Live	Intranasale	Dès la naissance	5-6 jours 1 semaine	1 injection	12 semaines	0 jour
9	BOVILIS® Nasalgen-C	Intranasale	Dès la naissance	5 jours	1 injection	12 semaines	0 jour
10	HIPRABOVIS® IBR Marker Live	Injectable IM	≥ 3 mois	21 jours	1 injection	6 mois	0 jour
11	HIPRABOVIS® SOMNI/LKT	Injectable SC	≥ 2 mois	3 semaines	2 injections à 3 semaines d'intervalle	Non démontrée	0 jour
12	NASYM®	Injectable IM Intranasale	≥ 10 semaines ≤ 9 jours	3 semaines	2 injections à 4 semaines d'intervalle 1 injection	6 mois 2 mois	0 jour
13	RISPOVAL® 2 BRSV P13	Injectable IM	≥ 12 semaines	3 semaines	2 injections à 3-4 semaines d'intervalle	6 mois Non démontrée	0 jour
14	RISPOVAL® 3 BRSV P13 BVD	Injectable IM	≥ 12 semaines	3 semaines	2 injections à 3-4 semaines d'intervalle	6 mois Non démontrée	0 jour
15	RISPOVAL® 4 BVD RS P13 IBR	Injectable IM	≥ 12 semaines	NR	2 injections à 3-4 semaines d'intervalle	NR (rappe! annuelle)	0 jour
16	RISPOVAL® BVD	Injectable IM	≥ 4 mois	NR	2 injections à 3 semaines d'intervalle après 4 mois	NR (rappe! annuelle)	0 jour
17	RISPOVAL® Pasteurella	Injectable SC	≥ 3 mois	NR	1 injection	NR	0 jour
18	RISPOVAL® RS	Injectable IM	NR	NR	2 injections à 4 semaines d'intervalle Veaux < mois : 2 injections à 4 semaines d'intervalle puis 1 injection après (15j min) 4 mois	NR	0 jour
19	RISPOVAL® RS BVD	Injectable IM	NR	NR	2 injections à 4-6 semaines d'intervalle Veaux < mois : 2 injections à 4-6 semaines d'intervalle puis 2 injection après (15j min) 4 mois à 4-6 semaines d'intervalle	NR	0 jour
20	RISPOVAL® RS+P13 Intranasal veau	Intranasale	≥ 9 jours	5 jours	1 injection	12 semaines	0 jour

Légende ¹: Si séronégatif NR : Non Renseigné TA : Temps d'attente
D'après le DMV® du Point vétérinaire, 22/01/2024



Annexe 2 : Organigramme de la nomenclature des bovins (95)

$$UBE_{\text{engraisneur}} = 0,3 \times 240 = 72 \text{ UBE}$$

$$\text{Coût équarrissage}/an_{HT} = UBE * 1,12 = 80,64 \text{ € HT}$$

$$\text{Coût équarrissage}/an_{HT \text{ déflaté}} = \text{Coût équarrissage}/an_{HT} * \frac{100}{116,61} = 69,15 \text{ €}^1 \text{ HT}$$

$$\text{Coût équarrissage}/an_{TTC \text{ déflaté}} = \text{Coût équarrissage}/an_{HT \text{ déflaté}} \times 120\% = 82,98 \text{ €}^1 \text{ TTC}$$

Annexe 3 : Calcul du coût de l'équarrissage en France

Annexe 4 : Calculs des pertes lors de dépréciation des carcasses (12)

Annexe 4A : Note attribuée à chaque sous-classe de conformation de carcasse dans la thèse de Joly (12)

Classe	Tiers de classe	Code de carcasse
E	+	1
	=	2
	-	3
U	+	4
	=	5
	-	6
R	+	7
	=	8
	-	9
O	+	10
	=	11
	-	12
P	+	13
	=	14
	-	15

Annexe 4B : Définition des notions de statut respiratoire de la thèse de Joly (12)

Statut respiratoire	Définition
0	Animal sain faisant partie d'un lot non malade
1	Animal sain faisant partie d'un lot malade
2	Animal malade avec des signes cliniques d'intensité non déterminée
3	Animal malade avec des signes cliniques d'intensité faible
4	Animal malade avec des signes cliniques d'intensité intermédiaire
5	Animal malade avec des signes cliniques d'intensité importante

Annexe 4C : Résultat des note de conformation en fonction du statut respiratoire présenté dans la thèse de Joly (12)

Statut respiratoire	Note de conformation
0	6,2
1	6,3
2	7,6
3	6,4
4	6,6
5	7,1

Proportion de $R_{statut} = (\text{note de conformation}_{statut} - \text{code de carcasse U})$

Coût moyen $JB_{statut} = [\text{Proportion de } R_{statut} - \text{Proportion de } R_{healthy}] \times \text{Différence prix U / R} \times \text{Poids}_{statut}$

Avec :

- code de carcasse (Annexe C 1)

- note de carcasse $_{statut}$: note attribué pour un statut respiratoire (annexe C 3)

- statut : Statut respiratoire de l' animal considéré (annexe C 2)

Annexe 4D : Formules de calculs des pertes lors de dépréciation des carcasses pour les animaux selon le statut respiratoire

$$\text{Coût déflaté} = \text{Coût} \times \text{IPC}_{\text{Pays}, 2015} \div \text{IPC}_{\text{Pays}, \text{Année}}$$

$$\text{Coût déflaté en €} = \text{Coût déflaté} \times \text{Taux de change}_{\text{Pays}, \text{Année}}$$

Avec :

- IPC: Indice des prix à la consommation (hors tabac)
- Pays: Valeur en fonction du Pays d'origine du coût
- Année: Valeur en fonction de l'année de publication de l'article de production du coût

Sources :

- IPC (246,247)
- Taux de change (248–250)

Annexe 5 : Calculs d'uniformisations des coûts en prenant en compte l'inflation du pays et du cours de la monnaie

Annexe 6: Les traitements métaphylactiques utilisés par les élevages engraisseurs plaines du sud des États-Unis (107)

Trade Name ^a (Drug Name)	Price per ml	Dosage ml/600 lb	Cost to treat 600 lb calf	% of Lots Treated
DRAXXIN (Tulathromycin)	\$3.43	6.6	\$22.73	23.99%
Excede (Ceftiofur)	\$1.51	9.0	\$13.56	7.24%
Micotil (Tilmicosin)	\$1.37	9.0	\$12.37	39.23%
Nuflor (Florfenicol)	\$0.63	36.0	\$22.73	6.06%
Zactran (Gamithromycin)	\$1.30	10.9	\$14.17	23.06%
Weighted average			\$15.93	

^aDRAXXIN, Zoetis Animal Health, Parsippany, NJ; Excede, Zoetis Animal Health, Parsippany, NJ; Micotil, Elanco, Greenfield, IN; Nuflor, Merck, Kenilworth, NJ; Zactran, Boehringer Ingelheim, Duluth, GA.

The prices used are the actual prices paid during the observation period.

Annexe 7 : Définitions des statuts des élevages et des bovins par rapport à l'IBR

Annexe 7A : Définitions des différents statut d'un bovin par rapport à l'IBR selon la réglementation (152)

Statut d'un bovin	Définition
Indemne d'IBR	Appartient à un troupeau indemne, qu'il n'est pas vacciné et qu'il n'est pas suspect, infecté ou non conforme d'IBR
Indemne d'IBR vacciné	Appartient à un troupeau indemne vacciné, qu'il est vacciné et qu'il n'est pas suspect, infecté ou non conforme d'IBR
Non indemne d'IBR	Appartient à un troupeau en cours de qualification indemne d'IBR ou en cours d'assainissement et qu'il n'est pas suspect, infecté ou non conforme d'IBR
Suspect d'être infecté d'IBR	Lorsqu'il est détenu dans un troupeau suspect ou infecté d'IBR Lorsqu'il a été en contact avec un animal infecté d'IBR Lorsqu'il présente 2 résultats sérologiques successifs non négatifs sur sérum Lorsqu'il est détenu dans un troupeau dont la qualification ou le statut a été retiré
Infecté d'IBR	Lorsqu'à la suite de deux résultats sérologiques successifs non négatifs sur sérums, il se trouve dans un contexte épidémiologique du troupeau défavorable ou il présente un troisième résultat sérologique non négatif réalisé sur sérum individuel Lorsqu'il est vacciné avec un vaccin ne répondant pas aux exigences
Non-conforme d'IBR	Lorsqu'il appartient à un troupeau reconnu non conforme

Annexe 7B : Conditions à respecter pour devenir un élevage indemne par rapport à l'IBR (152)

Condition	
1	Il ne détient aucun bovin infecté ou vacciné
2	1 mois après l'élimination du dernier bovin infecté d'IBR si tous les bovins du troupeau présentent des résultats favorables à une épreuve ELISA pratiquée sur sérum individuel, réalisée sur une période de 12 mois maximum pour l'ensemble du troupeau ou que tous les bovins âgés d'au moins 12 mois présentent des résultats favorables consécutifs à deux épreuves ELISA pratiquées sur sérum individuel, épreuves espacées à intervalle de 2 mois au moins et 12 mois au plus
3	Tout bovin introduit dans le troupeau est indemne d'IBR, est isolé et est soumis soit à un contrôle sérologique individuel réalisé entre 15 et 30 jours après introduction soit à un contrôle documentaire
4	Les animaux des autres espèces sensibles de statut sanitaire inconnu IBR sont détenus de façon distincte du troupeau de bovins
5	Tous les produits germinaux d'origine bovine introduits ou utilisés dans l'établissement proviennent d'établissements indemnes ou indemnes vaccinés ou agréés de produits germinaux

Annexe 7C : Condition à respecter pour garder le statut indemne par rapport à l'IBR (152)

Conditions	
1	<p>Il est contrôlé avec résultats favorables soit :</p> <p>a) Par analyses sérologiques annuelles sur mélanges de sérums, pratiquées sur les prélèvements des bovins âgés d'au moins 24 mois et en cas de résultat non négatif, complétées par des analyses individuelles sur chacun des sérums composant les mélanges ayant présenté un résultat non négatif ;</p> <p>b) Par analyses sérologiques bimestrielles sur le lait de mélange produit par le troupeau contrôlé</p>
2	<p>Si le troupeau est indemne d'IBR depuis au moins trois ans et qu'il ne se trouve pas sur le même site d'exploitation qu'un troupeau d'engraissement visé à l'article 9 ou sur le même site qu'un centre de rassemblement agréé, le contrôle annuel peut être réalisé, sur autorisation préalable du préfet, soit :</p> <p>a) Par analyse sérologique conformément au 1° à partir de prélèvements pratiqués sur au moins 40 bovins âgés d'au moins 24 mois ou sur l'ensemble des bovins âgés d'au moins 24 mois lorsque leur effectif est inférieur à 40 ;</p> <p>b) Par analyse sérologique sur le lait de mélange produit par le troupeau contrôlé</p>

Annexe 8 : Résumé du score clinique développé par les chercheurs de l'University of Wisconsin-Madison (251)

Signes cliniques	0 (normal)	1 (atteinte faible)	2 (atteinte modérée)	3 (atteinte forte)
Toux	Absent	Induction unique	Induction répétée	Induction systématique
Jetage nasal	Absent	En faible quantité ou trouble unilatéralement	Trouble bilatéralement ou en forte quantité	Jetage mucopurulent bilatéral
Jetage oculaire	Absent	En faible quantité	Jetage bilatéral en quantité modérée	Jetage bilatéral en grande quantité
Port de la tête et des oreilles	Port normal	Tête tremblante ou battements des oreilles	Affaissement unilatéral	Affaissement bilatéral ou inclinaison de la tête
Température rectale (F)	≤ 100,9	101,0-101,9	102,0-102,9	≥ 103,0

Annexe 9 : Tableau récapitulatif des antibiotiques utilisés pour la BRD et de leur classe pharmacologique

Classes d'antibiotiques	Molécules	Antibiotique critique
Macrolides	Tilmicosine	-
Macrolides	Tulathromycine	-
Azalides	Gamithromycine	-
Phénicol	Florfénicol	-
Tétracyclines	Oxytétracycline	-
Sulfamide + Diaminopyrimidines	Sulfadimidine + Triméthoprim	-
Céphalosporines	Ceftiofur	+
Fluoroquinolones	Enrofloxacin	+
Fluoroquinolones	Marbofloxacin	+
Fluoroquinolones	Danofloxacin	+

$$DOF = \frac{\text{nombre de JB par engraissement} \times \text{nombre de jour dans l'année}}{\text{nombre de JB dans l'année}}$$

Annexe 10 : Calcul de la DE pour l'élevage type engraisseur charolais du grand Ouest de inosys réseaux d'élevage (86)

$$\text{Factor_of_diminution_ADG_Statut} = \frac{\text{Statut_decreased_ADG}_{\text{source}}}{\text{healthy_ADG}_{\text{source}}}$$

$$\text{statut_decreased_ADG} = \text{Factor_of_diminution_ADG_Statut} \times \text{healthy_ADG}$$

Avec :

- *Statut* : Statut respiratoire de l' animal (Mild, C ou missed)

- *Source* : Valeur de la source (Blakebrough-Hall et al.)

Annexe 11 : Calcul de la diminution du GMQ en fonction du GMQ d'un animal sain

Annexe 12 : Tableaux des moyennes des résultats économiques pour les 164 scénarios

Annexe 12A : Légendes

cov	coverage	dv	different_vax
meta	metaphylaxis	no	no_vax
no	no_metaphylaxis	dp	divalent_vax_at_purchase
ba	batch_composition	da	divalent_vax_on_arrival
so	sorted_batches	mp	monovalent_vax_at_purchase
mi	mixed_batches	ma	monovalent_vax_on_arrival

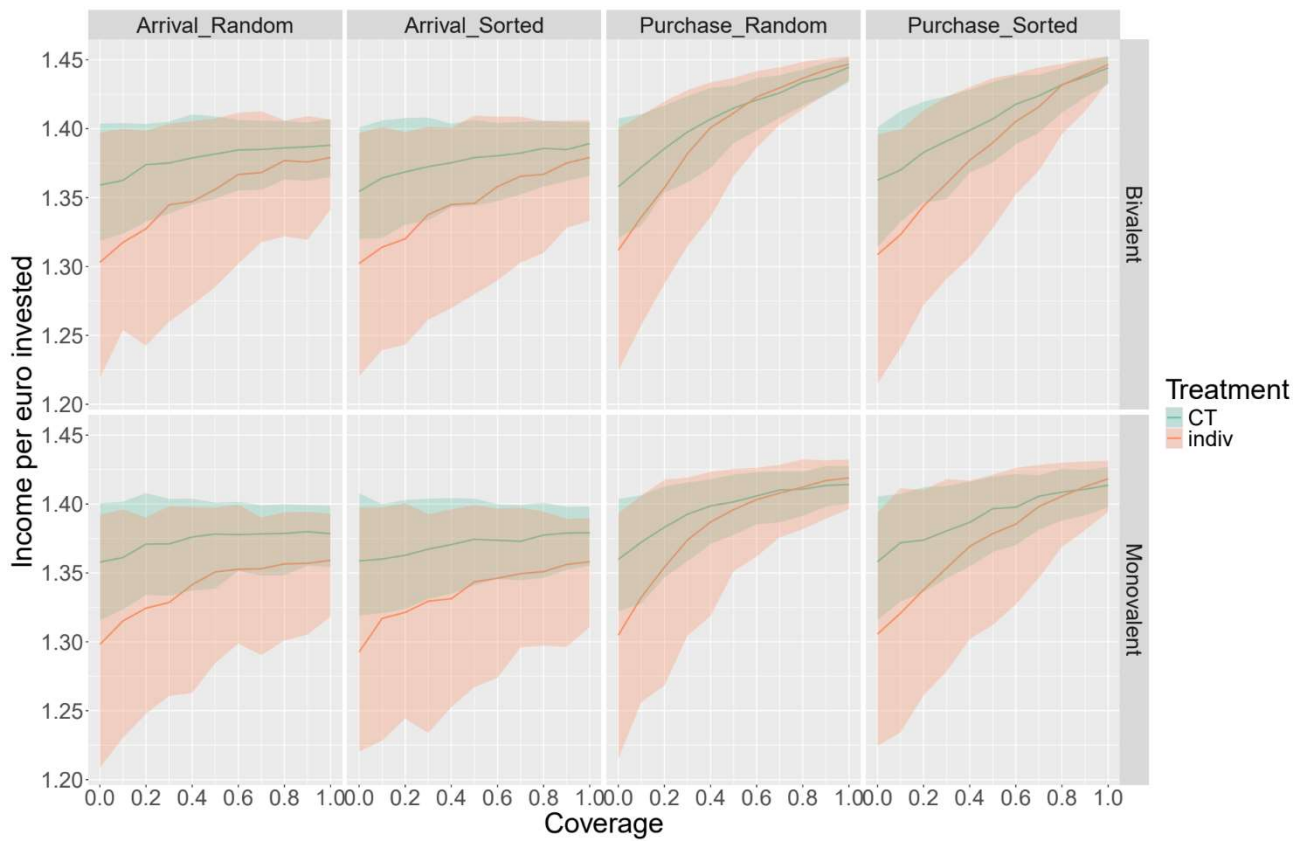
Annexe 12B : Tableaux

cov	meta	ba	dv	n	Labor cost	Total labor	Treatments cost	Purchase cost	Feeding cost	Total selling	net_gain
0	meta	mi	no	50	1 280,1	128,8	3 851,4	213 271,2	51 183,6	359 342,0	89 755,8
0	meta	so	no	50	1 295,8	130,4	3 865,7	213 271,2	51 104,4	359 278,4	89 741,3
0	no	mi	no	50	1 531,3	154,1	3 004,0	213 271,2	43 874,1	324 977,2	63 296,6
0	no	so	no	50	1 391,7	140,0	2 730,3	213 271,2	45 372,5	331 098,3	68 332,7
10	meta	mi	dp	50	1 080,4	108,7	3 431,7	213 271,2	53 373,3	367 616,4	96 459,7
10	meta	mi	da	50	1 239,0	124,6	3 799,7	213 271,2	51 576,9	360 313,6	90 426,8
10	meta	mi	mp	50	1 084,5	109,1	3 425,8	213 271,2	52 944,1	366 144,3	95 418,7
10	meta	mi	ma	50	1 350,3	135,8	4 028,0	213 271,2	50 488,8	356 043,6	86 905,2
10	meta	so	dp	50	1 148,3	115,5	3 532,4	213 271,2	52 624,5	364 969,4	94 393,1
10	meta	so	da	50	1 233,0	124,0	3 757,9	213 271,2	51 763,4	361 608,5	91 583,1
10	meta	so	mp	50	1 219,5	122,7	3 725,3	213 271,2	52 194,9	363 547,4	93 136,5
10	meta	so	ma	50	1 353,7	136,2	4 022,3	213 271,2	50 938,2	358 606,0	89 020,5
10	no	mi	dp	50	1 236,1	124,4	2 425,0	213 271,2	47 535,6	340 945,6	76 477,6
10	no	mi	da	50	1 468,3	147,7	2 906,6	213 271,2	45 035,9	330 047,9	67 365,8
10	no	mi	mp	50	1 244,8	125,2	2 441,9	213 271,2	47 066,6	339 037,7	75 013,2
10	no	mi	ma	50	1 305,5	131,3	2 587,1	213 271,2	46 913,6	338 498,4	74 421,0
10	no	so	dp	50	1 337,8	134,6	2 624,4	213 271,2	46 166,5	334 598,4	71 198,5
10	no	so	da	50	1 551,2	156,1	3 069,1	213 271,2	44 298,8	326 652,7	64 462,4
10	no	so	mp	50	1 308,6	131,7	2 567,2	213 271,2	46 615,8	337 148,2	73 385,3
10	no	so	ma	50	1 475,4	148,4	2 920,4	213 271,2	44 945,4	329 518,9	66 906,6
20	meta	mi	dp	50	917,0	92,3	3 017,0	213 271,2	54 808,5	373 132,2	101 118,5
20	meta	mi	da	50	1 219,4	122,7	3 765,0	213 271,2	52 364,7	363 335,3	92 715,0
20	meta	mi	mp	50	919,9	92,5	3 073,5	213 271,2	54 362,8	371 224,4	99 597,1

20	meta	mi	ma	50	1 115,9	112,3	3 570,3	213 271,2	53 228,0	366 741,8	95 556,4
20	meta	so	dp	50	1 129,5	113,6	3 454,4	213 271,2	53 029,0	366 478,2	95 594,1
20	meta	so	da	50	1 319,5	132,7	3 983,1	213 271,2	51 526,4	360 657,7	90 557,5
20	meta	so	mp	50	1 098,5	110,5	3 461,4	213 271,2	52 651,1	364 885,2	94 403,0
20	meta	so	ma	50	1 233,8	124,1	3 821,4	213 271,2	52 094,1	362 497,0	92 076,5
20	no	mi	dp	50	991,9	99,8	1 945,8	213 271,2	50 241,6	352 354,7	85 904,2
20	no	mi	da	50	1 161,8	116,9	2 331,4	213 271,2	49 251,1	348 338,7	82 323,2
20	no	mi	mp	50	961,1	96,7	1 885,5	213 271,2	49 556,5	349 561,9	83 887,5
20	no	mi	ma	50	1 231,6	123,9	2 468,4	213 271,2	47 971,9	343 009,1	78 066,0
20	no	so	dp	50	1 046,6	105,3	2 053,2	213 271,2	49 367,8	348 193,6	82 454,8
20	no	so	da	50	1 306,6	131,5	2 615,5	213 271,2	47 292,1	339 662,9	75 177,4
20	no	so	mp	50	1 280,4	128,8	2 511,9	213 271,2	46 290,5	335 282,0	71 928,1
20	no	so	ma	50	1 378,7	138,7	2 757,0	213 271,2	46 008,1	334 274,6	70 859,5
30	meta	mi	dp	50	803,7	80,9	2 794,7	213 271,2	55 675,6	376 087,2	103 542,0
30	meta	mi	da	50	1 152,7	116,0	3 661,6	213 271,2	53 170,7	366 677,2	95 421,1
30	meta	mi	mp	50	904,5	91,0	3 072,2	213 271,2	54 480,9	371 684,8	99 956,0
30	meta	mi	ma	50	1 120,6	112,7	3 606,0	213 271,2	53 718,8	368 896,1	97 179,5
30	meta	so	dp	50	850,1	85,5	2 790,1	213 271,2	55 246,1	374 668,0	102 510,6
30	meta	so	da	50	1 222,1	122,9	3 802,5	213 271,2	52 820,8	365 467,0	94 350,5
30	meta	so	mp	50	944,8	95,1	3 114,8	213 271,2	54 151,0	370 820,2	99 338,4
30	meta	so	ma	50	1 217,5	122,5	3 778,4	213 271,2	52 465,7	364 107,0	93 374,2
30	no	mi	dp	50	805,9	81,1	1 581,1	213 271,2	52 666,0	362 793,8	94 469,6
30	no	mi	da	50	1 126,3	113,3	2 287,8	213 271,2	49 698,1	350 008,0	83 624,6
30	no	mi	mp	50	843,2	84,8	1 654,1	213 271,2	51 242,6	356 669,1	89 658,0
30	no	mi	ma	50	1 202,6	121,0	2 437,5	213 271,2	48 644,4	346 189,3	80 633,6
30	no	so	dp	50	892,9	89,8	1 751,6	213 271,2	51 330,1	356 272,0	89 026,3
30	no	so	da	50	1 279,9	128,8	2 589,1	213 271,2	48 067,0	343 108,5	77 901,2
30	no	so	mp	50	979,4	98,5	1 921,4	213 271,2	49 657,0	349 462,9	83 633,9
30	no	so	ma	50	1 219,2	122,7	2 470,0	213 271,2	48 048,0	343 079,3	78 070,9
40	meta	mi	dp	50	673,4	67,7	2 422,7	213 271,2	57 282,6	382 331,2	108 681,3
40	meta	mi	da	50	1 179,6	118,7	3 732,2	213 271,2	53 678,6	368 757,4	96 895,7
40	meta	mi	mp	50	773,5	77,8	2 782,0	213 271,2	55 529,9	375 527,0	103 170,4
40	meta	mi	ma	50	1 198,3	120,6	3 811,7	213 271,2	52 957,8	366 011,4	94 772,4
40	meta	so	dp	50	761,9	76,7	2 535,3	213 271,2	56 136,5	377 835,1	105 130,2
40	meta	so	da	50	1 242,9	125,0	3 868,2	213 271,2	53 117,5	366 691,6	95 191,8
40	meta	so	mp	50	913,5	91,9	3 059,7	213 271,2	54 412,8	371 549,7	99 892,6
40	meta	so	ma	50	1 178,3	118,5	3 768,8	213 271,2	53 134,5	366 658,0	95 305,2
40	no	mi	dp	50	674,7	67,9	1 323,7	213 271,2	54 186,4	368 533,3	99 077,4
40	no	mi	da	50	1 079,4	108,6	2 221,8	213 271,2	51 093,0	356 375,9	88 710,5
40	no	mi	mp	50	617,7	62,1	1 211,9	213 271,2	53 876,1	368 020,9	99 044,0
40	no	mi	ma	50	1 160,7	116,8	2 381,5	213 271,2	49 345,3	348 673,1	82 514,4
40	no	so	dp	50	792,0	79,7	1 553,8	213 271,2	52 767,9	362 499,6	94 114,7
40	no	so	da	50	1 244,5	125,2	2 545,8	213 271,2	49 016,9	347 344,5	81 266,1
40	no	so	mp	50	928,5	93,4	1 821,6	213 271,2	50 530,9	353 664,8	87 112,7
40	no	so	ma	50	1 270,9	127,9	2 597,5	213 271,2	48 061,5	343 490,9	78 289,8
50	meta	mi	dp	50	583,7	58,7	2 187,6	213 271,2	58 176,9	385 734,4	111 514,9
50	meta	mi	da	50	1 127,4	113,4	3 637,9	213 271,2	54 437,4	371 702,0	99 228,1
50	meta	mi	mp	50	677,4	68,2	2 578,7	213 271,2	56 146,6	378 058,0	105 384,0
50	meta	mi	ma	50	1 213,7	122,1	3 861,2	213 271,2	53 287,1	367 300,1	95 666,9
50	meta	so	dp	50	658,4	66,2	2 218,3	213 271,2	56 948,0	381 215,5	108 119,6

50	meta	so	da	50	1 200,1	120,7	3 825,1	213 271,2	53 802,6	369 002,1	96 903,0
50	meta	so	mp	50	777,7	78,2	2 797,1	213 271,2	55 601,2	375 909,4	103 462,3
50	meta	so	ma	50	1 179,5	118,7	3 767,9	213 271,2	53 298,0	367 012,6	95 496,0
50	no	mi	dp	50	525,4	52,9	1 030,6	213 271,2	56 127,8	376 693,1	105 738,1
50	no	mi	da	50	1 134,0	114,1	2 355,1	213 271,2	51 005,3	356 032,1	88 266,6
50	no	mi	mp	50	542,3	54,6	1 063,9	213 271,2	54 372,0	370 140,2	100 890,8
50	no	mi	ma	50	1 147,6	115,5	2 381,8	213 271,2	50 156,4	352 990,8	86 033,8
50	no	so	dp	50	628,6	63,2	1 233,2	213 271,2	54 728,3	370 691,5	100 830,3
50	no	so	da	50	1 147,2	115,4	2 381,1	213 271,2	50 560,9	353 830,3	86 469,9
50	no	so	mp	50	706,3	71,1	1 385,5	213 271,2	52 753,3	362 682,7	94 566,3
50	no	so	ma	50	1 171,3	117,8	2 428,4	213 271,2	49 155,8	348 225,5	82 198,9
60	meta	mi	dp	50	499,3	50,2	1 949,2	213 271,2	58 832,8	388 265,3	113 712,8
60	meta	mi	da	50	1 032,0	103,8	3 439,1	213 271,2	55 663,0	376 173,6	102 768,2
60	meta	mi	mp	50	641,9	64,6	2 508,0	213 271,2	56 668,4	380 012,6	106 923,1
60	meta	mi	ma	50	1 130,9	113,8	3 714,7	213 271,2	54 109,2	370 340,3	98 114,3
60	meta	so	dp	50	497,6	50,1	1 801,3	213 271,2	58 528,8	387 080,6	112 981,8
60	meta	so	da	50	1 162,9	117,0	3 734,5	213 271,2	54 549,6	371 988,2	99 270,0
60	meta	so	mp	50	684,5	68,9	2 565,7	213 271,2	56 263,2	378 697,1	105 912,6
60	meta	so	ma	50	1 220,4	122,8	3 888,6	213 271,2	53 482,8	368 048,6	96 185,5
60	no	mi	dp	50	388,5	39,1	762,1	213 271,2	57 539,9	382 434,1	110 472,5
60	no	mi	da	50	1 106,9	111,4	2 328,1	213 271,2	51 740,9	358 714,8	90 267,7
60	no	mi	mp	50	476,1	47,9	933,9	213 271,2	55 387,0	374 495,5	104 427,3
60	no	mi	ma	50	1 160,3	116,7	2 432,9	213 271,2	50 091,5	352 715,3	85 759,4
60	no	so	dp	50	460,8	46,4	904,0	213 271,2	56 826,7	379 476,5	108 013,8
60	no	so	da	50	1 101,0	110,8	2 316,4	213 271,2	51 701,6	358 669,1	90 279,0
60	no	so	mp	50	638,7	64,3	1 252,9	213 271,2	53 624,0	367 083,6	98 296,7
60	no	so	ma	50	1 154,6	116,2	2 421,7	213 271,2	49 852,7	351 062,7	84 362,5
70	meta	mi	dp	50	409,4	41,2	1 656,2	213 271,2	59 540,8	390 835,4	115 957,9
70	meta	mi	da	50	1 129,3	113,6	3 726,2	213 271,2	55 251,7	374 819,8	101 441,3
70	meta	mi	mp	50	573,5	57,7	2 320,5	213 271,2	57 124,7	381 781,9	108 492,0
70	meta	mi	ma	50	1 214,0	122,1	3 942,3	213 271,2	53 698,8	368 823,1	96 696,7
70	meta	so	dp	50	436,1	43,9	1 560,5	213 271,2	59 112,0	389 190,6	114 810,8
70	meta	so	da	50	1 124,4	113,1	3 702,6	213 271,2	55 249,0	374 674,2	101 327,0
70	meta	so	mp	50	648,0	65,2	2 523,3	213 271,2	56 559,9	379 522,8	106 520,3
70	meta	so	ma	50	1 149,9	115,7	3 762,4	213 271,2	54 474,9	371 743,0	99 084,6
70	no	mi	dp	50	255,5	25,7	501,3	213 271,2	59 321,3	389 969,1	116 619,8
70	no	mi	da	50	1 011,2	101,7	2 166,5	213 271,2	53 410,6	366 128,7	96 269,2
70	no	mi	mp	50	410,1	41,3	804,4	213 271,2	55 853,1	376 270,1	105 931,2
70	no	mi	ma	50	1 158,6	116,6	2 455,6	213 271,2	50 329,7	354 009,3	86 794,2
70	no	so	dp	50	346,2	34,8	679,1	213 271,2	58 072,0	384 375,5	112 007,0
70	no	so	da	50	1 085,8	109,2	2 312,9	213 271,2	52 318,8	361 502,2	92 513,5
70	no	so	mp	50	510,7	51,4	1 001,8	213 271,2	54 609,1	370 652,8	101 260,1
70	no	so	ma	50	1 218,5	122,6	2 573,1	213 271,2	49 607,7	350 444,4	83 773,8
80	meta	mi	dp	50	357,8	36,0	1 423,0	213 271,2	60 099,8	393 142,4	117 990,6
80	meta	mi	da	50	1 184,3	119,1	3 862,3	213 271,2	54 975,2	373 546,4	100 253,4
80	meta	mi	mp	50	540,9	54,4	2 250,6	213 271,2	57 449,7	382 955,1	109 442,7
80	meta	mi	ma	50	1 174,6	118,2	3 879,0	213 271,2	54 420,2	371 597,4	98 852,5
80	meta	so	dp	50	385,4	38,8	1 398,3	213 271,2	59 580,8	391 092,8	116 457,1
80	meta	so	da	50	1 151,2	115,8	3 770,8	213 271,2	55 550,4	375 751,2	102 007,6
80	meta	so	mp	50	649,2	65,3	2 502,8	213 271,2	56 494,1	379 404,2	106 487,0

80	meta	so	ma	50	1 169,7	117,7	3 872,2	213 271,2	54 415,9	371 452,3	98 723,2
80	no	mi	dp	50	214,6	21,6	420,9	213 271,2	59 723,6	391 311,6	117 681,3
80	no	mi	da	50	1 029,9	103,6	2 229,3	213 271,2	53 359,0	365 797,8	95 908,4
80	no	mi	mp	50	401,6	40,4	787,8	213 271,2	55 927,2	376 603,0	106 215,3
80	no	mi	ma	50	1 110,0	111,7	2 386,3	213 271,2	51 150,3	356 950,2	89 032,5
80	no	so	dp	50	276,5	27,8	542,4	213 271,2	59 099,8	388 735,2	115 545,4
80	no	so	da	50	1 056,8	106,3	2 282,0	213 271,2	52 990,3	364 166,5	94 566,1
80	no	so	mp	50	450,2	45,3	883,2	213 271,2	55 367,1	373 995,7	104 024,0
80	no	so	ma	50	1 200,2	120,7	2 563,4	213 271,2	50 242,6	353 379,9	86 102,5
90	meta	mi	dp	50	277,3	27,9	1 141,1	213 271,2	60 605,6	394 837,4	119 542,3
90	meta	mi	da	50	1 151,2	115,8	3 800,3	213 271,2	55 825,8	376 932,9	102 884,4
90	meta	mi	mp	50	519,7	52,3	2 203,8	213 271,2	57 857,1	384 875,8	111 024,1
90	meta	mi	ma	50	1 202,3	121,0	3 963,8	213 271,2	54 535,0	371 944,7	98 972,4
90	meta	so	dp	50	313,2	31,5	1 186,1	213 271,2	60 253,2	393 583,8	118 560,1
90	meta	so	da	50	1 135,1	114,2	3 746,5	213 271,2	56 161,0	378 427,2	104 113,5
90	meta	so	mp	50	551,4	55,5	2 254,5	213 271,2	57 375,3	382 734,4	109 282,0
90	meta	so	ma	50	1 240,5	124,8	4 035,1	213 271,2	54 077,1	370 191,0	97 567,1
90	no	mi	dp	50	170,6	17,2	334,6	213 271,2	60 329,4	393 887,9	119 782,1
90	no	mi	da	50	1 043,7	105,0	2 282,4	213 271,2	53 899,5	367 942,8	97 446,0
90	no	mi	mp	50	359,3	36,1	704,9	213 271,2	56 488,8	379 227,9	108 403,7
90	no	mi	ma	50	1 149,2	115,6	2 489,4	213 271,2	51 259,3	357 829,7	89 660,6
90	no	so	dp	50	205,8	20,7	403,8	213 271,2	59 961,9	392 186,3	118 343,5
90	no	so	da	50	1 003,8	101,0	2 204,1	213 271,2	54 264,7	369 850,9	99 107,1
90	no	so	mp	50	365,4	36,8	716,8	213 271,2	56 317,5	378 166,6	107 495,7
90	no	so	ma	50	1 157,0	116,4	2 504,7	213 271,2	51 140,8	357 250,8	89 177,1
100	meta	mi	dp	50	203,7	20,5	829,4	213 271,2	61 117,7	396 846,0	121 424,0
100	meta	mi	da	50	1 188,9	119,6	3 903,6	213 271,2	55 986,5	377 525,2	103 175,0
100	meta	mi	mp	50	537,5	54,1	2 281,8	213 271,2	57 664,6	383 786,8	110 031,7
100	meta	mi	ma	50	1 236,2	124,4	4 070,3	213 271,2	54 453,9	371 561,0	98 529,5
100	meta	so	dp	50	218,4	22,0	910,8	213 271,2	61 176,3	397 266,5	121 689,8
100	meta	so	da	50	1 167,6	117,5	3 876,8	213 271,2	56 158,4	378 114,2	103 640,2
100	meta	so	mp	50	506,7	51,0	2 149,7	213 271,2	57 706,3	383 892,8	110 259,0
100	meta	so	ma	50	1 254,6	126,2	4 093,1	213 271,2	54 221,5	370 856,8	98 016,3
100	no	mi	dp	50	120,9	12,2	237,1	213 271,2	61 088,7	396 926,9	122 209,0
100	no	mi	da	50	1 038,0	104,4	2 297,3	213 271,2	54 688,6	371 984,7	100 689,6
100	no	mi	mp	50	327,0	32,9	641,4	213 271,2	56 739,5	380 218,4	109 239,3
100	no	mi	ma	50	1 190,3	119,7	2 596,1	213 271,2	50 867,6	356 321,2	88 396,1
100	no	so	dp	50	119,5	12,0	234,5	213 271,2	61 019,2	396 623,7	121 979,2
100	no	so	da	50	1 080,1	108,7	2 380,0	213 271,2	53 983,1	368 622,0	97 907,5
100	no	so	mp	50	320,2	32,2	628,2	213 271,2	56 914,5	380 805,3	109 671,2
100	no	so	ma	50	1 173,6	118,1	2 563,3	213 271,2	50 970,2	356 626,6	88 648,3



Annexe 13 : Résultats par argent investi des différents scénarios réalisés par Sorin-Dupont (222)

Théo Patrick SALLES

VERS UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION : MODÉLISATION DES CO-INFECTIONS RESPIRATOIRES LORS DE L'ENGRAISSEMENT DES JEUNES BOVINS EN FRANCE POUR MIEUX LES CONTRÔLER

TOWARDS A DECISION SUPPORT TOOL: MODELING RESPIRATORY CO-INFECTIONS DURING FATTENING OF YOUNG CATTLE IN FRANCE IN ORDER TO CONTROL THEM

Thèse d'État de Doctorat Vétérinaire : Nantes, le 06/12/2024

RESUME

Les bronchopneumonies infectieuses sont source de nombreuses pertes économiques en élevage d'engraissement des jeunes bovins. La mise en lot, la vaccination et la métaphylaxie sont des mesures de maîtrise qui limitent l'impact des maladies respiratoires pendant l'engraissement. La modélisation permet d'étudier rapidement et à moindre coût l'épidémiologie d'une maladie et de construire des outils d'aide à la décision pour prioriser les interventions. À partir d'un modèle simulant la co-circulation et la co-infection de deux agents pathogènes à l'origine des bronchopneumonies infectieuses, le virus respiratoire syncytial bovin et *Mannheimia haemolytica*, j'ai réalisé une analyse coût/bénéfice à l'échelle d'un engraissement sous la forme d'un prototype d'outil d'aide à la décision. En comparant des mesures de maîtrise différentes, cette analyse économique a mis en évidence : des limites à la réalisation des traitements métaphylactiques lors de bonnes vaccinations des jeunes bovins ; l'importance de la vaccination en élevage naisseur avant le transport des jeunes bovins, et donc l'importance de la communication et de la traçabilité de la vaccination entre naisseurs et engraisseurs ; et une protection collective à partir d'un seuil de couverture vaccinale par lot de 50 à 80 % selon le vaccin utilisé et la période de vaccination.

MOTS CLES :

- JEUNE BOVIN
- ELEVAGE BOVIN
- ENGRAISSEMENT
- MALADIE RESPIRATOIRE
- BRONCHOPNEUMONIE INFECTIEUSE ENZOOTIQUE
- IMPACT ECONOMIQUE
- MODELISATION
- MODELE ECONOMIQUE

DATE DE SOUTENANCE : 06/12/2024