



# **Approches épidémiologiques et statistiques pour la détection des troubles de santé et l'évaluation du bien-être chez les bovins**

Aurélien Madouasse

## **► To cite this version:**

Aurélien Madouasse. Approches épidémiologiques et statistiques pour la détection des troubles de santé et l'évaluation du bien-être chez les bovins. Santé publique et épidémiologie. Nantes Université, 2023. <tel-04125958>

**HAL Id: tel-04125958**

**<https://hal.science/tel-04125958v1>**

Submitted on 20 Jun 2023

**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.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

NANTES UNIVERSITE

Ecole doctorale Végétal, Animal, Aliment, Mer, Environnement (VAAME)

# Habilitation à diriger des recherches

Spécialité : Epidémiologie, économie de la santé et prévention

Aurélien MADOUASSE

Maître de conférences en zootechnie et épidémiologie à Oniris

Unité Mixte de Recherche BIOEPAR, Oniris, INRAE



## APPROCHES EPIDEMIOLOGIQUES ET STATISTIQUES POUR LA DETECTION DES TROUBLES DE SANTE ET L'EVALUATION DU BIEN-ETRE CHEZ LES BOVINS

Soutenue le 15 juin 2023 devant le jury composé de :

- Monsieur Benoît DURAND, Directeur de recherche, ANSES de Maisons-Alfort
- Madame Cécile CHEVRIER, Directrice de recherche, INSERM Université Rennes 1
- Monsieur Fabien CORBIERE, Professeur, École Nationale Vétérinaire de Toulouse
- Madame Marie-Pierre ETIENNE, Maîtresse de conférences HDR, Institut Agro Rennes-Angers
- Madame Anne PHILIPPE, Professeure, Nantes Université

# Table des matières

## Table des matières

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | Introduction.....  | 4  |
| 2.    | Curriculum vitae .....   | 5  |
| 2.1   | Etat civil .....   | 5  |
| 2.2   | Poste actuel .....   | 5  |
| 2.3   | Parcours professionnel.....  | 5  |
| 2.4   | Diplômes.....  | 6  |
| 2.5   | Formations complémentaires .....   | 6  |
| 2.6   | Implication dans le montage de projets et financements obtenus .....   | 7  |
| 2.7   | Implication dans des programmes de recherche .....   | 8  |
| 2.8   | Encadrement d'étudiants de M2 recherche et thèses d'exercice .....   | 9  |
| 2.9   | Co-encadrement de thèses .....   | 10 |
| 2.9.1 | Mathilde Mercat.....   | 10 |
| 2.9.2 | Lucile Riaboff .....   | 10 |
| 2.9.3 | Julie Duval.....   | 11 |
| 2.10  | Participation à des jurys de thèse .....   | 11 |
| 3.    | Synthèse des travaux de recherche .....  | 13 |
| 3.1   | Cadre structurel.....  | 13 |
| 3.2   | Orientation générale .....   | 13 |
| 3.3   | Détection de maladies endémiques et évaluation du bien-être animal.....  | 14 |
| 3.3.1 | Contexte et objectifs généraux .....   | 14 |
| 3.3.2 | Détection des mammites des bovins laitiers à l'aide des concentrations en cellules somatiques du lait .....                  | 14 |
| 3.3.3 | Utilisation de capteurs pour l'évaluation du bien-être et de la santé des bovins .....                                       | 17 |
| 3.4   | Surveillance syndromique pour la détection des maladies infectieuses émergentes .....  | 20 |
| 3.4.1 | Contexte et objectifs généraux .....   | 20 |
| 3.4.2 | Développement d'indicateurs et de méthodes pour la détection des maladies vectorielles émergentes des bovins en France ..... | 21 |
| 3.4.3 | Contribution au développement de méthodes pour la surveillance syndromique chez les bovins hors de France .....              | 31 |
| 3.4.4 | Bilan des travaux sur la surveillance syndromique .....  | 33 |
| 3.5   | Surveillance pour prouver l'absence d'une maladie. ....  | 34 |
| 3.5.1 | Contexte et objectifs généraux .....   | 34 |
| 3.5.2 | Vue d'ensemble des méthodes d'estimation de probabilités d'absence de maladies .   | 35 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.5.3 | Conception d'une méthode de quantification de probabilités d'absence de maladie au niveau élevage à partir de données longitudinales..... | 36 |
| 4.    | Projet de recherche.....  | 43 |
| 4.1   | Surveillance des maladies des animaux d'élevage.....  | 43 |
| 4.1.1 | Combiner prédiction et inférence pour la conception et l'évaluation de dispositifs de surveillance.....                                   | 43 |
| 4.1.2 | Utilisation de données longitudinales pour la surveillance des maladies au niveau troupeau  | 44 |
| 4.2   | Utilisation des nouvelles technologies pour la détection des troubles de santé et l'évaluation du bien-être des bovins.....               | 45 |
| 4.2.1 | Projet WAIT4 .....  | 45 |
| 4.2.2 | Détection des boiteries des bovins et évaluation de leurs conséquences.....   | 45 |
| 5.    | Références.....   | 47 |
| 6.    | Liste détaillée des publications .....  | 50 |
| 6.1   | Publications originales dans des journaux à comité de lecture .....   | 50 |
| 6.2   | Publications de revue dans des journaux à comité de lecture.....  | 54 |
| 6.3   | Publications effectuées dans le cadre de congrès internationaux.....  | 54 |
| 6.4   | Publications didactiques.....   | 56 |

# 1. Introduction

Ce document rédigé pour l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches est un résumé des activités de recherche que j'ai conduites ou dans lesquelles j'ai eu une contribution significative, depuis le début de ma thèse.

Je travaille principalement sur la détection des troubles de santé, et depuis plus récemment sur la thématique de l'évaluation du bien-être des bovins. Ces 2 thématiques sont connectées, la santé et le bien-être étant déterminés par les conditions d'élevage et les soins apportés aux animaux, et, au cœur des préoccupations des acteurs de filières et des citoyens. La finalité des travaux conduits est toujours positionnée à un niveau populationnel, qui va du troupeau au pays.

Ma perspective est celle de quelqu'un ayant grandi dans une exploitation bovine laitière, devenu vétérinaire et avec un fort intérêt pour les sciences et les méthodes quantitatives. J'ai donc une formation initiale en médecine vétérinaire complétée par des compétences en épidémiologie et en modélisation statistique acquises pendant et après ma thèse.

Même si la plupart de mes travaux sont par nature quantitatifs, c'est-à-dire qu'ils reposent sur l'utilisation de méthodes mathématiques parfois complexes, le document ne contient aucune équation et très peu de chiffres. J'ai préféré mettre l'accent sur les questions, les concepts et les résultats majeurs. En effet, ma contribution consiste le plus souvent à appliquer et évaluer des méthodes développées par d'autres pour répondre à des questions de santé et de bien-être animal, avec un prisme épidémiologique. Le lecteur intéressé par les détails des différentes méthodes décrites est renvoyé aux articles et autres documents cités qui contiennent des descriptions détaillées.

Enfin, si ce document est destiné à convaincre le jury de la grande valeur de mes contributions, celles-ci sont toujours le fruit de réflexions et de travail de groupes. Depuis le début de ma thèse, j'ai eu la chance de travailler avec des scientifiques et des acteurs des filières de production du monde entier, qui m'ont enrichi de leurs connaissances et de leurs perspectives. Ce qui est présenté dans le document qui suit est donc une histoire subjective et reconstruite de mes contributions à l'épidémiologie vétérinaire, telle que je comprends cette histoire au moment où j'écris ces lignes, avec l'objectif d'en faire un tout cohérent pour le lecteur.

## 2. Curriculum vitae

### 2.1 Etat civil

Aurélien Emmanuel Eugène Madouasse, né le 1<sup>er</sup> juin 1980 à Redon (35).

### 2.2 Poste actuel

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2018, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes Atlantique (Oniris). L'intitulé de mon poste est *Prévention sanitaire pour réduire l'usage des intrants médicamenteux*. Je suis rattaché à la section CNECA<sup>1</sup> 6 : Production animale.

Activités d'enseignement dans le département Santé des Animaux d'Élevage et Santé Publique.

Activités de recherche rattachées à l'Unité Mixte de Recherche 1300 – BIOEPAR Oniris / INRAE.

### Coordonnées professionnelles

Oniris – Site de la Chantrerie

CS 40706

44307 Nantes Cedex 3

Tél : 02 40 68 76 28

E-mail : [aurelien.madouasse@oniris-nantes.fr](mailto:aurelien.madouasse@oniris-nantes.fr)

### 2.3 Parcours professionnel

Le tableau ci-dessous présente mon parcours professionnel.

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Depuis jan. 2018      | <b>Maître de Conférences</b> à l'Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes Atlantique (Oniris).   |
| Avr. 2012 – Jan. 2018 | <b>Maître de Conférences Contractuel</b> à l'Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes Atlantique (Oniris).   |
| Juin 2011 – Avr. 2012 | <b>Post-doctorat – Oniris</b> . En charge de 2 projets. EMIDA EARLY : utilisation des données de production laitière issues du contrôle laitier pour la détection d'émergence de maladies à transmission vectorielle chez les bovins. Projet PNB : coordination du volet français d'une étude épidémiologique européenne sur la pancytopenie néonatale bovine. |
| Jan. 2010 – Juin 2011 | <b>Post-doctorat - University of Nottingham</b> , School of Veterinary Medicine and Science. Utilisation des concentrations en cellules somatiques dans le lait individuel pour l'étude de la dynamique des infections intra-mammaires pendant la période tarie chez la vache laitière.  |
| Nov. 2006 – Déc 2009  | <b>Doctorat – University of Nottingham</b> , School of Veterinary Medicine and Science. Utilisation des concentrations en cellules somatiques du lait et des performances de reproduction chez la vache laitière en Angleterre et au Pays de Galles.   |

---

<sup>1</sup> Commission Nationale des Enseignants-Chercheurs relevant du ministère en charge de l'Agriculture

## 2.4 Diplômes

Le tableau ci-dessous présente mes diplômes en incluant les membres de jurys.

- 2009 **Doctorat d'université** (Ph.D.), Université de Nottingham (Grande-Bretagne). Jury : Prof. Dr. Teo Lam (Pays-Bas), professeur à la faculté vétérinaire d'Utrecht et responsable recherche et développement au GD Animal Health & Dr Wendela Wapenaar, professeure associée à l'école vétérinaire de Nottingham (GB). Travail de thèse réalisé à l'université de Nottingham en Angleterre.
- 2006 **Doctorat vétérinaire**, Université de Nantes. Jury : Prof. Paul Barrière, professeur à la faculté de médecine de Nantes, Dr. Nathalie Bareille maître de conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes et Prof. Henri Seegers, professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes. Travail de thèse réalisé à l'université de Warwick en Angleterre.
- 2005 **Diplôme d'études fondamentales vétérinaires**, Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes
- 2000 **Brevet de Technicien Supérieur en Productions Animales**, Lycée Agricole La Touche (Ploërmel, 56)
- 1998 **Baccalauréat Scientifique**, Lycée agricole La Touche (Ploërmel, 56)

## 2.5 Formations complémentaires

Le tableau ci-dessous contient la liste des formations que j'ai suivies depuis mon arrivée à Oniris.

- 2022 **Introduction à l'intelligence artificielle et au machine learning.** Formation d'une demi-journée organisée dans le cadre du méta-programme INRAE DIGIT-BIO.
- 2020 **Formation sciences ouvertes** à l'INRA de Nantes. Formation d'une journée sur les enjeux autour du partage des données et productions scientifiques.
- 2018 **Leadership workshop** (COST, Bruxelles). Formation d'une journée sur le fonctionnement des réseaux COST et la gestion des responsabilités dans ces réseaux et dans les projets européens de façon plus générale.
- 2017 **Formation Média training** (Spescimen). Formation de 3 jours à la communication écrite, radiophonique et vidéo par des journalistes scientifiques et spécialistes de l'audiovisuel. L'objectif était d'apprendre à faire passer des messages scientifiques dans les media.
- 2017 **Formation Fouille de données** (AnaStats). Formation de 3 jours aux concepts et outils pour la fouille de données. Alors que les méthodes statistiques reposent sur des hypothèses relatives aux distributions des données et des paramètres permettant de les expliquer, les méthodes de fouille de données sont basées sur la capacité prédictive des modèles. Ces méthodes ont fait l'objet de nombreux développements récents et d'un engouement de la part des épidémiologistes.
- 2014 **Formation des enseignants-chercheurs.** Formation à la pédagogie de 20 jours par l'équipe EDUTER Recherche d'AgroSup Dijon organisée par la DGER
- 2014 **Ecole des doctorants et des encadrants (EDEN).** Formation INRA de 4 jours sur l'encadrement des doctorants

## 2.6 Implication dans le montage de projets et financements obtenus

Le tableau ci-dessous est une synthèse des projets que j'ai contribué à monter ou pour lesquels j'ai obtenu un financement. Ces projets sont décrits plus en détail dans les sections suivantes.

| Nom du projet            | Période   | Financement                              | Partenaires   | Rôles  | Montant                |
|--------------------------|-----------|--|---|--|------------------------|
| <b>WAIT4</b>             | 2022-2027 | Etat français : PEPR / PIA4              | INRAE, INRIA<br>~20 équipes                                   | Participation au montage<br>Membre du groupe de pilotage / 5 personnes<br>Responsable de <i>work package</i> | 3 millions €           |
| <b>PREPARED (soumis)</b> | 2022      | ERA-NET ICRAD                            | UCD (IE), SVA (SE), GD Animal Health (NL), Uni. Thessaly (GR) | Participation au montage<br>Responsable de <i>work package</i>   | 1 million € (demandés) |
| <b>RUMBA</b>             | 2021-2022 | INRAE : méta-programme SANBA             | INRAE MoSAR (M. Taghipoor)                                    | Co-porteur   | 10 000€                |
| <b>Harmony</b>           | 2019-2023 | COST                                     | Réseau international  | Participation au montage<br>Responsable de <i>working group</i>  | 500 000€               |
| <b>SOUND control</b>     | 2018-2022 | COST                                     | Réseau international  | Participation au montage<br>Responsable de <i>working group</i>  | 500 000€               |
| <b>STOC free</b>         | 2017-2021 | EFSA                                     | UCD (IE), AHI (IE), Uni. Utrecht (NL), GD (NL)                | Participation au montage<br>Co-responsable de <i>work package</i>  | 350 000€               |
| <b>BVDRISK</b>           | 2019      | Soutien département santé animale/ INRAE | -   | Investigateur principal  | 10 000€                |
| <b>VAGABOND</b>          | 2017-2020 | CIFRE + région Pays de la Loire          | ESEO, ESA, Terrena  | Participation au montage<br>Membre du comité de pilotage   | 350 000€               |



## 2.7 Implication dans des programmes de recherche

Dans cette section, je décris les différents projets de recherche dans lesquels j'ai été impliqué de manière significative depuis mon arrivée dans l'UMR BIOEPAR.

- Oct. 2019 – **Réseau COST Harmony** sur les outils statistiques innovants pour l'évaluation de tests  
oct. 2023 et l'estimation de prévalence (<https://harmony-net.eu/>).  
**Financement** : COST (European Cooperation in Science and Technology)  
**Rôle** : responsable du *working group 4* : certification of disease freedom
- Oct. 2018 – **Réseau COST SOUND control** sur la comparabilité des résultats de la surveillance  
oct. 2022 épidémiologique dans le cadre du contrôle des maladies non réglementées des bovins dans l'Union Européenne. Je suis responsable du groupe de travail sur les méthodes.  
(<https://sound-control.eu/>).  
**Financement** : COST  
**Rôle** : responsable du *working group 3* : evaluation of existing methods
- Mars 2017 – **Projet STOC free**. Projet européen sur la surveillance des maladies non réglementées  
– déc. 2021 des bovins. J'étais responsable du *Work package* dont l'objectif était de développer une méthode d'estimation de probabilité d'absence de maladie.  
(<https://www.stocfree.eu/>)  
**Financement** : European Food Safety Authority (EFSA)  
**Partenaires** : UMR BIOEPAR, University College Dublin (Irlande), Animal Health Ireland, Utrecht University (, Pays-Bas, porteurs du projet), GD animal Health (Pays-Bas), Friedrich-Loeffler-Institut (Allemagne), National Veterinary Institute (Suède), Scotland's Rural College (Royaume-Uni).  
**Rôle** : co-responsable du work package 1 – Development of STOC free model. Encadrement de la thèse de Mathilde Mercat.
- 2016 – **Projet CADENCE** Propagation de processus épidémiques sur des réseaux dynamiques  
2021 de mouvements d'animaux avec application aux bovins en France.  
(<https://www6.angers-nantes.inrae.fr/bioepar/Recherche/Projets-en-cours/CADENCE> )  
**Financement** : Agence Nationale de la Recherche  
**Partenaires** : UMR BIOEPAR, UMR MalAGE (porteurs du projet), ANSES, Université Paris 6, Université Paris 13, Polytech Paris, University de Lille.  
**Rôle** : Participation au work package 2. Caractérisation des mouvements bovins entre exploitations et de leurs déterminants à partir d'enquêtes de terrain et de la base de données nationale d'identification.
- 2017 – **Projet VAGABOND – VALorisation GéolocAlisation des BOviNs**.  
2020 **Financement** : thèse Cifre / coopérative agricole Terrena  
**Partenaires** : UMR BIOEPAR, UR URSE (Ecole supérieure d'Agriculture d'Angers), Ecole supérieure d'électronique de l'ouest (ESEO, Angers)  
**Rôle** : participation au comité de pilotage du projet et à l'encadrement de la thèse de Lucile Riaboff, bien que ne faisant pas partie de la liste des encadrants officiels. Encadrant du projet post-doctoral de Lucile Riaboff (3 mois à BIOEPAR).
- Oct. 2012 – **Projet IMPRO** : *Impact matrix analysis and cost-benefit calculations to improve*  
oct. 2016 *management practices regarding health status in organic dairy farming*. Projet européen sur la gestion de la santé en élevage bovin biologique.  
**Financement** : Seventh framework programme of the European Community for research and technological development including demonstration activities (FP7)  
**Partenaires** : UMR BIOEPAR, University of Kassel (Allemagne, porteurs du projet), Swedish University of Agricultural Science (Suède), Wageningen University (Pays-Bas), Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (Espagne) et University of Reading (Royaume-Uni).

- Rôle** : participation au work package *improving monitoring and prevention on the herd-level*. Co-encadrement de la thèse de Julie Duval.
- 2014-2015 **EQUIBIO** : Etude de la notion d'équilibre en élevage laitier biologique.  
**Financement** : métaprogramme INRA Gestion Intégrée de la Santé Animale  
**Partenaires** : UMR BIOEPAR, UMR EPIA  
**Rôle** : responsable du work package *Objectiver les pertes d'équilibre sanitaire en élevage biologique et les prévenir*.
- Juin 2011 – **Projet Early Detection Data**. Projet européen sur la surveillance syndromique.  
 déc. 2012 **Financement** : EMIDA ERA-NET – Coordination of European Research Funding on Emerging and Major Infectious Diseases of Livestock  
**Partenaires** : UMR BIOEPAR, GD Animal Health (Pays-bas, porteur du projet) et le CVD-ERA (Belgique).  
**Rôle** : chercheur postdoctoral. Conception et évaluation d'indicateurs et de méthodes pour la surveillance syndromique.
- Juin 2011 – **Bovine neonatal pancytopenia** – identification des facteurs de risque d'un syndrome  
 déc. 2012 hémorragique des veaux.  
**Financement** : Pfizer Animal Health  
**Partenaires** : UMR BIOEPAR, Royal Veterinary College (Royaume-Uni, porteur du projet), Faculty of Veterinary Science, University of Munich (Allemagne), Faculty of Veterinary Science, Utrecht University (Pays-Bas), GD Animal Health (Pays-Bas) et Faculty of Veterinary Medicine, Ghent University (Belgique)  
**Rôle** : chercheur postdoctoral. Coordination du volet français d'une étude européenne multicentrique. Participation à l'analyse des résultats.

## 2.8 Encadrement d'étudiants de M2 recherche et thèses d'exercice

- **Thinhinane Hachemani**, 2022, projet CADENCE, Master 2 Gestion Intégrée des Maladies Animales Tropicales (GIMAT). Co-encadré avec Arnaud Rault. Typologie et la description des mouvements bovins à partir de la base de données nationale d'identification.
- **Marine Guettier**, 2021, projet CADENCE, Master 2 Modélisation en écologie (MODE). Typologie et la description des mouvements bovins à partir de la base de données nationale d'identification.
- **Mohamed-Aliou Tounkara**, 2019, projet CADENCE, Master 2 Statistiques et traitement de données à l'université de Clermont-Auvergne. Co-encadré avec Arnaud Rault. Typologie et la description des mouvements bovins à partir de la base de données nationale d'identification.
- **Coralie Bernard**, 2018, Projet STOC free, thèse d'exercice vétérinaire. Description de la diversité des plans de lutte contre la BVD mis en œuvre en France.
- **Charles-Elie Petiot**, 2018, projet VAGABOND, thèse d'exercice vétérinaire. Etude des liens entre boiteries, comportements et production laitière des vaches au pâturage.
- **François Bienne**, étudiant ingénieur à UniLaSalle à Rouen et **Cassandra Matras**, étudiante ingénieure à AgroSup Dijon, 2017, projet CADENCE. Co-encadrés avec Arnaud Rault (CR INRAE en économie à BIOEPAR), Aurélie Courcoul et Benoit Durand (Laboratoire de Santé Animale de l'Anses Maisons-Alfort). Amélioration de la compréhension des pratiques et des déterminants des mouvements de bovins en France en régions laitière et allaitante respectivement au travers d'enquêtes de terrain.
- **Camaldine Camara**, 2015, projet EQUIBIO, thèse d'exercice vétérinaire. Caractérisation statistique d'états d'équilibre et de déséquilibre à partir de données de production en élevages bovins laitiers.
- **Pauline Desbouiges**, 2013, projet Bovine Neonatal Pancytopenia, thèse d'exercice vétérinaire. Description épidémiologique de 440 cas de pancytopenie néonatale bovine.
- **Thomas Lesuffleur**, 2012, projet EMIDA EARLY, master santé publique option biostatistiques de l'ISPED – Bordeaux, co-encadré avec Alexis Marceau et Christine Fourichon. Application de

l'algorithme Cusum pour la détection d'excès d'évènements reproductifs anormaux à partir des données démographiques et d'insémination artificielle.

## 2.9 Co-encadrement de thèses

### 2.9.1 Mathilde Mercat

Le travail de thèse qui s'est déroulée de 2017 à 2021 s'inscrivait dans le projet STOC free. L'objectif était de développer un modèle d'estimation d'une probabilité d'absence d'infection à partir de données hétérogènes incluant des résultats de test et des facteurs de risque. Il a été co-encadré par Christine Fourichon (HDR) et moi-même. J'ai conçu le modèle statistique, puis j'ai formé Mathilde à l'inférence bayésienne et à l'utilisation du modèle. J'ai accompagné Mathilde dans le développement et la mise en œuvre un protocole d'évaluation de ce modèle à partir de données simulées. Mathilde est première auteure d'une publication sur l'évaluation du modèle publiée dans *Preventive Veterinary Medicine*. Elle est actuellement chercheur contractuelle au CIRAD à Montpellier.

#### Publications issues de la thèse :

Dans l'article suivant, nous avons évalué la valeur ajoutée du modèle développé dans le projet STOC free sur des données simulées. L'article a été publié dans *Preventive Veterinary Medicine* qui est le journal de référence en épidémiologie animale.

**Mercat M.**, van Roon A. M., Santman-Berends I., van Schaik G., Nielen M., Graham D., More S. J., Guelbenzu-Gonzalo M., Fourichon C., **Madouasse A.** 2022. Capacity of a Bayesian model to detect infected herds using disease dynamics and risk factor information from surveillance programmes: A simulation study. *Preventive Veterinary Medicine*, 200:105582 [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2022.105582](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2022.105582).

Le modèle STOC free est décrit dans une publication dont Mathilde est deuxième auteure. Nous avons fait le choix de publier dans le *Peer Community Journal* qui repose sur un modèle d'évaluation transparent.

**Madouasse A.**, **Mercat M.**, van Roon A., Graham D., Guelbenzu M., Santman Berends I., van Schaik G., Nielen M., Frössling J., Ågren E., Humphry R., Eze J., Gunn G., Henry M. K., Gethmann J., More S. J., Toft N., Fourichon C. 2022. A modelling framework for the prediction of the herd-level probability of infection from longitudinal data. *Peer Community Journal*, 2:e4. DOI: [10.24072/pcjournal.80](https://doi.org/10.24072/pcjournal.80).

### 2.9.2 Lucile Riaboff

La thèse s'est déroulée entre 2017 et 2020, dans le cadre du projet Vagabond. L'objectif était la prédiction de comportements des vaches laitières à partir d'accéléromètres et l'évaluation de l'impact des maladies et des caractéristiques des prairies sur ces comportements. Lucile a fini ses travaux sur les boiteries au cours d'un contrat post-doctoral de 4 mois à BIOEPAR. J'ai participé à l'encadrement de la thèse, bien que n'étant pas encadrant officiel, puis j'ai supervisé le travail post-doctoral. Lucile est première auteure de 3 articles rédigés pendant la thèse et d'un article rédigé pendant le post-doctorat à BIOEPAR. Elle est actuellement en post-doctorat à University College Dublin.

#### Publications issues du post-doctorat :

Pendant la thèse de Lucile, nous avons collecté des données sur les boiteries des vaches incluses, qui ont servi de support au travail effectué lors du post-doctorat effectué à BIOEPAR, que j'ai encadré. Ces données de boiteries ont été recueillies par un étudiant vétérinaire (Charles-Elie Petiot) que j'ai

encadré pour sa thèse d'exercice. Ce travail a été publié dans *Preventive Veterinary Medicine* qui est le journal de référence en épidémiologie animale.

**Riaboff L.**, Relun A., Petiot C.-E., Feuilloy M., Couvreur S., **Madouasse A.** 2021. Identification of discriminating behavioural and movement variables in lameness scores of dairy cows at pasture from accelerometer and GPS sensors using a Partial Least Squares Discriminant Analysis. *Preventive Veterinary Medicine*, 193:105383 [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2021.105383](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2021.105383).

#### Publications issues de la thèse :

**Riaboff L.**, Couvreur S., **Madouasse A.**, Roig-Pons M., Aubin S., Massabie P., Chauvin A., Bédère N., Plantier G. 2020. Use of Predicted Behavior from Accelerometer Data Combined with GPS Data to Explore the Relationship between Dairy Cow Behavior and Pasture Characteristics. *Sensors*, 20(17):4741 [IF21=3.847] DOI: [10.3390/s20174741](https://doi.org/10.3390/s20174741).

**Riaboff L.**, Poggi S., **Madouasse A.**, Couvreur S., Aubin S., Bédère N., Goumand E., Chauvin A., Plantier G. 2020. Development of a methodological framework for a robust prediction of the main behaviours of dairy cows using a combination of machine learning algorithms on accelerometer data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169:105179 [IF21=6.757] DOI: [10.1016/j.compag.2019.105179](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105179).

**Riaboff L.**, Aubin S., Bédère N., Couvreur S., **Madouasse A.**, Goumand E., Chauvin A., Plantier G. 2019. Evaluation of pre-processing methods for the prediction of cattle behaviour from accelerometer data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165:104961 [IF21=6.757] DOI: [10.1016/j.compag.2019.104961](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104961).

#### 2.9.3 Julie Duval

La thèse s'est déroulée de 2013 à 2016 dans le cadre du projet IMPRO. Cette thèse portait sur l'évaluation de l'efficacité de démarches d'intervention pour améliorer la santé des vaches laitières en élevages agrobiologiques et conventionnels. La thèse a donné lieu à 3 articles. Julie est aujourd'hui chargée de recherche INRAE à l'UMR Territoires (AgroParisTech, INRAE, Université Clermont-Auvergne, VetAgro Sup).

#### Publications issues de la thèse :

**Duval J. E.**, Bareille N., **Madouasse A.**, de Joybert M., Sjöström K., Emanuelson U., Bonnet-Beaugrand F., Fourichon C. 2018. Evaluation of the impact of a Herd Health and Production Management programme in organic dairy cattle farms: a process evaluation approach. *Animal*, 12(7):1475-1483. [IF21=3.730] DOI: [10.1017/S1751731117002841](https://doi.org/10.1017/S1751731117002841).

**Duval J. E.**, Bareille N., Fourichon C., **Madouasse A.**, Vaarst M. 2017. How can veterinarians be interesting partners for organic dairy farmers? French farmers' point of views. *Preventive Veterinary Medicine*, 146:16-26. [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2017.07.013](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.07.013).

**Duval J. E.**, Bareille N., Fourichon C., **Madouasse A.**, Vaarst M. 2016. Perceptions of French private veterinary practitioners' on their role in organic dairy farms and opportunities to improve their advisory services for organic dairy farmers. *Preventive Veterinary Medicine*, 133:10-21. [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2016.09.008](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.09.008).

**Duval J. E.**, Fourichon C., **Madouasse A.**, Sjöström K., Emanuelson U., Bareille N. 2016. A participatory approach to design monitoring indicators of production diseases in organic dairy farms. *Preventive Veterinary Medicine*, 128:12-22. [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2016.04.001](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.04.001).

#### 2.10 Participation à des jurys de thèse

J'ai été membre des jurys de thèse universitaire suivants :

- **Esener Necati**, 2021, Implementation of machine learning for the evaluation of mastitis and antimicrobial resistance in dairy cows. PhD thesis, University of Nottingham.
- **Fauvel Kévin**, 2020, Enhancing performance and explainability of multivariate time series machine learning methods: applications for social impact in dairy resource monitoring and earthquake. PhD thesis, Université Rennes 1.
- **Leclère Brice**, 2020, Algorithmes de détection précoce des épidémies hospitalières : Synthèse et propositions. PhD thesis, Université de Nantes.
- **Morignat Eric**, 2020, Caractérisation et quantification des effets de la température sur la mortalité bovine en France métropolitaine. PhD thesis, Université Paris Est.
- **Nijs Hanne**, 2020, Investigating the feasibility of developing an efficient, validated, sustainable on-farm syndromic surveillance system for beef cattle and sheep. PhD thesis, University of Warwick.

Pour les jurys de thèse en Angleterre (H. Nijs et N. Esener), j'avais une fonction analogue à celle d'un rapporteur en France dans la mesure où ces jurys ne sont constitués que de 2 membres : un membre interne appartenant à la même université que le candidat et un membre externe.

### 3. Synthèse des travaux de recherche

#### 3.1 Cadre structurel

Mes recherches se font dans l'unité mixte de recherche 1300 – BIOEPAR (pour BIOlogie, EPidémiologie et Analyse de Risque en santé animale), qui a pour organismes de tutelle INRAE et Oniris. La directrice de l'unité est Nathalie Bareille, assistée de Christine Fourichon et de Thierry Hoch. Dans le bilan rédigé pour l'évaluation HCERES de 2021, l'unité compte 53 permanents dont 31 scientifiques et 22 personnels support. Les objectifs généraux de l'unité<sup>2</sup> sont de produire :

- des connaissances et méthodes pour la gestion de la santé animale,
- des connaissances fondamentales pour comprendre les mécanismes d'apparition des maladies transmissibles.

L'unité est structurée en 5 équipes qui travaillent sur des entités d'applications différentes et avec des approches méthodologiques diverses. En résumé, l'équipe APPIFISH travaille sur l'antibiorésistance et les pathologies infectieuses des poissons, l'équipe DYNAMO travaille sur la modélisation mécaniste des maladies infectieuses des animaux d'élevage, l'équipe IMMUNOCARE travaille sur les maladies respiratoires des bovins et des porcs avec des approches moléculaires et l'équipe TIBODI travaille sur les tiques et les maladies à tiques avec des approches qui vont de la biologie moléculaire à la dynamique de populations. Je fais partie de l'équipe **PEP'S**. Les finalités des travaux conduits dans cette équipe sont l'amélioration continue de la santé et du bien-être animal, ainsi que la réduction des intrants médicamenteux et la préservation de la santé publique. Les méthodes mobilisées sont celles de l'épidémiologie.

#### 3.2 Orientation générale

J'utilise les concepts de l'épidémiologie et des méthodes statistiques pour répondre à des questions sur la santé, le bien-être et la production des bovins.

J'ai effectué une thèse universitaire en épidémiologie vétérinaire quantitative à l'université de Nottingham en Angleterre. Ce travail a porté sur la description et la compréhension des mammites (inflammation de la glande mammaire d'origine bactérienne) des bovins et de la fécondité en élevage bovin laitier, à partir d'une base de données nationale. J'ai acquis des compétences en épidémiologie, en manipulation et traitement de données et en inférence statistique, notamment en inférence bayésienne.

J'ai ensuite consolidé ces compétences lors de 2 post-doctorats. Lors d'un premier post-doctorat de 18 mois à l'université de Nottingham, j'ai travaillé sur l'évaluation de divers facteurs de risque de mammite pendant la période tarie chez la vache laitière ; et à leur intégration dans un simulateur d'impact économique. Ce travail a consisté en l'analyse d'une grande base de données collectée par le contrôle laitier anglais, puis au développement d'un programme de simulations de Monte-Carlo. J'ai ensuite été recruté pour un post-doctorat de 18 mois dans l'UMR BIOEPAR, au cours duquel j'ai travaillé sur 2 projets distincts. Une partie de mon travail a été de développer des méthodes pour la surveillance des maladies à transmission vectorielle émergentes des bovins à partir de données équivalentes à celles utilisées pour ma thèse. L'autre partie de mon travail était la coordination du volet français d'une étude européenne multicentrique sur l'identification des causes d'un syndrome hémorragique des veaux. Pour ce dernier projet, j'ai coordonné le recueil d'échantillons et

---

<sup>2</sup> Voir le site internet de l'unité : <https://www6.angers-nantes.inrae.fr/bioepar>

d'informations de terrain par les vétérinaires libéraux, j'ai participé à la préparation des échantillons biologiques, j'ai contribué à la définition de la stratégie d'analyse des données et d'interprétation des résultats et à leur publication. J'ai été recruté en tant qu'enseignant-chercheur contractuel avant la fin prévue de ce contrat. La suite de mon activité de recherche s'est faite à BIOEPAR, ce qui fait que j'ai pu mener à leur terme ces projets.

Mes travaux de recherche depuis mon recrutement en tant qu'enseignant-chercheur à Oniris ont porté sur la détection d'évènements relatifs au bien-être et à la santé des bovins et l'identification de leurs déterminants, à des échelles qui vont de l'animal au territoire, via l'utilisation ou le développement puis l'évaluation de méthodes quantitatives. Le fil directeur de ces différents travaux est méthodologique. Une partie de mes recherches porte sur la surveillance des maladies infectieuses des bovins, avec des travaux sur la surveillance syndromique pour la détection des maladies émergentes, puis, plus récemment, des travaux sur la surveillance pour prouver qu'une maladie est absente d'un troupeau ou d'un territoire (*freedom from disease*). Un second volet porte sur la détection de troubles de santé et de problèmes de santé et de bien-être à partir de données issues de capteurs ou de données informatiques collectées en élevage. Mon implication sur cette thématique a débuté en 2017 avec un projet sur l'utilisation d'accéléromètres et de GPS pour la prédiction des comportements des bovins au pâturage et l'évaluation de l'impact de divers facteurs, notamment les boiteries, sur ces comportements.

En résumé, les objectifs généraux de mes recherches sont la détection de troubles de santé et l'évaluation du bien-être animal à des échelles qui vont de l'animal au territoire. Les données utilisées sont issues de grandes bases de données de production et de reproduction, de programmes de surveillance ou collectées en fermes à l'aide de capteurs. Je mobilise des méthodes statistiques, qu'elles soient fréquentistes ou bayésiennes, et plus récemment des méthodes d'apprentissage automatique. Dans le reste de cette section, les objectifs généraux sont déclinés en 3 thèmes qui sont structurants.

### 3.3 Détection de maladies endémiques et évaluation du bien-être animal

#### 3.3.1 Contexte et objectifs généraux

Dans les élevages bovins, comme dans toutes les populations animales, sévissent des maladies endémiques, c'est-à-dire des maladies qui persistent à l'échelle d'une population, et, dont l'incidence est modérément élevée à élevée, sans variations importantes au cours du temps. Chez les bovins laitiers, on compte parmi ces maladies les mammites, les boiteries, les diarrhées néonatales, ou des maladies infectieuses comme la paratuberculose. Il est important de pouvoir détecter ces maladies et d'identifier des leviers d'action pour en réduire la prévalence. Ces maladies, et d'autres facteurs d'élevage, causent une détérioration évidente du bien-être des bovins.

Dans la section qui suit, je présente les travaux sur les mammites auxquels j'ai participé pendant ma thèse et lors d'un post-doctorat de 18 mois qui lui a fait suite. La section suivante aborde des travaux sur la prédiction du comportement des bovins à partir de capteurs placés sur les vaches, et l'utilisation des comportements détectés pour l'évaluation de l'impact et la détection des boiteries.

#### 3.3.2 Détection des mammites des bovins laitiers à l'aide des concentrations en cellules somatiques du lait

Les mammites sont des affections fréquentes des vaches laitières, qui sont responsables de douleurs, de diminution de production laitière et qui induisent des traitements antibiotiques pour éliminer les

bactéries responsables des quartiers atteints. Bien que les infections responsables soient parfois associées à des manifestations cliniques visibles, beaucoup d'infections sont asymptomatiques. Ces infections sub-cliniques ont toutefois des conséquences négatives en terme de bien-être et de production laitière. Deux catégories d'infections sont habituellement distinguées dans l'épidémiologie des mammites. On a d'une part des infections d'origine environnementale dont les agents étiologiques sont souvent d'origine fécale. On considère que ces agents pathogènes n'étant pas adaptés à la survie dans la mamelle, ils sont rapidement détectés et éliminés par le système immunitaire de la vache, souvent après un épisode d'inflammation aiguë qui se traduit par des signes cliniques. On a d'autre part des infections d'origine mammaire, c'est-à-dire causées par des agents pathogènes adaptés à survivre dans la mamelle et qui se transmettent de vache à vache, souvent pendant ou autour de la traite. Dans ce cas, les signes cliniques sont rares en regard de la durée des infections. Bien qu'on ait plus vraisemblablement un continuum entre ces 2 catégories d'infections qu'une distinction nette, il est important de pouvoir déterminer la fréquence de chaque type d'infections dans un troupeau. En effet, les sources d'infections et les mesures de maîtrise sont différentes pour les infections d'origine environnementales et celles d'origine mammaire.

La prévalence et l'incidence des mammites peuvent être connues dans les élevages participant au contrôle laitier. Le contrôle laitier est un service payant pour les éleveurs qui consiste à mesurer la quantité et la qualité du lait pour toutes les vaches en lactation d'un troupeau, avec une fréquence mensuelle. Parmi les paramètres de composition mesurés figure la concentration en cellules somatiques (CCS) du lait. Cette concentration est un marqueur d'inflammation et d'infection. En l'absence d'infection, ces cellules somatiques sont principalement des cellules de l'épithélium mammaire et des macrophages. Lorsqu'une bactérie est présente dans un quartier, des polynucléaires neutrophiles et des lymphocytes sont recrutés et font augmenter la CCS. Bien que la CCS soit augmentée en cas d'infection, il existe un certain recouvrement dans les distributions des CCS chez les vaches saines et chez les vaches infectées. C'est-à-dire que pour une large gamme de CCS, il n'est pas possible d'être sûr du statut infectieux de la vache. Ce problème est accentué par le fait que la mesure de la CCS est effectuée pour les 4 quartiers d'une vache, alors que ces quartiers sont indépendants vis-à-vis de l'infection. Ceci a conduit dans les années 1990 à un certain nombre de travaux pour déterminer les sensibilités et les spécificités de différents seuils pour la détection des infections intramammaires. Un seuil de 200 000 cellules/mL a été identifié comme représentant un bon compromis entre sensibilité et spécificité. Bien que ce seuil soit largement utilisé dans les publications internationales, d'autres seuils sont utilisés. Par exemple, le contrôle laitier français utilise un seuil de 300 000 cellules/mL pour analyser les données recueillies. En pratique, il n'est pas nécessaire de connaître avec certitude le statut infectieux de chaque vache pour agir au niveau d'un troupeau. L'approche habituellement utilisée consiste dans un premier temps à calculer des indicateurs au niveau troupeau pour chaque date de contrôle laitier, puis à calculer des moyennes annuelles par troupeau. Il est alors possible de regarder comment chaque troupeau se positionne par rapport au reste de la population pour chacun des indicateurs calculés. A titre d'exemple, on peut considérer pour un indicateur de prévalence des CCS élevées en lactation, qu'un troupeau se situant au niveau des 10% les meilleurs de son groupe de référence est dans une situation acceptable. L'approche qui consiste à situer les performances individuelles par rapport aux performances du groupe est appelée *benchmarking* en anglais. Son intérêt réside dans le fait qu'il n'y a pas besoin que le seuil utilisé soit le meilleur pour que la méthode fonctionne.

Pour ma thèse, réalisée à l'université de Nottingham, j'avais à disposition les données de 2 128 troupeaux d'Angleterre et du Pays de Galles. La première étape a été de décrire les indicateurs pertinents pour l'analyse des problèmes de mammites au niveau de cet échantillon de grande taille, puis de quantifier l'association entre chaque indicateur et les concentrations en cellules somatiques



du lait de tank (Madouasse et al., 2010). Les CCS de tank mesurent la situation globale du troupeau vis-à-vis des mammites et sont utilisées pour le paiement du lait. Ces CCS de tank ont été estimées à partir des CCS individuelles issues du contrôle laitier, pondérées des quantités de lait correspondantes. Les différents indicateurs étudiés ont été construits à partir des CCS individuelles, en considérant 2 contrôles successifs. Deux seuils différents, 100 000 et 200 000 cellules/mL, ont été utilisés pour classer chaque vache à chaque contrôle comme ayant une CCS basse, moyenne ou élevée. En considérant 2 contrôles laitiers consécutifs, ces 3 catégories permettent de définir 9 transitions possibles. Enfin, il est pertinent de distinguer les vaches en lactation, des vaches lors de leur premier contrôle après un tarissement, des primipares lors du premier contrôle de leur carrière, car, du fait de l'organisation de l'élevage, ces animaux sont exposés à des facteurs de risque différents. Les proportions de vaches dans chacune des catégories ainsi définies ont été calculées pour chaque contrôle. Les contributions de ces proportions à la CCS de tank ont été quantifiées à l'aide d'un modèle linéaire mixte estimé dans un cadre bayésien. Un seuil unique de 200 000 cellules/mL pour toutes les catégories de vaches était associé à des meilleurs performances prédictives. Les catégories de vaches avec la plus forte contribution à la CCS étaient les vaches avec une CCS élevée lors du premier contrôle après tarissement. Toutefois, lors de chaque contrôle, les proportions de ces vaches sont habituellement faibles car il n'y a qu'un seul premier contrôle après vêlage par lactation. Ceci souligne tout de même l'importance de la période tarie sur la santé mammaire lors de la lactation suivante. La catégorie qui contribuait ensuite le plus aux CCS de tank était les vaches multipares en lactation avec une CCS supérieure à 200 000 cellules/mL pendant 2 contrôles consécutifs, c'est-à-dire les vaches avec une infection chronique. Ces vaches sont plus probablement infectées par une bactérie à réservoir mammaire.

A partir de ces mêmes données, nous avons ensuite analysé la dynamique des infections pendant la période tarie (Madouasse et al., 2012a). La période tarie est la période séparant 2 lactations successives, pendant laquelle les vaches ne sont pas traitées. Le tarissement est initié par l'éleveur qui arrête de traire chaque vache selon divers critères, souvent en fonction de la date prévue du vêlage suivant. La lactation reprend avec la naissance d'un veau. Les 2 enjeux principaux vis-à-vis des mammites autour du tarissement sont la prévention des nouvelles infections pour les vaches saines au tarissement et l'élimination des infections pour les vaches infectées au tarissement. On peut définir les 4 événements correspondants, à savoir l'absence/présence de nouvelle infection et l'absence/présence de guérison, en combinant les valeurs de CCS au dernier contrôle avant tarissement et au premier contrôle de la lactation suivante. Nous avons identifié la production laitière au dernier contrôle avant tarissement comme ayant une association positive avec la probabilité de nouvelle infection et une association négative avec la probabilité de guérison. L'explication probable est que les vaches produisant beaucoup de lait au moment du tarissement ont une probabilité accrue de perte de lait, qui pourrait être associée à l'entrée de bactéries dans la mamelle par les sphincters de trayons ouverts. La parité de la vache, la saison de vêlages et le stade de lactation au premier contrôle étaient également associés à la probabilité d'une CCS élevée au premier contrôle après vêlage. Ce travail a aussi été formateur d'un point de vue méthodologique. Des simulations réalisées à partir des résultats du modèle ont permis d'en évaluer les implications pour chacune des variables étudiées. A titre d'exemple, les associations entre 4 des variables retenues dans le modèle et la probabilité d'une CCS élevée au premier contrôle de la lactation sont présentées sur la Figure 1. Ce type de présentation, encore peu utilisée en épidémiologie vétérinaire au moment de la publication, permet d'aller au-delà de la significativité statistique en montrant les ordres de grandeurs des associations identifiées.

Enfin, toujours à partir de ces données, nous avons quantifié les productions laitières entre 0 et 305 jours de lactation en fonction de la dernière valeur de CCS pour la lactation précédente et de la

première CCS pour la lactation en cours (Madouasse et al., 2012b). Par rapport aux vaches avec des CCS inférieures à 200 000 cellules/mL aux 2 contrôles, les vaches avec une CCS supérieure à 200 000 cellules/mL au premier contrôle de la lactation en cours avaient des productions laitières inférieures d'environ 200 à 500 kg par lactation. Cela montre qu'en plus des répercussions cliniques qu'elles peuvent avoir, les infections intra-mammaires acquises ou non guéries pendant la période tarie ont un impact majeur sur la production laitière.

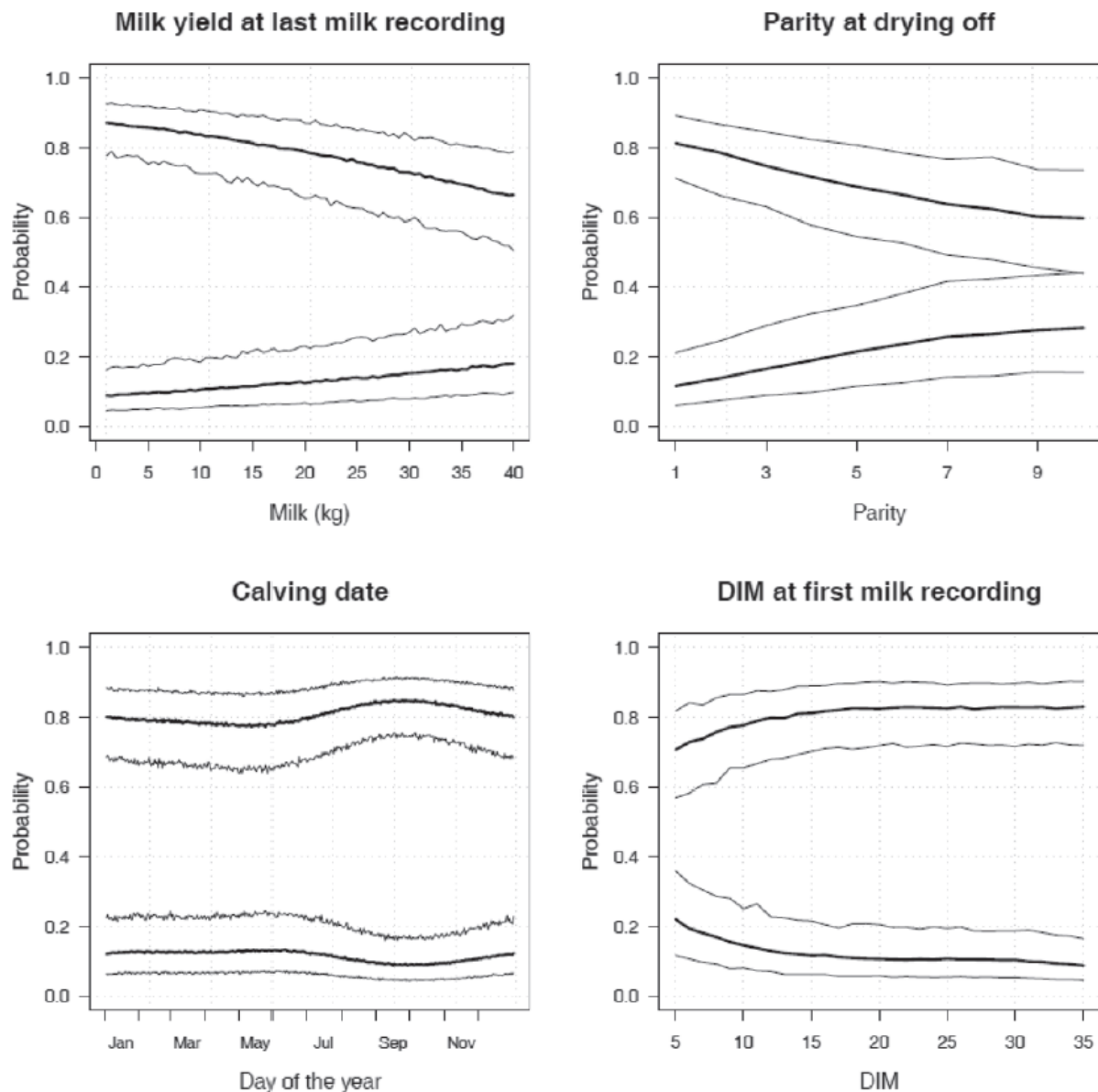


Figure 1: Probabilités de nouvelle infection (courbes du bas) et de guérisons (courbes du haut) prédites à partir du modèle décrit dans Madouasse et al., 2012 en fonction de la production laitière au dernier contrôle de la lactation (en haut à gauche), de la parité au tarissement (en haut à droite), de la date de vêlage (en bas à gauche) et du stade de lactation au premier contrôle de la lactation (en bas à droite). Figure extraite de Madouasse et al., 2012.

### 3.3.3 Utilisation de capteurs pour l'évaluation du bien-être et de la santé des bovins

Les développements technologiques des dernières décennies ont conduit à l'utilisation dans de nombreux élevages de capteurs pour la gestion de la production et de la santé des bovins. Parmi ces capteurs, on peut lister les capteurs identifiant les animaux, tels qu'utilisés dans les distributeurs automatiques de concentrés ou les robots de traite, les compteurs à lait, les colliers pour la détection

des chaleurs, des accéléromètres ou des caméras pour la détection des vèlages. Plus récemment, ce sont les méthodes informatiques pour l'exploitation des données collectées par ces capteurs qui ont connu un essor fulgurant. Ces développements technologiques et méthodologiques ouvrent de nouvelles perspectives pour l'amélioration de la santé et du bien-être en élevage.

Parmi les capteurs développés, les accéléromètres détectent les accélérations (variations de vitesse en fonction du temps) dans les 3 dimensions de l'espace, et peuvent donc être utilisés pour caractériser les mouvements de différentes parties du corps des bovins. Certains comportements tels que la marche, le fait de brouter, le couchage... sont associés à des signaux accélérométriques typiques qui rendent l'identification du comportement associé possible. Dans un projet de thèse Cifre avec pour partenaire financeur la coopérative agricole Terrena et pour partenaires académiques l'UMR BIOEPAR, l'unité URSE de l'école supérieure d'agriculture d'Angers (ESA) et l'école supérieure d'électronique de l'Ouest (ESEO), nous avons développé et évalué des méthodes de prédiction des comportements bovins à partir d'accéléromètres placés dans des colliers. Ce travail réalisé par une doctorante, Lucile Riaboff, a permis d'étudier toute la séquence des étapes allant de la conception des capteurs à la comparaison des méthodes de prédiction des comportements à partir d'un signal brut. Des colliers ont été placés sur des vaches de 4 troupeaux en 2017 et 2018. En parallèle, les comportements des vaches équipées ont été observés et enregistrés pour pouvoir mettre en relation les comportements prédits et les comportements réels. Un total de 57 heures d'observations de comportements était disponible pour l'évaluation des différentes méthodes.

Les données générées par les accéléromètres 3D sont en fait un ensemble de 3 séries temporelles par capteur. Différents pré-traitements du signal brut ont été comparés pour leur capacité à prédire les comportements des vaches par (Riaboff et al., 2019). Le pré-traitement est un ensemble d'opérations réalisées sur le signal brut avant son traitement par un algorithme de prédiction. Cela peut consister à enlever certaines fréquences du signal brut (filtre passe-bas, filtre passe-haut) ou encore à agréger le signal sur des fenêtres temporelles. En cas d'agrégation du signal, on peut faire varier la taille des fenêtres, le degré de superposition entre fenêtres consécutives, les caractéristiques calculées (moyenne, variance, minimum...). Des différences de performance notables ont été observées entre les différentes configurations évaluées, ce qui souligne l'importance de cette étape de pré-traitement, souvent omise des publications. Dans notre cas, les meilleurs résultats ont été obtenus avec une agrégation des données sur des fenêtres de 30 secondes avec un chevauchement de 90% entre fenêtres consécutives. Ensuite, différentes méthodes d'apprentissage automatique (*machine learning* en anglais) ont été comparées pour la prédiction des comportements des bovins à partir du signal pré-traité (Riaboff et al., 2020). Les meilleures performances prédictives ont été obtenues avec l'algorithme *extreme gradient boosting* (XGBoost) suivi d'un lissage avec l'algorithme de Viterbi. Le travail publié dans ces 2 articles a permis d'identifier les étapes clés de la prédiction de comportements des bovins à partir de capteurs placés sur les animaux. Il a été suivi d'une revue systématique dans laquelle les approches mises en œuvre pour prédire des comportements de ruminants à partir d'accéléromètres dans 66 études ont été comparées (Riaboff et al., 2022). Parmi les points de vigilance notables identifiés figure la validité externe des résultats. En effet, bien que les diverses études puissent inclure beaucoup d'animaux, elles sont habituellement conduites dans un nombre réduit d'élevages. D'une part, certains comportements rarement exprimés dans ces élevages sont moins bien prédits. D'autre part, les conditions d'environnements de ces élevages pourraient faire que les comportements sont exprimés d'une façon qui diminue les performances de prédiction lorsque les algorithmes sont appliqués dans des contextes différents. Par exemple, le fait d'être dans un bâtiment ou sur une prairie pourrait faire varier les performances de détection. Ces considérations devraient être prises en compte lors du développement de capteurs et de méthodes, en incluant la plus grande diversité de conditions rencontrées.

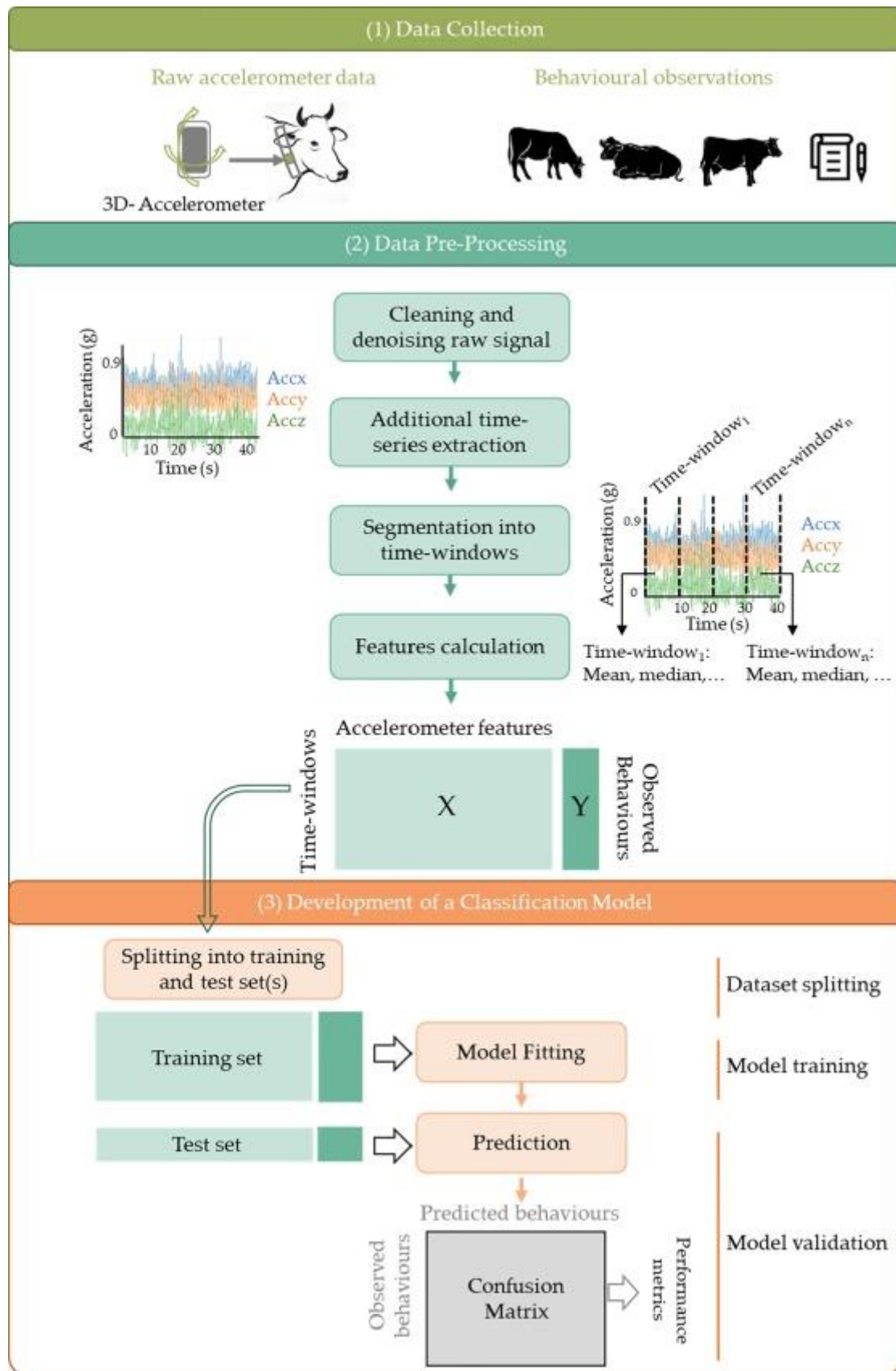


Figure 2 : Différentes étapes de prédiction des comportements bovins à partir de données collectées par un accéléromètre 3D. Figure extraite de Riaboff et al., 2022.

Grace à la détection des comportements en continu, on peut quantifier l'impact de troubles de santé sur le budget-temps des bovins, c'est-à-dire sur la répartition de leur temps quotidien dans différentes activités. Si certains comportements sont suffisamment discriminants, il devient possible de développer un dispositif de détection du trouble de santé. Dans l'étude publiée par (Riaboff et al., 2021), nous avons combiné les comportements prédits à partir de données accélérométriques aux localisations des bovins obtenues à partir de capteurs GPS présents dans les colliers, pour identifier des variables de comportements et de déplacements associées aux boiteries des vaches au pâturage. Les données des capteurs étaient celles récoltées par Lucile Riaboff pendant sa thèse. Pendant la même période, des notations de boiteries avaient été effectuées sur les vaches de l'étude par Charles-Elie Petiot, que j'ai encadré pour sa thèse d'exercice vétérinaire<sup>3</sup>. L'objectif du travail publié était de prédire une variable boiterie à 3 modalités *non boiteuse / boiteuse / sévèrement boiteuse* à partir d'un grand nombre de variables de comportement et de localisation. Du fait du grand nombre de variables explicatives, dont certaines étaient corrélées, la méthode *partial least squares-discriminant analysis* a été utilisée. Le temps de pâturage était la variable la plus discriminante, les vaches non boiteuses passant 4,5 fois plus de temps à pâturer que les vaches sévèrement boiteuses et 1,6 fois plus de temps que les vaches boiteuses. A contrario, les vaches boiteuses passaient plus de temps couchées. Comme on peut s'y attendre, les vaches non boiteuses parcouraient des distances plus importantes. Cela souligne l'impact de ce trouble de santé sur le bien-être des vaches, qui passant moins de temps à brouter parce qu'elles ont mal à un pied, pourraient avoir faim. Une production laitière plus faible des vaches boiteuses, qui pourrait être la conséquence du temps d'ingestion diminué, a été identifiée par Charles-Elie Petiot. Bien que les différences moyennes de budgets-temps entre les 3 catégories de vaches soient marquées, elles n'ont pas permis de prédire le degré de boiterie avec une précision acceptable pour en faire un outil de détection utilisable sur le terrain.

### 3.4 Surveillance syndromique pour la détection des maladies infectieuses émergentes

#### 3.4.1 Contexte et objectifs généraux

La fréquence des émergences de maladies infectieuses a augmenté entre les années 1940 et 2005 (Jones et al., 2008). L'émergence récente du SARS-CoV-2 chez l'humain, qui a fait suite aux émergences du SARS-CoV-1 en 2002 puis du MERS-CoV en 2012, montre les conséquences dramatiques que peuvent revêtir ces événements.

Deux maladies virales à transmission vectorielle ont émergé chez les ruminants européens en 2007 et 2011. Le virus de la fièvre catarrhale ovine (FCO), qui était auparavant cantonné à l'Afrique et à l'Europe méridionale (Purse et al., 2005), a émergé en 2006 quelque part entre l'Allemagne, la Belgique et les Pays-Bas (Saegerman et al., 2010). L'infection a atteint la France en 2007 puis s'y est rapidement propagée (Pioz et al., 2011). Le virus de Schmallerberg a quant à lui été identifié pour la première fois en Allemagne en 2011 (Hoffmann et al., 2012), puis s'est rapidement répandu en Europe (Doceul et al., 2013). Les 2 virus ont pour caractéristiques communes d'être transmis par des moucheron hémaphages du genre *Culicoides*, de s'être propagés très rapidement dans plusieurs pays et d'avoir eu un impact économique important sur les filières bovines.

La détection précoce de telles émergences est primordiale pour en limiter les impacts négatifs sur la santé animale, la santé humaine, et, plus largement, sur l'économie des filières. La surveillance de ces émergences est cependant compliquée par le fait qu'il y a un grand nombre d'agents pathogènes susceptibles d'émerger. Par ailleurs, certains agents pathogènes, comme le virus de Schmallerberg,

---

<sup>3</sup> Lien vers le pdf de la thèse de Charles-Elie Petiot : [https://doc-veto.oniris-nantes.fr/GEIDFile/na\\_19\\_037.pdf?Archive=196270291445&File=na%5F19%5F037%5Fpdf](https://doc-veto.oniris-nantes.fr/GEIDFile/na_19_037.pdf?Archive=196270291445&File=na%5F19%5F037%5Fpdf)

sont inconnus au moment de leur émergence. Dans ce contexte, il n'est pas possible d'effectuer des tests biologiques vis-à-vis de tous les pathogènes susceptibles d'émerger pour leur détection précoce.

Une solution à ce problème consiste à rechercher des signes non spécifiques de l'infection à partir de données collectées à large échelle et en continu. La détection de signaux non spécifiques doit donner lieu à des investigations supplémentaires qui permettront d'identifier l'agent causal. La surveillance syndromique consiste en la collecte et l'analyse en temps (quasi-)réel de données collectées en routine pour la détection précoce de phénomènes de santé émergents (Henning, 2004). Un certain nombre d'initiatives autour de la surveillance syndromique en santé animale a vu le jour dans le courant des années 2010 (Dupuy et al., 2013). Cependant, l'apport des données de production et de reproduction collectées chez les bovins laitiers n'avait pas été évalué. Pourtant, une proportion importante d'élevages utilise l'insémination artificielle et participe au contrôle de performances pour l'évaluation génétique des reproducteurs. L'objectif des travaux sur la surveillance syndromique auxquels j'ai participé étaient d'évaluer des données et des méthodes pour la surveillance syndromique chez les bovins laitiers.

### 3.4.2 Développement d'indicateurs et de méthodes pour la détection des maladies vectorielles émergentes des bovins en France

#### 3.4.2.1 *Projet EMIDA ERA-NET Early Detection Data*

Mes contributions à cette thématique de recherche ont débuté par un projet européen bénéficiant d'un financement ERA-NET. Les partenaires du projet étaient l'UMR BIOEPAR, le GD Animal Health (Pays-bas) et le CVD-ERA (Belgique). J'ai été recruté en 2011 avec un autre post-doctorant, Alexis Marceau, pour développer des indicateurs et des méthodes pour la détection précoce de maladies vectorielles émergentes chez les bovins laitiers à partir de données de production laitière et de reproduction. Les indicateurs et méthodes ont été développés en utilisant des données françaises puis appliqués sur des données néerlandaises.

#### 3.4.2.2 *Données de déclaration des foyers de fièvre catarrhale ovine chez les bovins*

En 2007 et 2008, la déclaration des élevages avec au moins un cas de FCO auprès des autorités françaises était obligatoire. L'épidémie ayant émergé dans d'autres pays européens en 2006, son émergence en France en 2007 n'était pas une surprise. Le dispositif de surveillance incluait des tests dans des élevages sentinelles ainsi que des tests lors de suspicion clinique. L'émergence puis la propagation de l'infection ont donc pu être suivies de façon précise.

Même si l'objectif du projet était de détecter des maladies vectorielles émergentes quelles qu'elles soient, l'émergence de la FCO chez les bovins permettait d'évaluer des indicateurs et des méthodes sur un cas d'émergence bien documenté.

#### 3.4.2.3 *Données de production et de reproduction*

En France comme dans beaucoup de pays producteurs de lait, l'évaluation génétique des bovins laitiers reproducteurs se fait à partir de données de performances collectées en ferme via le contrôle laitier, ainsi que de données d'état civil bovin et d'insémination artificielle, qui sont nécessaires pour identifier les individus et établir leurs liens de parenté. Pour l'évaluation, toutes ces données sont centralisées par un organisme qui s'appelait lors du début du projet *le centre de traitement de l'information génétique* (CTIG), qui a été notre interlocuteur pour l'obtention des données. Des identifiants nationaux uniques permettent de relier les différentes bases de données. Par ailleurs, les identifiants nationaux des élevages contiennent le numéro INSEE de la commune, ce qui permet de les localiser avec une précision suffisante pour le suivi de la propagation d'épidémies.

Plus précisément, le contrôle laitier est un service facultatif et payant qui permet aux éleveurs d'obtenir des données de production et de santé pour toutes les vaches de leur troupeau. Dans les élevages participants, toutes les vaches en lactation sont contrôlées environ une fois par mois (10 à 12 contrôles par an). Lors du passage du technicien effectuant les relevés, la quantité de lait produite par chaque vache est mesurée et un échantillon de lait est prélevé pour y mesurer les concentrations en matière grasse, en protéines et en cellules somatiques, qui est un marqueur d'inflammation mammaire. Sur la période d'étude, on estimait qu'environ 65% des élevages participaient au contrôle laitier, ce qui représentait 80% des bovins laitiers français (données non publiées, ordre de grandeur).

Lors d'une insémination artificielle, la date de l'insémination et l'identité des reproducteurs sont enregistrés, ce qui permet un suivi assez précis des succès ou échecs de la mise à la reproduction. Au moment de l'étude, environ 70% des veaux laitiers étaient issus d'insémination artificielle (données non publiées, ordre de grandeur).

Enfin, en Europe, la déclaration de tout mouvement bovin, y compris les naissances et les morts, est obligatoire. Ces déclarations incluent la date du mouvement, l'identifiant du bovin ainsi que l'identifiant de la ou des exploitations concernées. A partir de ces données, il est possible de connaître les dates de vêlage et de réforme des animaux. En France, ces données sont centralisées dans la *Base de Données Nationale d'Identification*. Une partie de ces données est intégrée à la base de données utilisée pour l'évaluation génétique des bovins laitiers reproducteurs.

Toutes ces données répondent bien au critère de collecte en routine puisqu'elles sont enregistrées par des techniciens ou les éleveurs, lors de mesures ou de survenue d'évènements comme les inséminations et les naissances. Une analyse en temps quasi-réel serait théoriquement possible puisque ces données sont centralisées sur un serveur pour leur incorporation à l'évaluation génétique.

Pour le projet, une extraction des données de production laitière et d'inséminations artificielles collectées entre 2003 et 2010 a été obtenue. Les années 2006 et 2007 contenaient les données relatives à l'émergence de la FCO. Les autres années ont été utilisées pour la calibration des modèles.

#### 3.4.2.4 Indicateurs basés sur les données de production *laitière*

Pour la détection d'émergences à partir des données du contrôle laitier, nous avons fait les hypothèses que l'émergence d'une maladie virale à transmission vectorielle se traduirait par des baisses de production laitière chez les bovins atteints et que ces baisses de production suivraient la progression de l'infection. On s'attendait à ce que l'infection se propage de proche en proche via la dispersion de vecteurs porteurs du virus.

L'objectif d'un premier article (Madouasse et al., 2013) a été d'évaluer l'impact de différentes caractéristiques d'une émergence (reflétant nos hypothèses) sur les performances d'un dispositif de surveillance syndromique basé sur les productions laitières collectées par le contrôle laitier. A cette fin, des émergences présentant différentes caractéristiques et l'impact de ces émergences sur la production laitière ont été simulés. Les caractéristiques évaluées étaient la localisation de l'émergence, la date de l'émergence, la vitesse de la vague épidémique sur le territoire, la probabilité d'infection pour un troupeau situé dans une commune dans laquelle l'infection est présente, la probabilité d'infection pour un animal présent dans un troupeau infecté, le pourcentage de baisse de production laitière chez un bovin infecté au moment de l'infection et la durée de l'impact de l'infection sur la production laitière. Les données de production laitière récoltées avant l'émergence de la FCO ont été utilisées comme situation initiale pour la simulation de 576 scénarios d'émergence. Chaque scénario représentait une certaine combinaison de caractéristiques d'émergence. Pour chaque scénario, dans un premier temps, une date d'infection ou l'absence d'infection étaient simulées pour

chaque bovin en fonction de sa commune et de son élevage de présence. Dans un second temps, pour chaque contrôle laitier effectué en 2006, la production laitière enregistrée pour chaque bovin était conservée inchangée si le bovin n'était pas infecté ou diminuée d'un facteur fonction du temps écoulé depuis le début de l'infection et des paramètres du scénario correspondant. L'année 2006 a été choisie car il s'agit de l'année précédant l'émergence de la FCO. La production laitière a été supposée normale pour cette année. L'étape suivante a consisté à prédire les productions laitières moyennes par vache de chaque troupeau contrôlé, à l'aide d'un modèle linéaire mixte incluant un effet aléatoire élevage. Les paramètres de ce modèle ont été estimés à partir des données du contrôle laitier des années 2003 à 2005, période sans émergence connue. Puis les paramètres estimés ont été utilisés pour prédire les productions laitières de 2006. Enfin, une statistique de balayage a été utilisée sur les différences entre productions laitières observées et prédites en 2006 aux échelles de la commune et de la semaine, pour détecter des agrégats spatio-temporels de productions laitières inférieures à l'attendu. Ces agrégats ont été considérés comme les signatures d'une infection émergente. Les critères utilisés pour évaluer les performances de la détection étaient la spécificité, évaluée par le nombre de fausses alarmes, la sensibilité, évaluée par la proportion d'émergences donnant lieu à une alarme, et la précocité, c'est-à-dire le nombre de semaines écoulées entre la date d'émergence simulée et la détection d'un agrégat de productions laitières inférieures à l'attendu. La Figure 3 présente les nombres moyens de vaches contrôlées par commune et par semaine pour la période d'étude, ainsi que les 2 points retenus pour simuler les départs d'émergences.



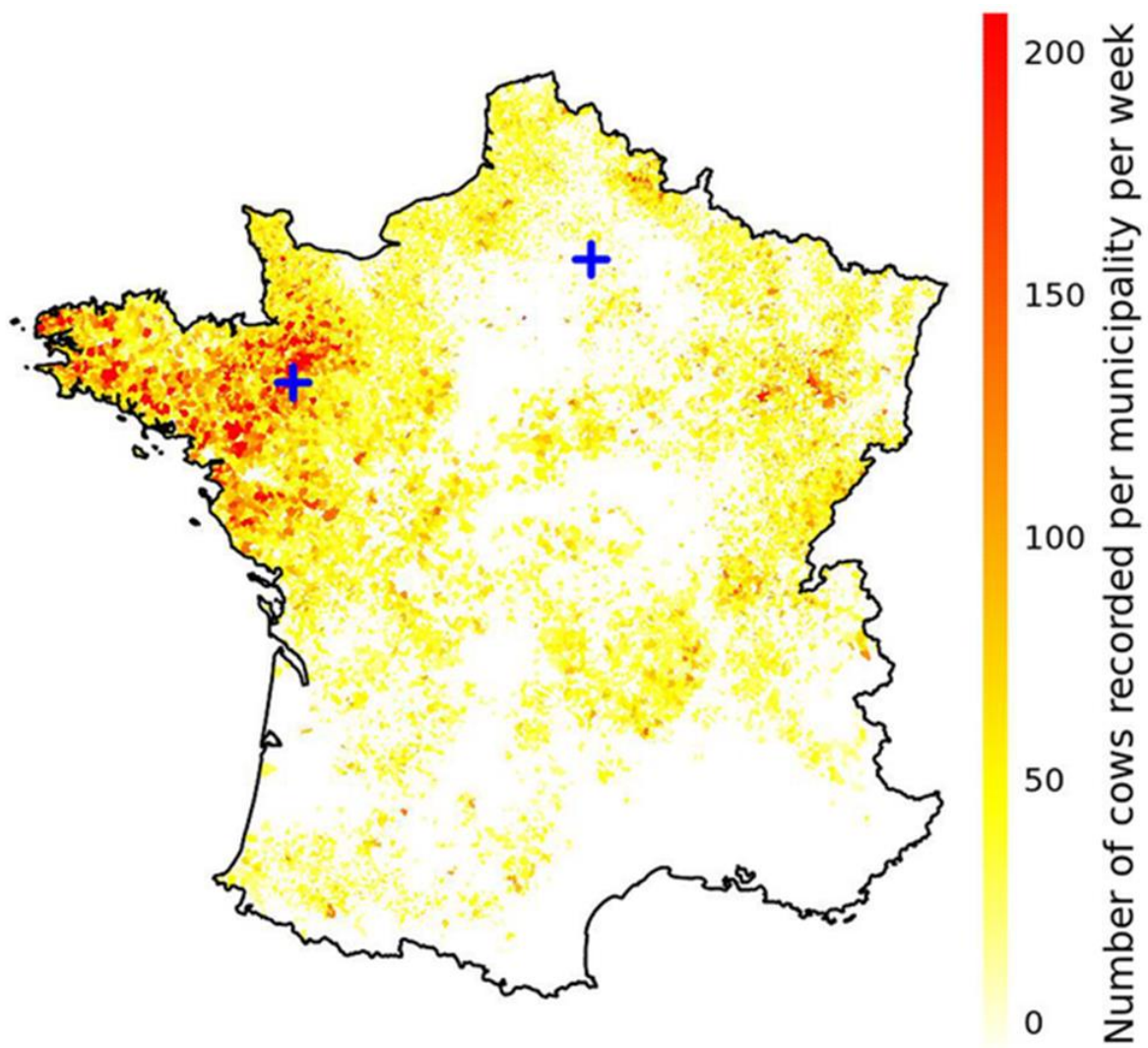
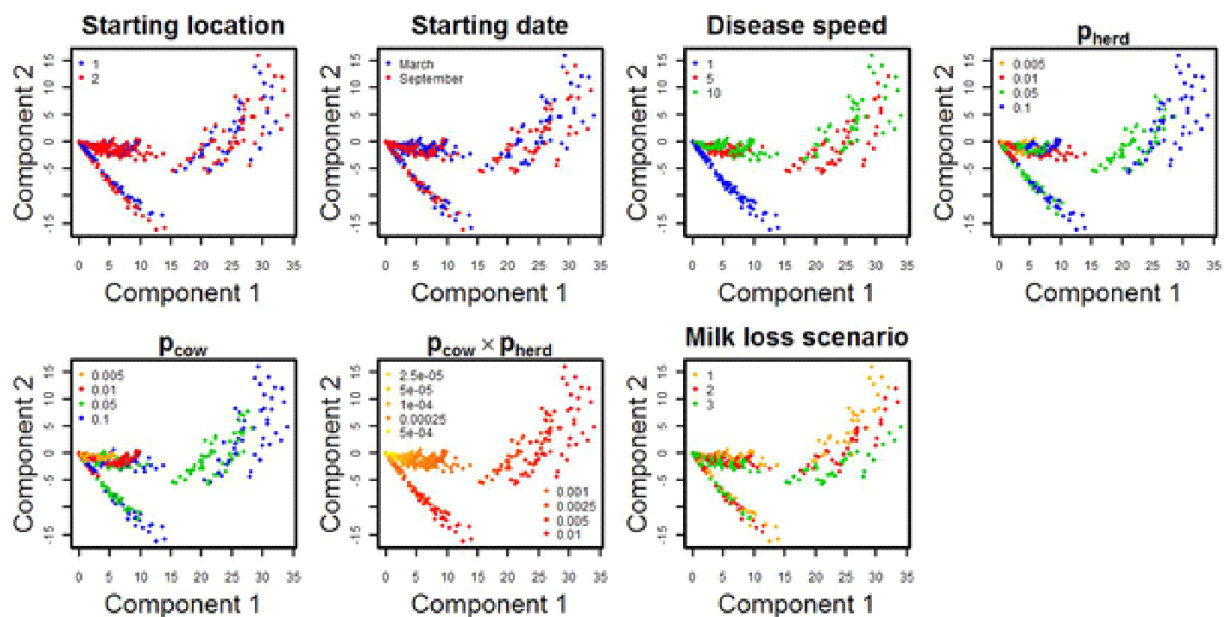
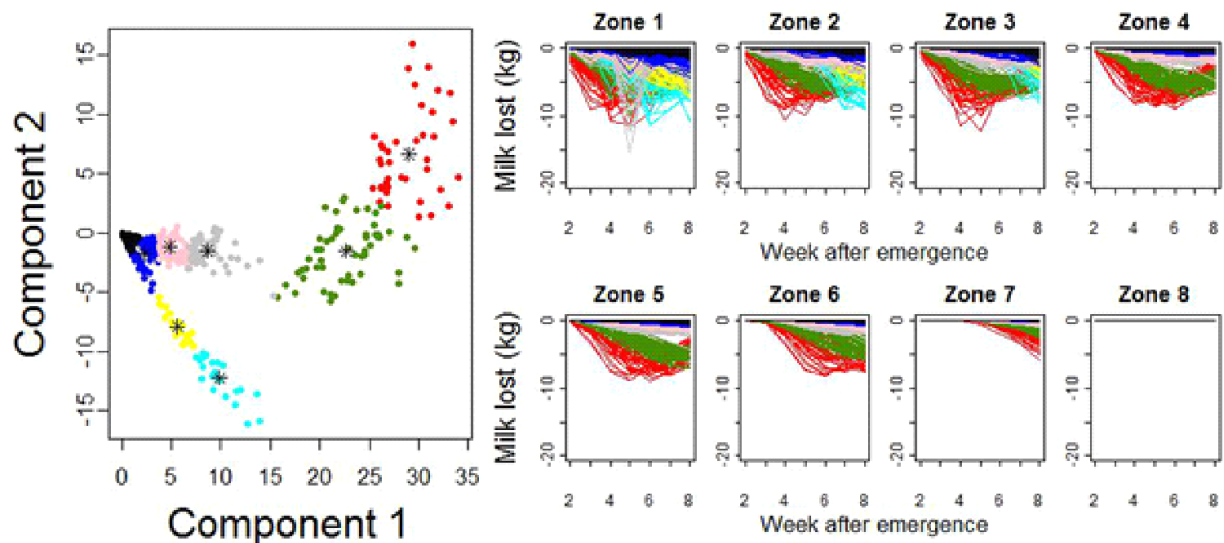


Figure 3 : Nombre moyen de vaches contrôlées par commune et par semaine dans les données du contrôle laitier collectées entre 2003 et 2006. Les 2 croix bleues représentent les points de départ des émergences simulées (un seul point de départ par simulation). Figure extraite de Madouasse et al., 2013.

Afin d'identifier des associations entre les caractéristiques des émergences simulées et les performances de la détection, des groupes d'émergences similaires ont été constitués. Cette similarité a été établie sur la base des pertes de production laitières simulées pour chaque scénario en fonction de la proximité avec le foyer d'émergence et du nombre de semaines écoulées depuis l'émergence. Ce choix se justifie par le fait que notre hypothèse principale était que l'émergence d'une maladie virale à transmission vectorielle se traduirait par des diminutions de production laitière initialement localisées, qui s'étendraient au cours du temps. Pour chaque scénario, 8 zones concentriques autour du foyer d'émergence ont été construites puis les pertes de production laitière par semaine ont été calculées pour chaque zone. Chaque scénario a donc été résumé par 64 valeurs correspondant aux pertes de production laitières par semaine pendant 8 semaines après l'émergence pour 8 zones autour du foyer d'émergence. Une analyse en composantes principales puis l'application d'un algorithme *k-means* ont permis de constituer 8 groupes d'émergences. Sur la Figure 4, on voit que les scénarios associés à un fort impact de l'émergence sur la production laitière ont des valeurs de projection sur la première composante élevées. La Figure 5 suggère que le produit des proportions d'élevages et de vaches infectés dans les communes infectées est un déterminant majeur de l'impact d'une émergence sur la production laitière, et donc sur la détectabilité de cette émergence à partir des données de

production laitière. La vitesse de progression de l'infection semble elle aussi importante. Les autres caractéristiques semblent avoir une influence moins marquée. Pour les scénarios simulés, le délai de détection variait de 1 à 3 semaines après l'émergence. Toutefois, le nombre de fausses alarmes était élevé, allant de 1 à 8 alarmes hebdomadaires lorsqu'il n'y avait aucune émergence à détecter.



Ce premier article a montré que la détection d'une maladie à transmission vectorielle à partir des données des productions laitières collectées par le contrôle laitier serait d'autant plus efficace que le nombre de vaches affectées au même moment est élevé, ce qui dépend de la transmissibilité de l'infection. Nous avons pour ce travail formalisé le cadre d'évaluation d'un dispositif de surveillance syndromique. Une difficulté majeure identifiée a été le nombre important de fausses alarmes, c'est-à-dire un défaut de spécificité, qui provient de l'identification d'agrégats de productions laitières inférieures à l'attendu sans lien avec une maladie identifiée.

Dans un second article (Madouasse et al., 2014), nous avons évalué l'intérêt des données de production laitière issues du contrôle laitier pour la détection d'une émergence en utilisant les données collectées lors de l'émergence de la FCO en 2007. Une méthode de détection d'agrégats spatio-temporels de productions laitières inférieures à l'attendu a été développée. Cette méthode a été évaluée en utilisant les données de déclaration FCO pour classer les alarmes produites par la méthode en vraies et fausses alarmes. Dans un premier temps, un modèle de prédiction des productions laitières moyenne par vache pour chaque contrôle laitier a été développé. Il s'agit d'un modèle linéaire mixte dont la variable à prédire est la production laitière pour un contrôle laitier dans un élevage. Le modèle prend en compte le jour de l'année lors du contrôle à l'aide d'interpolations linéaires, parfois appelées splines linéaires, entre 8 points. Les productions laitières pour ces 8 jours de l'année étaient incluses en tant qu'effets aléatoires spécifiques à chaque élevage. Une période historique hors-émergence a été utilisée pour estimer les paramètres du modèle, puis les productions laitières attendues étaient prédites pour chaque contrôle laitier de l'année de surveillance. Dans un second temps, les différences entre productions laitières mesurées lors des contrôles laitiers et productions laitières prédites par le modèle ont été calculées. Enfin, pour chaque semaine de l'année de surveillance, des agrégats spatio-temporels de productions laitières inférieures à l'attendu ont été recherchées avec une statistique de balayage, à l'aide du logiciel SaTScan (Figure 6). Pour chaque agrégat détecté, le logiciel fournit le logarithme du ratio de vraisemblance (LLR) sous l'hypothèse de productions laitières similaires à l'intérieur et à l'extérieur de l'agrégat. Plus ce LLR est élevé, plus la probabilité d'une production laitière anormalement faible est élevée. En augmentant le seuil utilisé pour considérer un agrégat détecté comme une alarme on augmente la spécificité et on diminue la sensibilité et la précocité de la détection. La Figure 7 montre l'évolution du nombre fausses alarmes en fonction du LLR retenu pour considérer qu'un agrégat détecté comme une alarme. Pour un LLR de 50, on obtient 1,7 fausse alarme par semaine. Pour un LLR de 100, on obtient 0,8 fausse alarme par semaine. Sur la Figure 6, on peut voir que la première alarme centrée sur la zone d'émergence apparaît lors de la semaine 7 après le premier cas déclaré, avec un LLR de 52. La première alarme avec un LLR supérieur à 100 centré sur cette zone apparaît à la semaine 9 après la première déclaration.



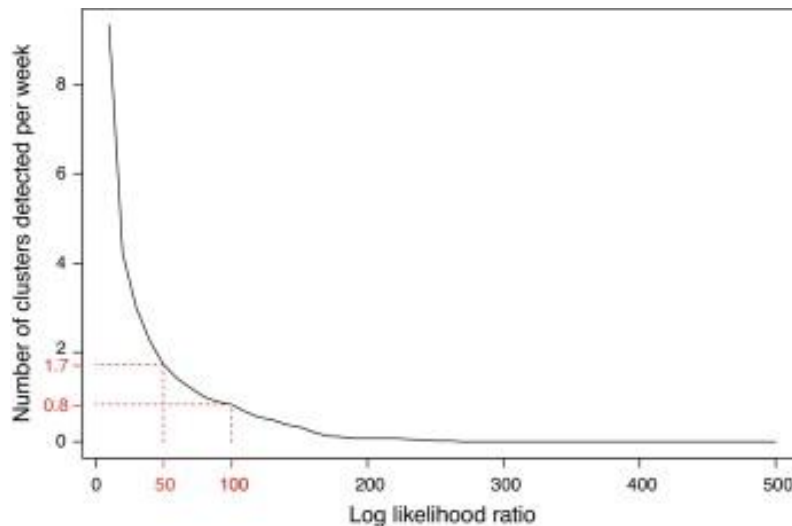


Figure 7 : Nombre de fausses alarmes en fonction du LLR utilisé pour considérer un agrégat de production laitière inférieure à l'attendu comme une alarme. Figure extraite de Madouasse et al., 2014.

Ces travaux ont permis de dégager les principales étapes de la conception d'une méthode de détection d'émergences de maladies à transmission vectorielle et les facteurs limitant l'intérêt d'un indicateur de production laitière pour cette détection. Les étapes de prédiction de valeurs d'indicateur attendues, de calcul de différences entre valeurs observées et valeurs attendues, de détection d'agrégats spatio-temporels et de choix de seuils pour classer les agrégats détectés en alarmes sont indépendantes et peuvent contribuer à la performance du système. Une prédiction parfaite des valeurs d'indicateur attendues permettrait de détecter des déviations infimes sans fausses alarmes. Dans le cas de la production laitière, les modèles utilisés incluaient un effet élevage et le jour de l'année sous forme de spline linéaire. Des facteurs de variation de cette production non inclus dans les modèles peuvent expliquer des différences entre valeurs observées et attendues non liées à l'émergence d'une maladie, c'est-à-dire des faux positifs. Parmi ces facteurs figurent notamment ceux en lien avec l'alimentation, par exemple une sécheresse, qui peut contribuer à faire baisser localement la production, d'une manière similaire à ce que ferait une émergence. L'amélioration de la performance du modèle pourrait passer par l'inclusion de variables permettant une prédiction plus juste de la production laitière ainsi que par l'utilisation de méthodes différentes comme des modèles d'apprentissage automatique (machine learning). Pour la production d'alarmes, nous avons choisi d'utiliser une statistique de balayage via le logiciel SaTScan. D'autres choix auraient été possibles, dont certains sont présentés dans les sections suivantes. L'avantage de la statistique de balayage est qu'elle permet de localiser des zones géographiques de valeurs anormales sans a priori sur leur localisation. Par contre, la méthode choisie impose une forme circulaire aux agrégats détectés, ce qui peut ne pas correspondre à la forme réelle de l'agrégat, notamment lorsqu'il est situé sur les bords de la région ou du pays considéré. Enfin, le choix d'un seuil pour définir les alarmes est forcément un compromis entre la spécificité d'une part et la sensibilité et la précocité de la détection d'autre part. Dans le cas de la production laitière pour la détection d'une émergence similaire à la FCO, le nombre de fausses alarmes était toujours élevé et conduisait pour les valeurs de seuil envisagées à une détection tardive de l'émergence. Enfin, la FCO était un exemple d'émergence parmi un vaste éventail des possibles. La simulation d'une grande diversité d'émergences est extrêmement utile pour évaluer les performances d'indicateurs, de méthodes dans différentes conditions.

#### 3.4.2.5 Indicateurs basés sur les données de reproduction

Du fait de l'utilisation largement répandue de l'insémination artificielle en élevage bovin laitier, l'utilisation d'indicateurs basés sur ces données pour la détection d'émergences doit être explorée. A

partir de ces données, il est possible de construire des indicateurs évaluant la survenue de problèmes de fertilité ou de fécondité en considérant les intervalles entre inséminations consécutives. Il est aussi possible d'évaluer la survenue d'avortements ou de durées de gestations anormales en considérant l'intervalle entre la dernière date d'insémination connue et la date de vêlage. Dans un article par Marceau et al. (2014), nous avons évalué les performances des 5 indicateurs construits à partir de ces données de reproduction pour la détection de l'émergence de la FCO chez les bovins laitiers en France en 2007. Ces indicateurs appelés *retours 3 semaines*, *retours décalés*, *retours tardifs*, *vêlages précoces* et *gestations courtes* sont décrits et présentés sur la Figure 8. Des valeurs attendues ont été prédites pour chaque indicateur aux échelles du département et de la semaine. Pour ce faire, dans un premier temps, des valeurs quotidiennes d'indicateurs ont été calculées sous forme de taux avec au dénominateur le nombre de vaches éligibles à l'évènement et au numérateur le nombre d'évènements. Ces taux ont ensuite été moyennés pour chaque semaine. La 2<sup>ème</sup> étape a consisté à prédire des valeurs attendues d'indicateurs. La plupart des indicateurs montrant des variations saisonnières, nous avons utilisé des régressions harmoniques, c'est-à-dire des régressions incorporant le moment de l'année à l'aide fonctions sinus et cosinus. La Figure 9 montre les valeurs observées et prédites pour chaque indicateur calculées pour les vaches pares entre 2003 et 2009. Les indicateurs *vêlages précoces* et *gestations courtes* montrent des élévations précoces et marquées lors de l'émergence de la FCO, avec des élévations qui sont spécifiques de l'émergence.

Dans une publication ultérieure (Nusinovici et al., 2016), nous avons confirmé la forte augmentation de la probabilité de *gestations courtes* dans les élevages avec au moins un cas de FCO confirmé, mais aussi dans les élevages sans cas confirmé localisés dans une zone de circulation du virus. L'intérêt de cet indicateur de gestation courte est que le délai entre exposition et survenue du vêlage est probablement court, ce qui contribue à accroître la précocité de la détection.

Les indicateurs basés sur des intervalles entre inséminations consécutives pour la détection de problèmes de fertilité ou de mortalités embryonnaires ou fœtales sont moins précoces, ce qui a été confirmé par (Bronner et al., 2015a, 2015b). Ceci s'explique par le fait que pour la survenue d'une nouvelle insémination, il faut un cycle sexuel conduisant à un œstrus puis une décision de l'éleveur d'inséminer aient lieu suite à l'interruption de gestation induite par l'infection.



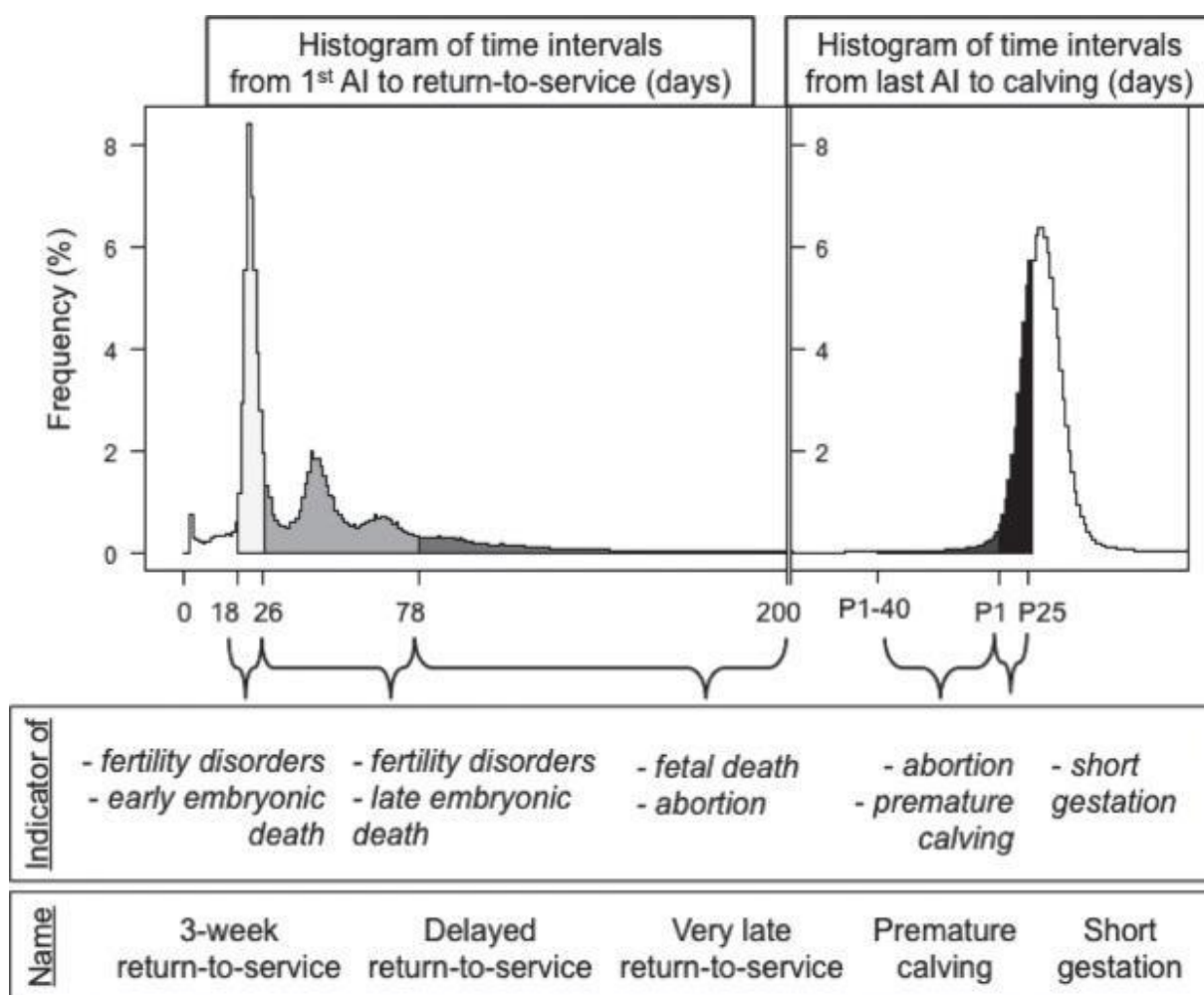


Figure 8: Distributions des intervalles entre première et deuxième inséminations artificielles de la lactation (panneau de gauche) et des intervalles entre dernière date d'insémination artificielle connue d'une lactation et date du vêlage suivant (panneau de droite) ; et, définition des indicateurs construits à partir de ces intervalles pour la détection de l'émergence de la FCO chez les bovins en France en 2007. Figure extraite de Marceau et al., 2014.

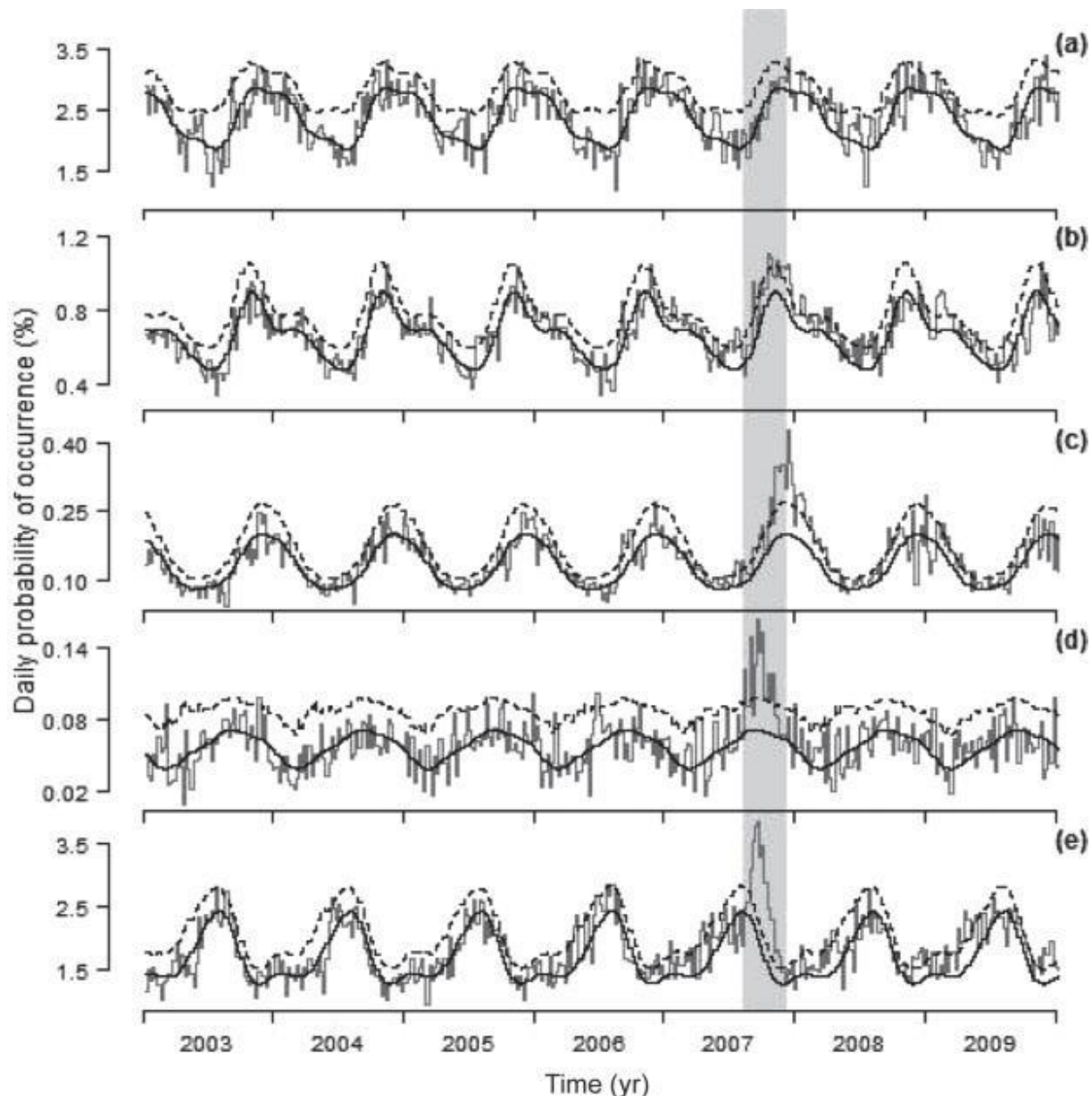


Figure 9 : Distributions des valeurs hebdomadaires pour les 5 indicateurs définis ci-dessous chez les vaches pares dans le département du Nord entre 2003 et 2009. Les indicateurs sont, de haut en bas : retours 3 semaines, retours décalés, retours tardifs, vêlages précoces et gestations courtes. Sur chaque panneau, sont représentées les valeurs observées (lignes grises), les valeurs prédites par le modèle (lignes noires pleines), les limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95% (ligne noire pointillée). La zone grise verticale représente l'intervalle la période de déclaration de foyers de FCO.

### 3.4.3 Contribution au développement de méthodes pour la surveillance syndromique chez les bovins hors de France

Les indicateurs et méthodes décrits plus haut ont été appliqués en utilisant des données néerlandaises et belges pour évaluer leurs performances pour la détection des émergences de la FCO et du virus de Schmallenberg dans ces 2 pays (Veldhuis et al., 2016). Aux Pays-Bas, la FCO a émergé en 2006 puis l'infection s'est propagée en 2007 ; le virus de Schmallenberg a émergé en 2011. Les résultats ont confirmé ce qui avait été observé avec les données françaises.

La Figure 10 montre les valeurs observées et prédites pour l'indicateur de production laitière pour les périodes d'émergence de la FCO et du virus de Schmallenberg aux Pays-Bas. Les premiers agrégats de production laitière inférieure à l'attendu probablement dus aux émergences ont été observés 54 jours



après la première déclaration d'un cas de FCO en 2006 et 20 jours avant la première identification d'un cas d'infection par le virus de Schmallenberg. La précocité de la détection était donc meilleure pour l'émergence du virus de Schmallenberg que pour celle de la FCO. Cela pourrait être dû à une propagation plus rapide du virus de Schmallenberg, avec un nombre plus important de vaches infectées à un même moment. Ceci confirmerait les conclusions de l'article (Madouasse et al., 2013). Toutefois, la Figure 10 montre aussi une mauvaise prédiction de la production laitière pour l'année 2007, sans lien avec une émergence. L'utilisation d'un indicateur basé sur la production laitière nécessiterait une prédiction plus juste de la production laitière attendue.

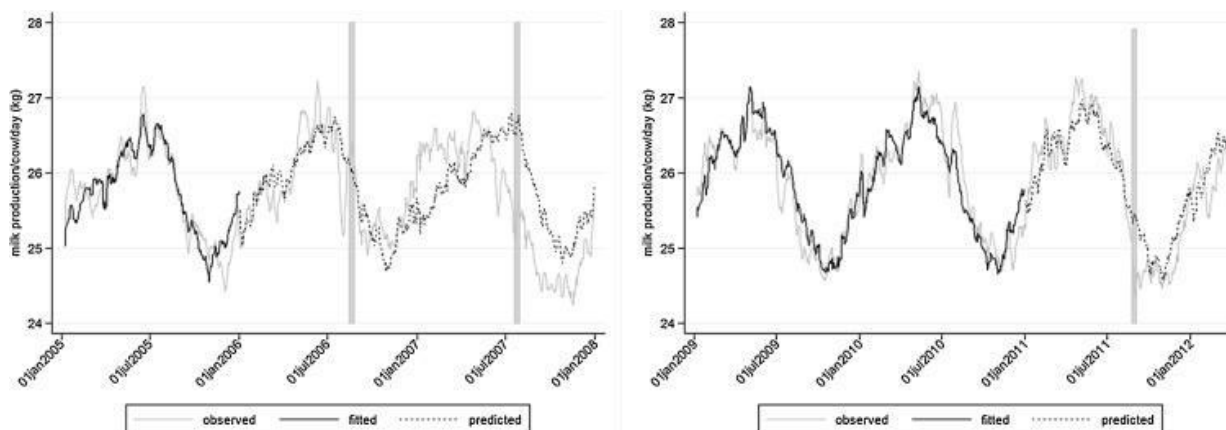


Figure 10 : Productions laitières aux Pays-Bas pour les années 2005 à 2008 (panneau de gauche) pour la détection de l'émergence de la FCO et pour les années 2009 à 2012 (panneau de droite) pour la détection de l'émergence du virus de Schmallenberg. Les lignes grises représentent les moyennes glissantes hebdomadaires calculées à partir des valeurs mesurées par le contrôle laitier. Les lignes noires représentent les productions laitières prédites par le modèle pour la période utilisée pour l'estimation (trait plein) et pour les périodes contenant les émergences à détecter (trait pointillé). Les barres verticales grises représentent les périodes d'émergence.

Les indicateurs de vêlages prématurés et de gestations courtes ont été évalués pour la détection des émergences de la FCO et du virus de Schmallenberg (Figure 11). Ces indicateurs n'ont pas permis de détecter l'émergence de la FCO en 2006. En 2007, des alertes sont survenues 42 et 51 jours après le premier cas déclaré de FCO pour les indicateurs vêlages prématurés et gestations courtes respectivement. Lors de l'émergence du virus de Schmallenberg, une alerte basée sur l'indicateur gestation courte a été produite seulement 4 jours après l'identification du premier cas et aucune alerte basée sur l'indicateur vêlage prématuré.

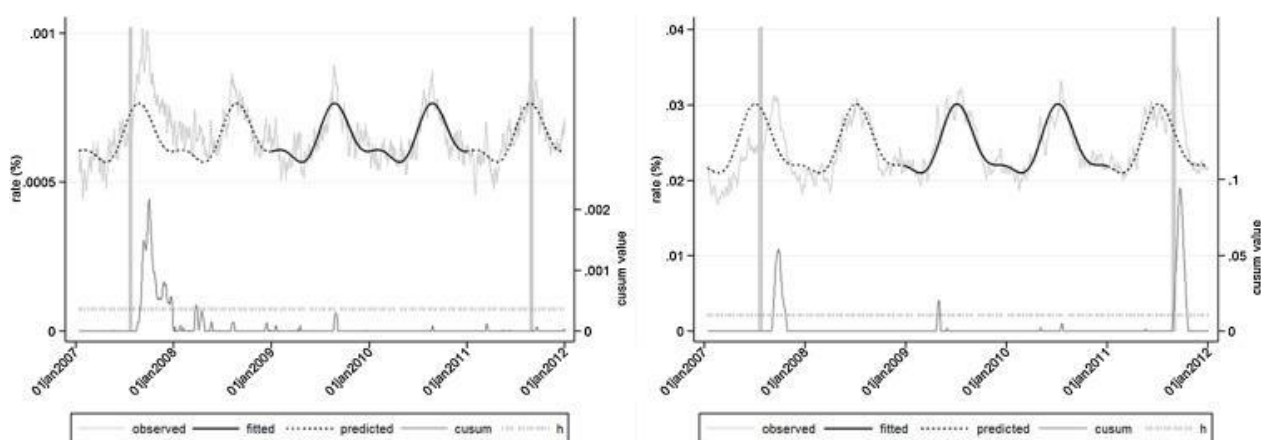


Figure 11 : Indicateurs vêlages prématurés (panneau de gauche) et gestations courtes (panneau de droite) aux Pays-Bas pour les années 2007 à 2012 pour la détection des émergences de la FCO et du virus de Schmallenberg. Les lignes grises représentent les valeurs d'indicateurs hebdomadaires calculées à partir des dates d'inséminations et de vêlages. Les lignes noires représentent les valeurs d'indicateurs prédites par les modèles pour les périodes utilisées pour l'estimation (trait plein) et pour

les périodes contenant les émergences à détecter (trait pointillé). Les barres verticales grises représentent les périodes d'émergence. Au bas du graphique figurent les sommes cumulées des différences entre valeurs observées et prédites par les modèles, calculées à l'aide d'un algorithme CUSUM. La barre horizontale grise est le seuil pour déclarer une alarme à partir des valeurs de CUSUM.

Un système de surveillance syndromique basé sur les productions laitières issues du contrôle laitier pour la détection d'émergences de maladies des bovins à transmission vectorielle a été évalué en Irlande (Douglass et al., 2022), où le virus de Schmallenberg a émergé en août 2012. Ce travail a repris et adapté la méthodologie développée dans le projet EMIDA ERA-NET *Early Detection Data*. Dans cette étude, l'unité statistique pour la prédiction de la production laitière était la vache/jour et non pas l'élevage/jour. Le modèle utilisé était un modèle linéaire mixte qui, à la différence des modèles antérieurs, incorporait des données climatiques. Pour la production d'alarmes, l'algorithme CUSUM a été utilisé sur les différences entre productions mesurées et prédites. La Figure 12 présente les différences entre productions laitières observées et prédites et les alarmes générées en fonction du temps. On peut voir que l'émergence du virus de Schmallenberg a été suivie d'un nombre important d'alarmes, alors que le nombre d'alarmes précédant l'arrivée du virus était limité.

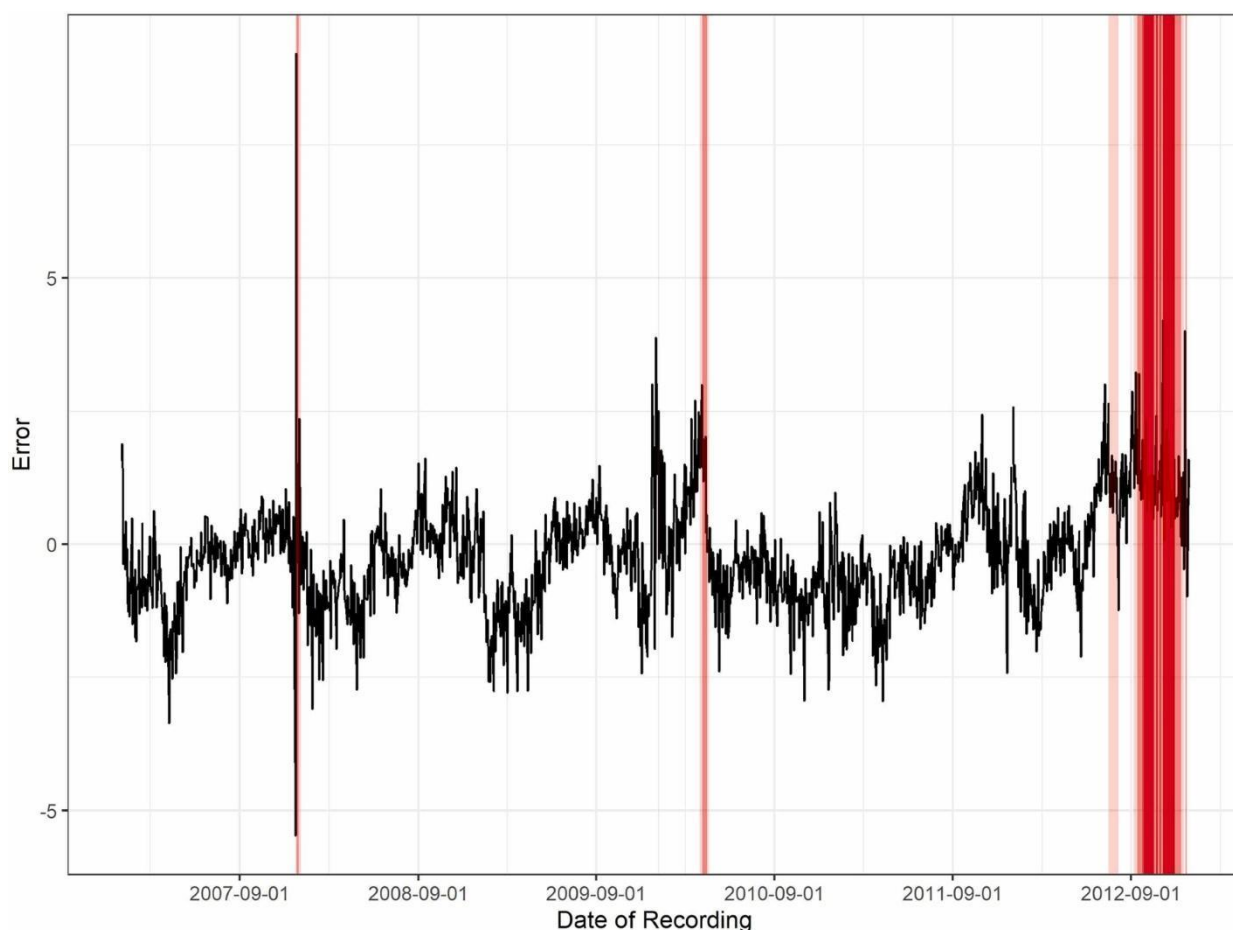


Figure 12 : Différence entre productions laitières observées et prédites en Irlande entre 2007 et 2013. Les barres verticales rouges représentent les alarmes produites par application d'un algorithme CUSUM (sommes cumulées) sur ces différences. L'intensité de rouge dépend du seuil appliqué au CUSUM pour déclarer une alarme. La date d'entrée du virus de Schmallenberg en Irlande a été estimée au 11 août 2012 par McGrath et al. (2018). Figure extraite de Douglass et al. (2022).

#### 3.4.4 Bilan des travaux sur la surveillance syndromique

La surveillance syndromique est une approche intéressante pour la détection d'émergences. Il est important d'insister sur les conditions dans lesquelles une telle approche a une valeur ajoutée par

rapport à d'autres types de surveillance. En premier lieu, la surveillance syndromique est particulièrement adaptée à la détection de maladies a priori inconnues, car elle permet de détecter les conséquences de l'infection même si l'agent pathogène est inconnu. Dans les cas où l'infection a des conséquences spectaculaires rapidement après son émergence, comme des mortalités massives ou des signes cliniques remarquables, il est probable que les éleveurs et les vétérinaires identifient rapidement l'émergence. Les travaux que j'ai conduits et dans lesquels j'ai été impliqué ont montré que les productions laitières collectées par le contrôle laitier sont intéressantes pour la surveillance syndromique, la difficulté principale étant d'obtenir une bonne prédiction des productions attendues. Les indicateurs basés sur les données de reproduction sont particulièrement intéressants. L'indicateur de gestations courtes combine plusieurs caractéristiques qui le rendent performant. Le délai entre l'infection et le vêlage induit est probablement court. Grâce à cela, cet indicateur est plus précoce que des indicateurs basés sur l'intervalle entre inséminations successives car une nouvelle insémination nécessite que la vache initie un nouveau cycle sexuel suite à la mort du fœtus et que ce cycle sexuel conduise à une décision d'inséminer de la part de l'éleveur.

### 3.5 Surveillance pour prouver l'absence d'une maladie.

#### 3.5.1 Contexte et objectifs généraux

Lorsqu'une maladie<sup>4</sup> infectieuse majeure est absente d'un élevage, d'une région ou d'un pays, il est important pour l'entité concernée d'éviter l'introduction de son agent étiologique. A cette fin, une entité indemne d'une maladie peut demander aux entités depuis lesquelles elle importe des animaux de prouver qu'ils sont indemnes de son agent étiologique. Dans le cadre d'échanges d'animaux, une première façon pour le vendeur de *prouver* que les animaux échangés sont indemnes est de tester individuellement les animaux vendus. Ceci peut être coûteux et requiert l'existence d'un test suffisamment sensible. Une autre approche est basée sur la mise en place d'un programme de surveillance visant l'infection cible. Il existe dans ce cas 2 paradigmes. Pour les maladies avec un fort impact sur la santé humaine (zoonoses) et les maladies avec un fort impact économique, les états ou l'Union Européenne prescrivent des modalités de surveillance auxquelles les partenaires économiques doivent se conformer pour être considérés comme indemnes. On parle dans ce cas de maladies réglementées et de surveillance *input-based* (basée sur les moyens). Pour d'autres maladies infectieuses majeures, le régulateur n'a pas prescrit de modalités de surveillance pour prouver l'absence d'infection, mais certains pays ou régions ont mis en place des programmes pour maîtriser, éradiquer ou prouver l'absence de l'infection. Dans ce cas, les modalités de surveillance sont propres au programme mis en place. La diversité des modalités de surveillance complique le commerce d'animaux entre pays avec des programmes différents car la probabilité qu'un animal soit qualifié d'indemne n'est pas comparable entre programmes. L'expression *output-based surveillance* désigne une surveillance épidémiologique visant à quantifier une probabilité d'absence de maladie (ou d'infection) qui soit indépendante des modalités de surveillance mises en œuvre.

Les objectifs de mes travaux de recherche sur cette thématique ont été de recenser et de synthétiser les approches méthodologiques pour la surveillance *output-based*, et, de proposer et d'évaluer une

---

<sup>4</sup> Le terme de *maladie* réfère à une expression clinique. Dans le cas de maladies infectieuses, c'est la présence de l'agent pathogène qui nous intéresse, quelles que soient ses manifestations cliniques chez un individu donné. Dans la littérature sur le sujet, on trouve souvent l'expression *freedom from disease* pour parler de l'absence d'infection. J'utilise moi aussi parfois le mot *maladie* pour désigner l'*infection*, souvent pour ne pas alourdir la lecture. Par exemple, on parle habituellement de *maladie réglementée* et pas d'*infection réglementée*.

méthode d'estimation de probabilités d'absence d'infection au niveau élevage dans le cadre de programmes de maîtrise de l'infection par le virus de la diarrhée virale bovine.

### 3.5.2 Vue d'ensemble des méthodes d'estimation de probabilités d'absence de maladies

Mon travail sur ce sujet a été réalisé dans le cadre d'un réseau financé par le programme européen COST<sup>5</sup>, appelé SOUND control<sup>6</sup>. Dans ce projet, j'étais responsable du groupe de travail sur les méthodes permettant de quantifier la probabilité d'absence d'une maladie. La présente section est un résumé de travaux effectués qui sont en cours de rédaction ou de révision<sup>7</sup>. Bien que ces travaux soient chronologiquement postérieurs à ce qui est décrit dans la section suivante, il a été choisi d'exposer d'abord ces éléments de contexte qui permettent de mieux comprendre la méthode décrite plus bas.

La question d'estimer la probabilité d'absence d'une infection est fondamentalement différente d'autres questions abordées en épidémiologie. En effet, beaucoup de questions usuelles consistent à estimer la prévalence d'une maladie lorsqu'elle est présente ou d'évaluer la force de l'association entre une maladie diagnostiquée chez des patients ou des animaux et des facteurs de risque potentiels. Dans ces cas, les probabilités étudiées peuvent être vues comme des fréquences d'événements. Quand on estime une prévalence, cela consiste à compter le nombre d'individus avec un résultat de test positif en proportions du nombre d'individus testés, en appliquant les corrections nécessaires. Quand on estime la force d'association avec un facteur de risque potentiel, cela consiste à comparer les fréquences d'exposition à la variable d'intérêt chez les malades et chez les non-malades, en apportant une fois encore les corrections nécessaires. La particularité de la quantification d'une probabilité d'absence est qu'il est impossible d'estimer la fréquence de l'événement d'intérêt, cet événement étant par définition absent. L'objectif des méthodes pourrait être décrit comme l'estimation de la probabilité qu'une maladie soit absente sachant qu'on ne l'a pas trouvée. Or, si on fait une hypothèse d'absence, il est impossible de construire un intervalle de confiance sur la base de cette hypothèse. Les méthodes de quantification font donc appel à des hypothèses sur une prévalence minimale<sup>8</sup> d'intérêt et à l'évaluation de la probabilité d'obtenir un ensemble de résultats de surveillance, tous négatifs, sous les hypothèses retenues. Par exemple, si on fait l'hypothèse d'une prévalence à 20% et qu'on teste 20 individus avec un test parfait ( $Se=1$ ,  $Sp=1$ ), on a 99 chances sur 100 d'avoir au moins un résultat de test positif dans notre échantillon. Cette sensibilité de la détection augmente avec la taille de l'échantillon et diminue avec la prévalence de la maladie. L'autre quantité d'intérêt dans ces évaluations est la probabilité d'absence de la maladie sachant qu'elle n'a pas été détectée, ou valeur prédictive négative de la surveillance.

Depuis les années 1980, on a assisté sur cette thématique de recherche à une sophistication des approches. Les premiers travaux consistaient en des formules ou des tables donnant la taille d'échantillon requise pour atteindre un certain niveau de confiance d'absence de la maladie, en considérant que la probabilité d'infection était homogène pour tous les individus de la population. Les travaux suivants ont incorporé la structuration des populations en groupes, typiquement des animaux dans des troupeaux, avec des prévalences de groupes infectés et des prévalences intra-groupe dans les groupes infectés. Une autre vague d'avancées majeures a été l'incorporation de l'imperfection des

---

<sup>5</sup> Site internet du programme COST : <https://www.cost.eu/>

<sup>6</sup> Site internet du réseau COST SOUND control : <https://sound-control.eu/>

<sup>7</sup> Un article intitulé *Output-based methodological approaches for substantiating freedom from infection* est en cours de révision. Les éléments principaux ont été présentés lors d'un atelier au congrès européen d'épidémiologie vétérinaire de 2022 : [https://github.com/LefMel/SVEPM\\_2022\\_wk](https://github.com/LefMel/SVEPM_2022_wk). Une revue sur la méthode *scenario tree* est aussi en cours.

<sup>8</sup> Appelée *design prevalence* en anglais.

tests dans les estimations, principalement des défauts de sensibilité. Toutes ces avancées ont abouti et sont incluses dans la méthode *scenario tree*. Cette méthode permet de quantifier la sensibilité d'un dispositif de surveillance et d'estimer une probabilité d'absence d'infection. Le principe en est la réalisation de simulations stochastiques à partir d'un choix de prévalence minimale à détecter, de données sur la structure du système de surveillance et sur le nombre d'animaux testés ainsi que d'hypothèses sur la sensibilité des différents tests utilisés, sur les risques relatifs de présence d'infection associés à différents facteurs de risque et sur la probabilité d'introduction de l'infection au cours du temps. Cette méthode a surtout été utilisée pour démontrer que des pays ou régions étaient indemnes de maladies infectieuses particulières, mais elle a été assez peu utilisée pour quantifier ces probabilités d'infection au niveau élevage. Pour des estimations au niveau élevage lorsque l'infection est supposée absente, des modèles mécanistes représentant finement la dynamique de l'infection si elle était présente seraient plus adaptés. Bien que conceptuellement similaires, ce type de modèles n'est habituellement pas placé dans la catégorie des *scenario trees*, les 2 cadres de modélisation étant habituellement bien séparés. Enfin si l'objectif est d'identifier les élevages non infectés lorsque l'infection est présente dans la population, il est possible d'utiliser les données collectées dans le programme de surveillance pour déterminer et incorporer les facteurs prédictifs de la présence de l'infection dans l'estimation de la probabilité d'infection. Ce dernier point est l'objet de la section suivante.

### 3.5.3 Conception d'une méthode de quantification de probabilités d'absence de maladie au niveau élevage à partir de données longitudinales

Dans les territoires avec un programme de surveillance ciblant une maladie infectieuse et dans lesquels l'infection est endémique ou en voie d'éradication, il est important de pouvoir quantifier les probabilités d'infection au niveau élevage afin de distinguer les élevages indemnes et infectés, ainsi que d'évaluer la probabilité qu'un élevage soit déclaré indemne à tort au niveau du programme. L'identification des élevages dans lesquels l'infection est présente permet en effet de limiter les contaminations d'élevages sains via les échanges, que ce soit à l'intérieur du programme ou avec des partenaires extérieurs. Dans ce contexte, le *European Food Safety Authority* (EFSA) a financé le projet STOC free<sup>9</sup> (van Roon et al., 2018) qui avait pour objectif de développer un cadre d'estimation de la probabilité pour un élevage d'être indemne d'une maladie non réglementée, pour laquelle existe un programme de surveillance régional ou national, lorsque l'infection est toujours présente dans certains élevages participant au programme. Dans le projet STOC free, il a été choisi de se focaliser sur l'infection par le virus de la diarrhée virale bovine (BVD). Le projet comptait des partenaires de 6 pays européens : Allemagne, Irlande, France, Pays-Bas, Royaume-Uni et Suède. Les scientifiques de l'UMR BIOEPAR (Christine Fourichon et moi-même), avaient en charge le développement et l'évaluation d'un modèle statistique de prédiction de probabilités d'infection à partir de données hétérogènes collectées dans les différents programmes de surveillance. Un financement de thèse nous a été alloué pour mener cette tâche. Une partie du travail a été effectué par Mathilde Mercat, la doctorante recrutée, qui était co-encadrée par C. Fourichon et moi.

La première étape du travail a consisté à identifier les éléments importants à inclure dans un modèle de prédiction de l'infection par le virus de la BVD. Pour cela, un rapport synthétisant les caractéristiques épidémiologiques et les méthodes de détection de l'infection, à des échelles allant de l'animal au territoire, a été rédigé<sup>10</sup>. Brièvement, l'épidémiologie de l'infection par le virus de la BVD

---

<sup>9</sup> Site internet du projet STOC free : <https://www.stocfree.eu/>

<sup>10</sup> Rapport publié sur le site internet du projet STOC free : [https://www.stocfree.eu/sites/default/files/documents/Deliverables/1.1\\_conceptual\\_model\\_april\\_2018.pdf](https://www.stocfree.eu/sites/default/files/documents/Deliverables/1.1_conceptual_model_april_2018.pdf)

est très particulière et a des conséquences sur le diagnostic. En cas d'infection, le plus souvent, les signes cliniques sont peu importants et durent quelques semaines, de même que l'excrétion virale. On parle alors d'animaux infectés transitoires. Lors d'infection transitoire, les tests de recherche d'antigènes et la PCR sont positifs sur une courte fenêtre temporelle de quelques semaines. L'immunité suite à ce type d'infection est protectrice et de longue durée. Les bovins sont séropositifs pendant plusieurs années. Toutefois, lorsque l'infection survient pendant la gestation, plusieurs conséquences sont possibles. Lors d'infection en début de gestation, on peut observer de l'infertilité ou des mortalités embryonnaires. Les infections survenant entre 30 et 120 jours de gestation peuvent conduire à la naissance de veaux infectés persistants immunotolérants (IPI). Ces veaux meurent souvent dans leurs 2 premières années de vie. Ces animaux reconnaissent le virus comme faisant partie du *soi* et ne montent pas de réponse immunitaire contre lui. De ce fait, les IPI sont positifs aux tests de recherche d'antigènes et PCR, mais négatifs aux tests de recherche d'anticorps. Les IPI sont les sources principales d'infection et peuvent permettre son maintien en induisant des naissances de nouveaux IPI. Les vaches gestantes d'un IPI qui introduisent l'infection dans un élevage sont appelées vaches de Troie. Elles constituent un risque important de propagation de l'infection car il n'est pas possible de tester le veau dont elles sont gestantes. En Irlande, pour les années 2013 à 2015, (Reardon et al., 2018)<sup>11</sup> ont estimé que 8,8% des IPI étaient issus de vaches de Troie.

Si l'épidémiologie de l'infection par le virus de la BVD est particulière, les programmes de surveillance de la maladie sont eux divers. Dans le cadre du projet STOC free, des programmes existants dans les 6 pays partenaires ont été décrits et comparés (van Roon et al., 2020b). Pour la France, c'est le programme breton géré par le GDS Bretagne qui a été décrit. Les programmes appliqués dans d'autres départements ou régions français ont été décrits dans la thèse d'exercice vétérinaire de Coralie Bernard que j'ai encadrée<sup>12</sup>. Schématiquement, pour les élevages laitiers, on peut distinguer les programmes basés sur la recherche d'anticorps sur le lait de tank 2 à 4 fois par an, des programmes basés sur la recherche du virus sur du cartilage auriculaire de tous les veaux, dans les jours suivant leur naissance. La recherche d'anticorps spécifiques de l'infection par le BVD sur le lait de tank présente l'avantage d'être peu coûteuse. Par contre, le test est positif en l'absence d'infection active si au moins une partie des vaches laitières du troupeau a été en contact avec le virus par le passé ou vaccinée. Par ailleurs, les tests basés sur le lait de tank évaluent le statut sérologique des vaches laitières, mais pas celui des autres bovins présents sur l'exploitation. Dans les élevages allaitants, la recherche d'anticorps dans le lait n'étant pas possible, des recherches d'anticorps sont effectuées sur des mélanges de sérum d'animaux de différentes catégories d'âge, ou bien le virus est recherché sur tous les nouveau-nés comme en élevage laitier.

Un dernier élément qui peut être incorporé dans l'estimation de la probabilité d'absence d'infection est la présence de facteurs de risque. Les facteurs de risque de nouvelle infection par virus de la BVD au niveau élevage ont été revus dans le cadre de ce projet. Les résultats ont été publiés par (van Roon et al., 2020a). Les principaux facteurs associés à une probabilité accrue de nouvelle infection identifiés sont d'être un élevage laitier (plutôt qu'allaitant), la taille du troupeau, la participation à des foires ou des marchés, l'introduction de bovins dans le troupeau et l'utilisation de pâturages communs. Les données sur ces facteurs de risque peuvent être utiles à l'estimation d'une probabilité d'infection lorsqu'elles sont disponibles. Une difficulté identifiée dans ce travail est la difficulté à comparer les estimés produits par différentes études, notamment en raison de la grande hétérogénéité entre

---

<sup>11</sup> Cet article est issu du travail de Master de Fiona Reardon dont j'étais l'examineur externe.

<sup>12</sup> Lien vers la thèse de Coralie Bernard : <https://doc-veto.oniris-nantes.fr/Record.htm?record=19316515124911347979>



études. Enfin, pour pouvoir être incorporés à une estimation, ces facteurs de risques doivent être collectés de façon systématique dans tous les élevages participant au programme.

Un modèle de prédiction de probabilité d'infection au niveau troupeau doit incorporer dans sa structure les éléments communs à tous les programmes de surveillance. Les éléments spécifiques du programme doivent être saisis par les utilisateurs ou bien estimés à partir de données. C'est la logique qui a été suivie pour développer le modèle STOC free. Tous les programmes de surveillance reposent sur la réalisation de tests systématiques dans les élevages participants. L'intervalle entre les tests peut varier. Les tests utilisés sont souvent imparfaits, c'est-à-dire qu'il peut y avoir des faux négatifs ou des faux positifs. La sensibilité et la spécificité sont habituellement connues, même si cette connaissance est imprécise. Les maladies non réglementées majeures persistent souvent longtemps dans les élevages infectés lorsque rien n'est fait. Par ailleurs, un certain nombre de facteurs de risque d'introduction est souvent connu. L'accès à des données de facteurs de risque comme le nombre d'animaux introduits, peut améliorer l'estimation de la probabilité de présence de l'infection. Le modèle développé dans le projet est un modèle dit de Markov caché (Hidden Markov Model ou HMM en anglais). En résumé (voir Figure 13), la variable d'intérêt est le statut vrai (ou latent) de l'élevage vis-à-vis de l'infection. Ce statut latent est mesuré de manière imparfaite par des tests biologiques. Les sensibilités et spécificités des tests relient le statut latent aux résultats de tests. Le modèle est en temps discret avec un pas de temps mensuel et incorpore des probabilités de transition entre les 2 statuts latents (positif ou négatif). Lorsque des facteurs de risque de nouvelle infection sont disponibles, la probabilité de transition du statut négatif vers le statut positif entre 2 mois consécutifs est modélisée à l'aide d'une régression logistique. La probabilité d'infection (statut latent positif) est prédite pour chacun des élevages inclus pour le dernier mois de données de surveillance. Les données historiques, collectées antérieurement au dernier mois de surveillance sont utilisées pour l'estimation des différents paramètres du modèle. Cette estimation se fait dans un cadre bayésien. Des paramètres de distributions a priori doivent être fournis pour les sensibilités et spécificités des tests, pour les paramètres de dynamique d'infection, ainsi que pour les coefficients de la régression logistique lorsque des données de facteurs de risque sont disponibles. Une description et une application de modèle ont été publiées dans le *Peer Community Journal* (Madouasse et al., 2022). Le modèle d'inférence bayésienne a été codé dans les logiciels Stan et JAGS et des fonctions de préparation des données, d'interfaçage avec les logiciels d'inférence bayésienne et d'analyse des résultats ont été regroupées dans un package R. Le package R est libre et disponible sur Github<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> Lien vers le package R STOCfree : <https://github.com/AurMad/STOCfree>. Diverses ressources ont été développées pour l'utilisation du package. Liens vers un tutoriel : [https://github.com/AurMad/STOCfree\\_model\\_tutorial](https://github.com/AurMad/STOCfree_model_tutorial) et une vidéo de démonstration <https://youtu.be/rrxi2mjaDlo>





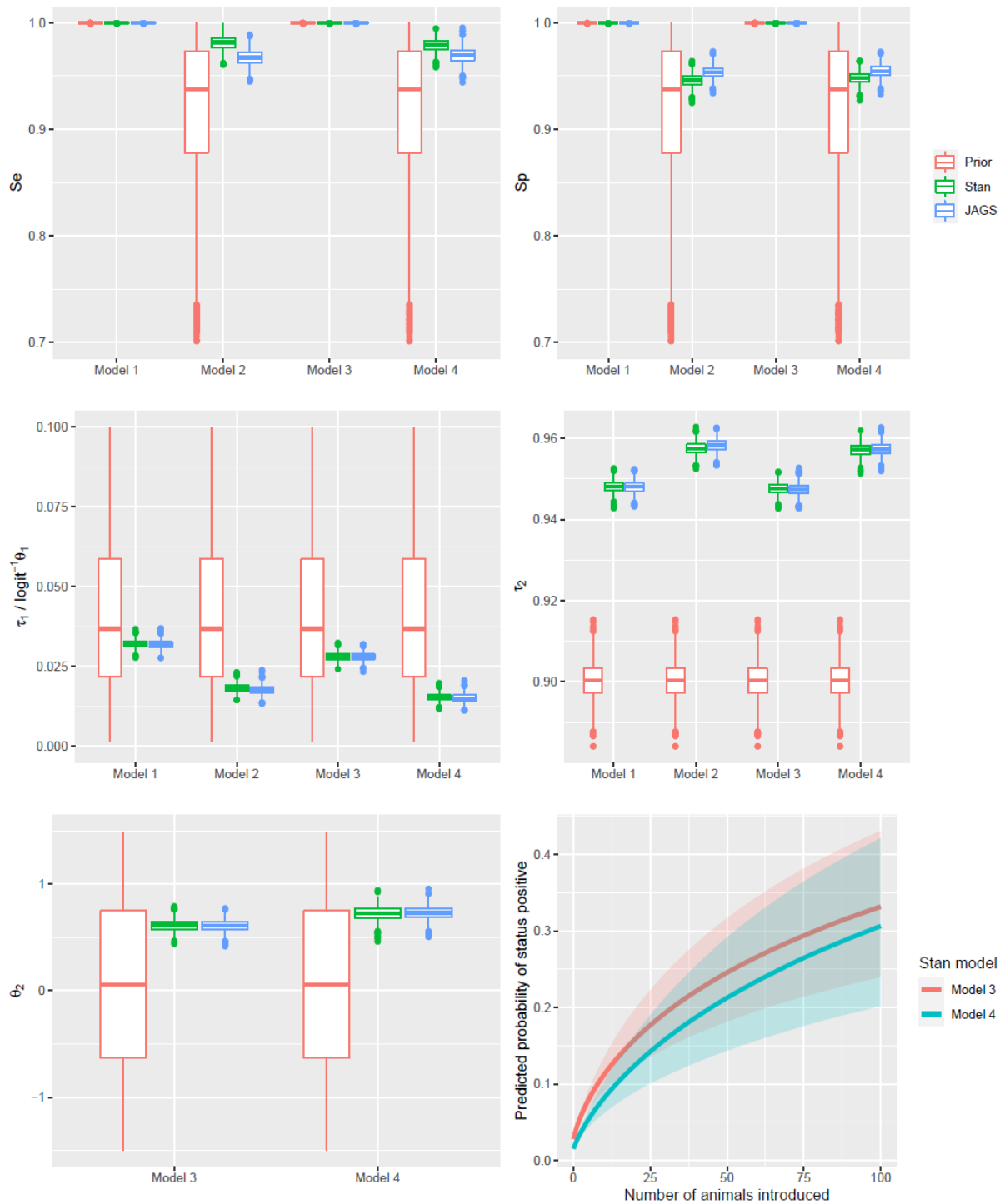


Figure 14 : Distributions a priori et distributions postérieures des paramètres de 4 modèles évalués sur les données de surveillance de la BVD collectées dans 1 687 élevages de Loire-Atlantique entre 2014 et 2017. Les troupeaux étaient testés 2 fois par an avec un test ELISA anticorps sur échantillon de lait de tank. Chaque panneau représente un paramètre du modèle, à l'exception du dernier panneau en bas à droite qui présente la probabilité de devenir positif en fonction du nombre de bovins introduits. Modèle 1 : test considéré comme parfait, pas de facteur de risque, Modèle 2 : test imparfait ( $Se \sim \text{Beta}(10, 1)$ ;  $Sp \sim \text{Beta}(10, 1)$ ), pas de facteur de risque ; Modèle 3 : test parfait, logarithme du nombre de bovins introduits inclus comme facteur de risque ; Modèle 4 : test imparfait, logarithme du nombre de bovins introduits inclus comme facteur de risque.

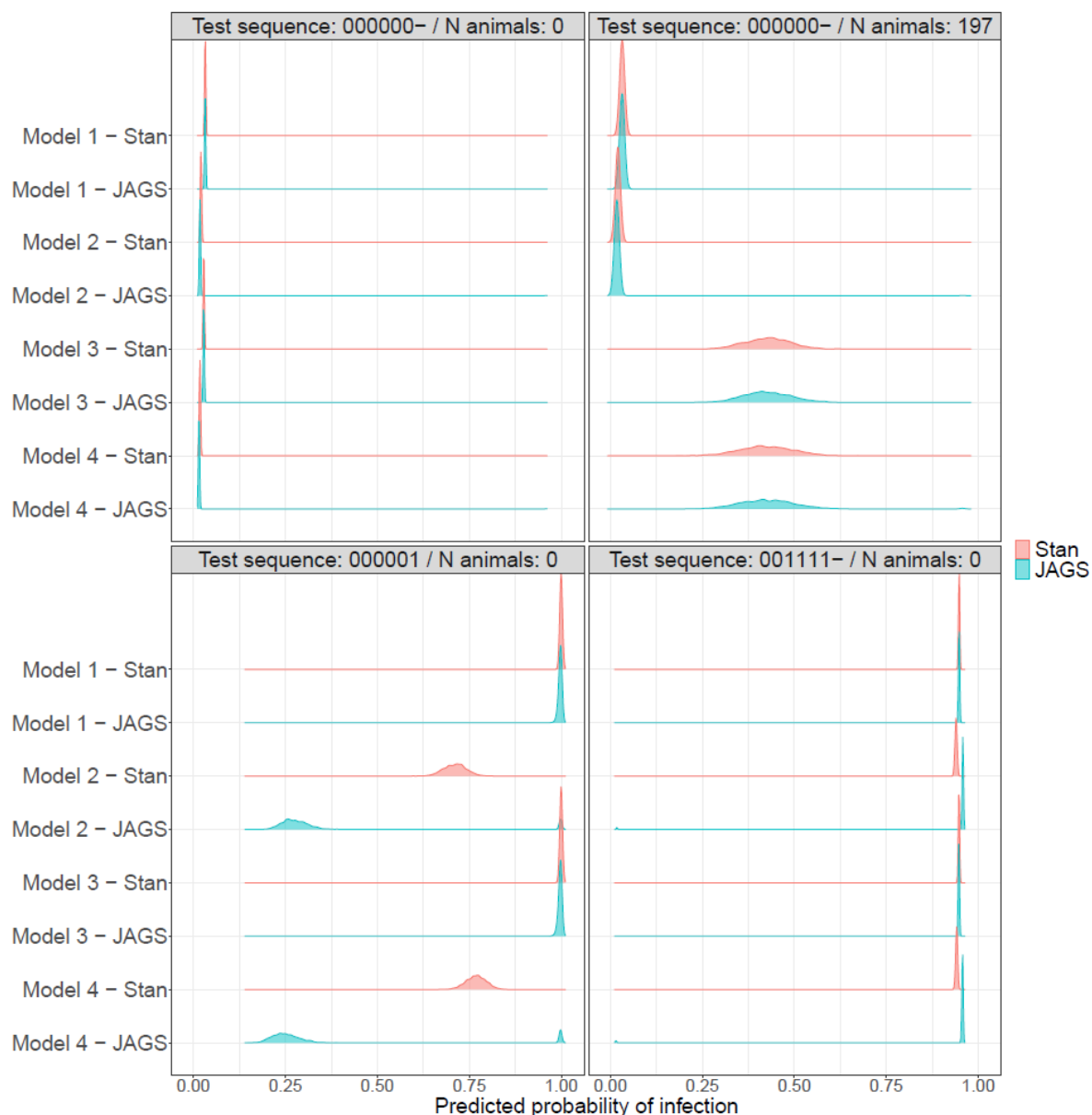


Figure 15 : Probabilités d'infection prédites au dernier mois de surveillance pour 4 élevages avec des séquences de résultats de tests et nombre d'animaux introduits différentes. Modèle 1 : test considéré comme parfait, pas de facteur de risque, Modèle 2 : test imparfait ( $Se \sim \text{Beta}(10, 1)$  ;  $Sp \sim \text{Beta}(10, 1)$ ), pas de facteur de risque ; Modèle 3 : test parfait, logarithme du nombre de bovins introduits inclus comme facteur de risque ; Modèle 4 : test imparfait, logarithme du nombre de bovins introduits inclus comme facteur de risque.

La capacité du modèle à détecter l'infection a été évaluée sur données simulées (Mercat et al., 2022). La simulation de données permet d'évaluer les performances d'un modèle en l'absence de gold standard, lorsque l'application d'un gold standard est coûteuse ou lorsqu'on souhaite évaluer l'effet d'un large éventail de situations qu'il n'est pas possible d'observer sur le terrain. Dans notre étude, les performances du modèle STOC free, par rapport à l'utilisation d'un test seul, ont été évaluées sur 216 scénarios qui différaient par la sensibilité et la spécificité du test, les paramètres de dynamique de l'infection, et, la fréquence et la force de l'association avec un facteur de risque de nouvelle infection. La valeur ajoutée du modèle était en général plus importante lorsque la sensibilité du test était faible. Ceci s'explique par le fait que lorsqu'un test a une faible sensibilité, le potentiel d'amélioration des performances de détection des nouvelles infections par l'utilisation d'autres sources d'information est plus important. Pour les autres facteurs, aucune association constante avec les performances du

modèle n'a été notée. Notamment, notre hypothèse initiale que la détection des nouvelles infections serait améliorée par l'inclusion de facteurs de risque fréquents et fortement associés à la probabilité de nouvelle infection n'a pas été vérifiée. Cela pourrait s'expliquer par le cadre de simulation choisi où les fréquences de test et de mesure du facteur de risque étaient les mêmes. En réalité, les données de facteurs de risque, comme les introductions d'animaux, sont disponibles à une fréquence plus importante que les résultats de tests. Un critère qu'il aurait été intéressant d'évaluer est la précocité de la détection lorsque les facteurs de risque sont disponibles à une fréquence élevée et les tests sont réalisés de une à quelques fois par année. Cela n'a pas été possible avec le protocole de simulation utilisé ici. La génération de données simulées est une manière d'évaluer des méthodes dans une variété de contextes qu'il n'est pas possible d'observer sur le terrain. La simulation est la seule manière d'évaluer un dispositif de surveillance pour des maladies actuellement absentes ou non détectées.

Enfin, le modèle STOC free a été utilisé pour évaluer les probabilités d'infection par le virus de la BVD dans 4 pays européens : Allemagne, Ecosse, Irlande et Pays-Bas (van Roon et al., 2022). Cela a permis de valider l'utilisation du modèle dans des contextes différents. Cela a permis d'obtenir des estimations des caractéristiques des tests dans chacun des pays et de comparer les probabilités d'infection dans les élevages considérés indemnes.

## 4. Projet de recherche

### 4.1 Surveillance des maladies des animaux d'élevage

#### 4.1.1 Combiner prédiction et inférence pour la conception et l'évaluation de dispositifs de surveillance

Mes travaux sur la surveillance des maladies des bovins m'ont permis d'appréhender les implications de la prévalence et de l'incidence des maladies recherchées sur la manière de poser les questions et sur les familles de méthodes à mettre en œuvre. Lorsque la maladie recherchée est endémique, sa probabilité d'occurrence peut être envisagée comme une fréquence. Il est possible de quantifier les forces d'association de cette maladie avec diverses variables, qui pourront être utilisées pour sa prédiction et sa détection. Dans ce cas, l'inférence statistique, c'est-à-dire l'estimation des valeurs de paramètres de modèles quantitatifs à partir de données de terrain est possible. Mais lorsque la maladie est absente, tout modèle de détection doit être basé sur des hypothèses. Ces hypothèses sont issues de la littérature scientifique, d'opinions d'experts ou de toute autre source d'information jugée pertinente. Les hypothèses déterminent à la fois la structure du modèle envisagé, c'est-à-dire les relations entre les différentes variables du modèle, et les valeurs ou distributions pour les différents paramètres de ce modèle.

Une voie de recherche prometteuse consiste à combiner inférence et prédiction pour la conception et l'évaluation de dispositifs de surveillance lorsque la maladie à détecter est absente. La simulation permet de générer des scénarios d'émergence et de propagation plausibles au vu des connaissances récentes. Les données générées peuvent ensuite guider la conception des dispositifs de surveillance et permettre d'identifier les méthodes de détection les plus adaptées. J'ai, dans mes travaux passés, utilisé des données simulées pour évaluer des indicateurs et des méthodes pour la surveillance (Madouasse et al., 2013; Mercat et al., 2022). Toutefois, les modèles de simulation mis en œuvre étaient relativement simples. La modélisation de situations plus réalistes nécessiterait des modèles plus complexes. A BIOEPAR, les compétences en simulations de données, que ce soit avec des modèles mécanistes ou des modèles multi-agents, sont portées par les chercheurs de l'équipe Dynamo. Des travaux menés en communs permettraient de mutualiser les expertises de chacun et de produire des résultats plus robustes.

En juillet 2022, nous avons soumis avec des collègues européens, une demande de financement pour un projet sur la surveillance syndromique auprès de l'*international coordination of research on infectious animal diseases (ICRAD)*<sup>14</sup> qui le finance des projets transnationaux européens. Ce projet est porté par *University College Dublin* et associe des partenaires grecs (*University of Thessaly*), lithuaniens (*Lithuanian University of Health Science*), néerlandais (*Royal GD animal health*) et suédois (*Swedish National Veterinary Institute*). Les objectifs du projet sont de développer des systèmes de surveillance syndromique combinant différentes sources de données et des méthodes de détection innovantes, pour la détection précoce de maladies infectieuses émergentes. Si ce projet est financé, je serai responsable d'un *work package* sur la génération de données simulées selon différents scénarios d'émergences plausibles pour l'identification de sources de données pertinentes et l'évaluation de méthodes de détection. Le travail conduit à BIOEPAR serait en partie effectué par un chercheur

---

<sup>14</sup> Il s'agit d'un financement de type ERA-NET. En France, le financement se fait via l'agence nationale de la recherche.

postdoctoral sur une période de 2 ans, en collaboration avec Sébastien Picault, chercheur dans l'équipe Dynamo.

Plus en détail, alors qu'il existe des modèles génériques expliquant l'émergence des maladies infectieuses (Engering et al., 2013; Wolfe et al., 2007), les implications de ces modèles pour la conception de systèmes de surveillance efficaces n'ont pas été étudiées. De tels modèles d'émergences peuvent aider à concevoir des dispositifs de surveillance syndromique en fournissant des hypothèses pour la construction de modèles de simulation d'émergences. Une fois ces modèles disponibles, il devient possible de générer des données d'indicateurs associés à différents types d'émergences et d'évaluer différentes méthodes de détection des signaux associés. La littérature sur les émergences (Engering et al., 2013) en distingue 3 types : pathogène acquérant la capacité d'infecter un nouvel hôte, pathogène développant de nouveaux traits (contagiosité, virulence) chez un hôte existant et pathogène se propageant dans une nouvelle aire géographique. Chaque type d'émergence a des causes associées différentes qui en font varier la probabilité en fonction du lieu et du moment. Ceci a des répercussions sur les modalités de surveillance optimales pour une détection précoce. De la même manière, certains pathogènes pourraient être introduits par la faune sauvage, comme les oiseaux migrateurs, via des échanges internationaux... L'émergence peut se traduire par des syndromes différents selon le pathogène et l'espèce atteinte. Tous ces éléments sont à prendre en compte dans le choix des espèces à cibler ainsi que des animaux et indicateurs à surveiller au sein de chaque espèce. Un modèle de prédiction des émergences devrait incorporer tous ces éléments dans sa structure, les sources de données utilisables pour le construire et les trous de connaissances devraient être identifiés.

#### 4.1.2 Utilisation de données longitudinales pour la surveillance des maladies au niveau troupeau

Les élevages bovins laitiers se caractérisent par la collecte de données longitudinales pour le suivi de la production et de la santé des animaux. Les données de concentration en cellules somatiques collectées par le contrôle laitier et de mammites cliniques collectées par l'éleveur sont des exemples de données de santé longitudinales pour la surveillance de la santé mammaire au niveau troupeau. Dans ma thèse, j'ai décrit ces données et fourni des valeurs de référence pour classer les performances de chaque troupeau et diagnostiquer ces problèmes. Comme expliqué plus haut, un enjeu majeur est de distinguer les infections d'origine mammaire, c'est-à-dire contagieuses, des infections environnementales. Ces 2 types d'infections sont caractérisées par des dynamiques différentes : les infections d'origine mammaire évoluent sur un mode chronique, alors que les infections environnementales guérissent en principe rapidement. Une hypothèse à évaluer est que, dans un troupeau, les fréquences de chaque type d'infection sont estimables à partir d'un modèle de Markov caché à 3 états : sain, infection courte et infection chronique. Ces 3 états se caractérisent par des probabilités de transition différentes. A cette fin, le modèle développé dans le projet STOC free pourrait être adapté. Le cadre d'estimation bayésien permet en effet de distinguer les 2 types d'infection par les distributions a priori placées sur les probabilités de transition entre les différents états, notamment sur les probabilités de transition entre l'état infecté et l'état sain. Si cette hypothèse est vérifiée, on peut estimer la prévalence de chaque type d'infections dans un troupeau et prédire pour chaque vache la probabilité d'être dans chaque état, d'après l'historique de données de contrôle laitier et de mammites cliniques. Cette prédiction permettrait d'adapter les stratégies préventive et curative à la fois au niveau du troupeau et pour la vache dans son troupeau.

A l'automne 2022, je vais accueillir pendant un mois une doctorante en thèse à l'Université de Copenhague pour qu'elle explore cette question. Cette doctorante est encadrée par Matt Denwood,

dont une des thématiques de recherche est l'utilisation de modèles bayésiens pour l'évaluation de tests diagnostiques.

## 4.2 Utilisation des nouvelles technologies pour la détection des troubles de santé et l'évaluation du bien-être des bovins

### 4.2.1 Projet WAIT4

L'évaluation du bien-être animal est une préoccupation sociétale majeure, avec des consommateurs et des citoyens de plus en plus soucieux des traitements réservés aux animaux d'élevage. La sensation de bien-être étant subjective, elle est compliquée à évaluer chez des animaux qui ont des perceptions et des représentations probablement assez différentes de celles des humains. Actuellement, la méthode de référence dans différentes espèces est un protocole appelé *Welfare Quality*. Ce protocole a été construit autour des 5 libertés proposées pour servir de base aux définitions du bien-être animal dans les années 1960 en Angleterre. Le protocole *Welfare Quality* est en partie basé sur l'évaluation des conditions de vie fournies aux animaux<sup>15</sup> et en partie sur des mesures faites sur les animaux<sup>16</sup>. Ce protocole présente l'avantage d'avoir été conçu par des experts du bien-être animal et donc de bien remplir les objectifs d'une évaluation la plus objective possible tout en étant applicable sur le terrain. Une difficulté avec ce protocole est qu'il est chronophage. L'essor de capteurs en élevage rend possible l'évaluation de certaines composantes du protocole à haute fréquence, de façon automatique et à faible coût.

A l'automne 2022 va démarrer le projet *Intelligence artificielle et nouvelles technologies pour évaluer des indicateurs pertinents de bien-être pour des animaux confrontés aux défis de la transition agro-écologique* (WAIT4). L'objectif général du projet est d'exploiter les nouvelles opportunités offertes par les technologies numériques pour mesurer les différentes composantes du BEA en temps réel, et mettre en œuvre de nouvelles approches en intelligence artificielle pour intégrer les grands volumes de données hétérogènes collectées grâce à ces équipements. Il s'agit d'un projet financé par les Programmes et Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR) dans la cadre du 4<sup>ème</sup> programme d'investissements d'avenir de l'Etat français. J'ai contribué à la rédaction de ce projet et je serai responsable d'un *work package* sur l'évaluation des impacts de la transition agro-écologique sur le bien-être animal. Je serai également porteur d'un projet de thèse sur les boiteries financé dans le cadre ce projet.

### 4.2.2 Détection des boiteries des bovins et évaluation de leurs conséquences

Les boiteries des bovins sont une pathologie fréquente avec un fort impact sur le bien-être. En effet, ces boiteries sont des troubles de la démarche des bovins qui résultent pour leur grande majorité de lésions douloureuses au niveau du pied. Les travaux conduits avec Lucile Riaboff (Riaboff et al., 2021) ont montré qu'il n'était pas possible de détecter les boiteries en utilisant les comportements prédits à partir d'accéléromètres placés dans des colliers. De plus, si les conséquences des boiteries sur le temps passé couché ou le temps passé à s'alimenter commencent à être bien documentées, l'impact de ces boiteries sur les interactions sociales des bovins est assez peu documenté, voire pas du tout documenté pour les bovins au pâturage.

La première hypothèse du projet de thèse est que chez les vaches qui boitent, les comportements de lever et de coucher sont altérés et que ces altérations peuvent être mises à profit pour la détection

---

<sup>15</sup> Correspond aux moyens, fourniture d'eau en quantité suffisante.

<sup>16</sup> En anglais, *animal-based measures*.

des boiteries à l'aide d'accéléromètres placés dans des colliers. Un premier objectif est donc d'évaluer les performances de méthodes incluant la caractérisation du lever et du coucher à partir de données accélérométriques pour la détection des boiteries des bovins.

Les bovins étant des animaux sociaux, une seconde hypothèse est que les vaches qui boitent voient leurs interactions sociales modifiées. Il existe des capteurs permettant de mesurer la distance entre individus. En combinant ces capteurs de proximité avec la détection de comportements spécifiques d'agression et de fuite, il devient possible d'évaluer les interactions sociales entre bovins et par conséquent l'impact de maladies sur ces comportements sociaux.

Ces différentes questions seront explorées lors d'une thèse qui démarrera en septembre 2023.

## 5. Références

Liste des références citées dans le texte ci-dessus. La liste de mes publications est dans la section suivantes.

- Bronner, A., Morignat, E., Hénaux, V., Madouasse, A., Gay, E., Calavas, D., 2015a. Devising an indicator to detect mid-term abortions in dairy cattle: a first step towards syndromic surveillance of abortive diseases. *PLoS One* 10, e0119012. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119012>
- Bronner, A., Morignat, E., Madouasse, A., Gasqui, P., Gay, E., Calavas, D., 2015b. Utilisation des données d'insémination artificielle afin d'identifier l'impact d'un évènement abortif dans les élevages de bovins laitiers. *INRA Prod. Anim.* 28, 243–249.
- Doceul, V., Lara, E., Sailleau, C., Belbis, G., Richardson, J., Bréard, E., Viarouge, C., Dominguez, M., Hendrikx, P., Calavas, D., Desprat, A., Languille, J., Comtet, L., Pourquier, P., Eléouët, J.F., Delmas, B., Marianneau, P., Vitour, D., Zientara, S., 2013. Epidemiology, molecular virology and diagnostics of Schmallenberg virus, an emerging orthobunyavirus in Europe. *Vet. Res.* 44, 1–13. <https://doi.org/10.1186/1297-9716-44-31>
- Douglass, A.P., O'Grady, L., McGrath, G., Tratalos, J., Mee, J.F., Barrett, D., Sánchez-Miguel, C., More, S.J., Madouasse, A., Green, M., Madden, J.M., McAloon, C.G., 2022. Development of a syndromic surveillance system for Irish dairy cattle using milk recording data. *Prev. Vet. Med.* 204, 105667. <https://doi.org/10.1016/J.PREVETMED.2022.105667>
- Dupuy, C., Bronner, A., Watson, E., Wuyckhuise-Sjouke, L., Reist, M., Fouillet, A., Calavas, D., Hendrikx, P., Perrin, J.B., 2013. Inventory of veterinary syndromic surveillance initiatives in Europe (Triple-S project): Current situation and perspectives. *Prev Vet Med* 111, 220–229.
- Engering, A., Hogerwerf, L., Slingenbergh, J., 2013. Pathogen-host-environment interplay and disease emergence. *Emerg. Microbes Infect.* 2. <https://doi.org/10.1038/emi.2013.5>
- Henning, K.J., 2004. What is syndromic surveillance? *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* 53 Suppl, 5–11.
- Hoffmann, B., Scheuch, M., Hoper, D., Jungblut, R., Holsteg, M., Schirrmeier, H., Eschbaumer, M., Goller, K. V., Wernike, K., Fischer, M., Breithaupt, A., Mettenleiter, T.C., Beer, M., 2012. Novel orthobunyavirus in Cattle, Europe, 2011. *Emerg Infect Dis* 18, 469–472.
- Jones, K.E., Patel, N.G., Levy, M.A., Storeygard, A., Balk, D., Gittleman, J.L., Daszak, P., 2008. Global trends in emerging infectious diseases. *Nature* 451, 990–993.
- Madouasse, A., Browne, W.J., Huxley, J.N., Toni, F., Bradley, A.J., Green, M.J., 2012a. Risk factors for a high somatic cell count at the first milk recording in a large sample of UK dairy herds. *J. Dairy Sci.* 95, 1873–84. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4801>
- Madouasse, A., Browne, W.J., Huxley, J.N., Toni, F., Green, M.J., 2012b. A semi-parametric model for lactation curves: Development and application. *Prev. Vet. Med.* 105, 38–48.
- Madouasse, A., Huxley, J.N., Browne, W.J., Bradley, A.J., Green, M.J., 2010. Somatic cell count dynamics in a large sample of dairy herds in England and Wales. *Prev. Vet. Med.* 96, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2010.05.005>
- Madouasse, A., Marceau, A., Lehébel, A., Brouwer-Middelesch, H., van Schaik, G., Van der Stede, Y., Fourichon, C., 2014. Use of monthly collected milk yields for the detection of the emergence of the 2007 French BTV epizootic. *Prev. Vet. Med.* 113, 484–491.
- Madouasse, A., Marceau, A., Lehébel, A., Brouwer-Middelesch, H., van Schaik, G., Van der Stede, Y., Fourichon, C., 2013. Evaluation of a Continuous Indicator for Syndromic Surveillance through



- Simulation. Application to Vector Borne Disease Emergence Detection in Cattle Using Milk Yield. PLoS One 8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073726>
- Madouasse, A., Mercat, M., van Roon, A., Graham, D., Guelbenzu, M., Santman Berends, I., van Schaik, G., Nielen, M., Frössling, J., Ågren, E., Humphry, R., Eze, J., Gunn, G., Henry, M.K., Gethmann, J., More, S.J., Toft, N., Fourichon, C., 2022. A modelling framework for the prediction of the herd-level probability of infection from longitudinal data. *Peer Community J.* 2, e4. <https://doi.org/10.24072/PCJOURNAL.80>
- Marceau, A., Madouasse, A., Lehébel, A., van Schaik, G., Veldhuis, A., Van der Stede, Y., Fourichon, C., 2014. Can routinely recorded reproductive events be used as indicators of disease emergence in dairy cattle? An evaluation of 5 indicators during the emergence of bluetongue virus in France in 2007 and 2008. *J. Dairy Sci.* 97. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7346>
- McGrath, G., More, S.J., O'Neill, R., 2018. Hypothetical route of the introduction of Schmallenberg virus into Ireland using two complementary analyses. *Vet. Rec.* 182, 226. <https://doi.org/10.1136/vr.104302>
- Mercat, M., van Roon, A.M., Santman-Berends, I., van Schaik, G., Nielen, M., Graham, D., More, S.J., Guelbenzu-Gonzalo, M., Fourichon, C., Madouasse, A., 2022. Capacity of a Bayesian model to detect infected herds using disease dynamics and risk factor information from surveillance programmes: A simulation study. *Prev. Vet. Med.* 200, 105582. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2022.105582>
- Nusinovici, S., Madouasse, A., Fourichon, C., 2016. Quantification of the increase in the frequency of early calving associated with late exposure to bluetongue virus serotype 8 in dairy cows: implications for syndromic surveillance. *Vet. Res.* 47, 18. <https://doi.org/10.1186/s13567-015-0296-7>
- Pioz, M., Guis, H., Calavas, D., Durand, B., Abrial, D., Ducrot, C., 2011. Estimating front-wave velocity of infectious diseases: a simple, efficient method applied to bluetongue. *Vet Res* 42, 60.
- Purse, B. V, Mellor, P.S., Rogers, D.J., Samuel, A.R., Mertens, P.P., Baylis, M., 2005. Climate change and the recent emergence of bluetongue in Europe. *Nat Rev Microbiol* 3, 171–181.
- Reardon, F., Graham, D.A., Clegg, T.A., Tratalos, J.A., O'Sullivan, P., More, S.J., 2018. Quantifying the role of Trojan dams in the between-herd spread of bovine viral diarrhoea virus (BVDv) in Ireland. *Prev. Vet. Med.* 152, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2018.02.002>
- Riaboff, L., Aubin, S., Bédère, N., Couvreur, S., Madouasse, A., Goumand, E., Chauvin, A., Plantier, G., 2019. Evaluation of pre-processing methods for the prediction of cattle behaviour from accelerometer data. *Comput. Electron. Agric.* 165, 104961. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104961>
- Riaboff, L., Poggi, S., Madouasse, A., Couvreur, S., Aubin, S., Bédère, N., Goumand, E., Chauvin, A., Plantier, G., 2020. Development of a methodological framework for a robust prediction of the main behaviours of dairy cows using a combination of machine learning algorithms on accelerometer data. *Comput. Electron. Agric.* 169, 105179. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105179>
- Riaboff, L., Relun, A., Petiot, C.E., Feuilloy, M., Couvreur, S., Madouasse, A., 2021. Identification of discriminating behavioural and movement variables in lameness scores of dairy cows at pasture from accelerometer and GPS sensors using a Partial Least Squares Discriminant Analysis. *Prev. Vet. Med.* 193, 105383. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2021.105383>
- Riaboff, L., Shalloo, L., Smeaton, A.F., Couvreur, S., Madouasse, A., Keane, M.T., 2022. Predicting

- livestock behaviour using accelerometers: A systematic review of processing techniques for ruminant behaviour prediction from raw accelerometer data. *Comput. Electron. Agric.* 192, 106610. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106610>
- Saegerman, C., Mellor, P., Uyttenhoef, A., Hanon, J.B., Kirschvink, N., Haubruge, E., Delcroix, P., Houtain, J.Y., Pourquier, P., Vandenbussche, F., Verheyden, B., De Clercq, K., Czaplicki, G., 2010. The most likely time and place of introduction of BTV8 into Belgian ruminants. *PLoS One* 5, e9405.
- van Roon, A.M., Madouasse, A., Toft, N., Santman-Berends, I.M.G.A., Gethmann, J., Eze, J., Humphry, R.W., Graham, D., Guelbenzu-Gonzalo, M., Nielen, M., More, S.J., Mercat, M., Fourichon, C., Sauter-Louis, C., Frössling, J., Ågren, E., Gunn, G.J., Henry, M.K., van Schaik, G., 2022. Output-based Assessment of Herd-level Freedom From Infection in Endemic Situations: Application of a Bayesian Hidden Markov Model. *Prev. Vet. Med.* 105662. <https://doi.org/10.1016/J.PREVETMED.2022.105662>
- van Roon, A.M., Mercat, M., van Schaik, G., Nielen, M., Graham, D.A., More, S.J., Guelbenzu-Gonzalo, M., Fourichon, C., Madouasse, A., Santman-Berends, I.M.G.A., 2020a. Quantification of risk factors for bovine viral diarrhoea virus in cattle herds: A systematic search and meta-analysis of observational studies. *J. Dairy Sci.* 103, 9446–9463. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18193>
- van Roon, A.M., Santman-Berends, I.M.G.A., Graham, D., More, S.J., Nielen, M., van Duijn, L., Mercat, M., Fourichon, C., Madouasse, A., Gethmann, J., Sauter-Louis, C., Frössling, J., Lindberg, A., Correia-Gomes, C., Gunn, G.J., Henry, M.K., van Schaik, G., 2020b. A description and qualitative comparison of the elements of heterogeneous bovine viral diarrhoea control programs that influence confidence of freedom. *J. Dairy Sci.* 103, 4654–4671. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16915>
- van Roon, A.M., Santman-Berends, I.M.G.A., Graham, D.A., More, S.J., Nielen, M., Madouasse, A., Mercat, M., Fourichon, C., Gethmann, J., Frössling, J., Lindberg, A.L.E., Correia-Gomes, C., Gunn, G.J., Sauter-Louis, C., Henry, M.K., van Duijn, L., van Schaik, G., van Roon, A.M., Mercat, M., Madouasse, A., Fourichon, C., More, S.J., Graham, D.A., Frössling, J., Lindberg, A.L.E., Gethmann, J., Sauter-Louis, C., Gunn, G.J., Gomes, C., Nielen, M., Santman-Berends, I.M.G.A., 2018. STOC free: An innovative framework to compare probability of freedom from disease in heterogeneous control programmes, in: *InnovSur. Frontiers, Montpellier*, p. 133. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00133>
- Veldhuis, A., Brouwer-Middelesch, H., Marceau, A., Madouasse, A., Van der Stede, Y., Fourichon, C., Welby, S., Wever, P., van Schaik, G., 2016. Application of syndromic surveillance on routinely collected cattle reproduction and milk production data for the early detection of outbreaks of Bluetongue and Schmallenberg viruses. *Prev. Vet. Med.* 124, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2015.12.006>
- Wolfe, N.D., Dunavan, C.P., Diamond, J., 2007. Origins of major human infectious diseases. *Nature* 447, 279–283. <https://doi.org/10.1038/nature05775>

## 6. Liste détaillée des publications

Liste des publications dont je suis auteur ou co-auteur.

### 6.1 Publications originales dans des journaux à comité de lecture

1. Douglass A. P., O'Grady L., McGrath G., Tratalos J., Mee J. F., Barrett D., Sánchez-Miguel C., More S. J., Madouasse A., Green M., Madden J. M., McAloon C. G. 2022. Development of a syndromic surveillance system for Irish dairy cattle using milk recording data. *Preventive Veterinary Medicine*, 204:105667 [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2022.105667](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2022.105667).
2. Madouasse A., Mercat M., van Roon A., Graham D., Guelbenzu M., Santman Berends I., van Schaik G., Nielen M., Frössling J., Ågren E., Humphry R., Eze J., Gunn G., Henry M. K., Gethmann J., More S. J., Toft N., Fourichon C. 2022. A modelling framework for the prediction of the herd-level probability of infection from longitudinal data. *Peer Community Journal*, 2:e4. DOI: [10.24072/pcjournal.80](https://doi.org/10.24072/pcjournal.80).
3. Mercat M., van Roon A. M., Santman-Berends I., van Schaik G., Nielen M., Graham D., More S. J., Guelbenzu-Gonzalo M., Fourichon C., Madouasse A. 2022. Capacity of a Bayesian model to detect infected herds using disease dynamics and risk factor information from surveillance programmes: A simulation study. *Preventive Veterinary Medicine*, 200:105582 [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2022.105582](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2022.105582).
4. van Roon A. M., Madouasse A., Toft N., Santman-Berends I. M. G. A., Gethmann J., Eze J., Humphry R. W., Graham D., Guelbenzu-Gonzalo M., Nielen M., More S. J., Mercat M., Fourichon C., Sauter-Louis C., Frössling J., Ågren E., Gunn G. J., Henry M. K., van Schaik G. 2022. Output-based Assessment of Herd-level Freedom From Infection in Endemic Situations: Application of a Bayesian Hidden Markov Model. *Preventive Veterinary Medicine*, 204:105662 [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2022.105662](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2022.105662).
5. van Schaik G., Madouasse A., van Roon A., Frössling J., Gethmann J., Fourichon C., Mercat M., More S., Ågren E., Sauter-Louis C., Gunn G., Eze J., Humphry R., Henry M., Graham D., Guelbenzu M., Nielen M., Santman-Berends I. 2022. Comparison of the confidence in freedom from infection based on different control programmes between EU member states: STOC free. *EFSA Supporting Publications*, 19(4):7263<sup>E</sup>. DOI: [10.2903/sp.efsa.2022.EN-7263](https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2022.EN-7263).
6. Wongnak P., Jacquot M., Bord S., Agoulon A., Beugnet F., Bournez L., Cebe N., Chevalier A., Cosson J.-F., Dambrine N., Hoch T., Huard F., Korboulewsky N., Lebert I., Madouasse A., Marell A., Moutailler S., Plantard O., Pollet T., Poux V., René-Martellet M., Vayssier-Taussat M., Verheyden H., Vourc'h G., Chalvet-Monfray K. 2022. Meteorological and climatic variables predict the phenology of *Ixodes ricinus* nymphs activity in France, accounting for habitat heterogeneity. *Scientific Reports*, 12(1):7833 [IF21=4.996] DOI: [10.21203/rs.3.rs-1195681/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1195681/v1).
7. Hodnik J. J., Acinger-Rogić Ž., Alishani M., Autio T., Balseiro A., Berezowski J., Carmo L. P., Chaligiannis I., Conrady B., Costa L., Cvetkovikj I., Davidov I., Dispas M., Djadjovski I., Duarte E. L., Faverjon C., Fourichon C., Frössling J., Gerilovych A., Gethmann J., Gomes J., Graham D., Guelbenzu M., Gunn G. J., Henry M. K., Hopp P., Houe H., Irimia E., Ježek J., Juste R. A., Kalaitzakis E., Kaler J., Kaplan S., Kostoulas P., Kovalenko K., Knežević N., Knific T., Koleci X., Madouasse A., Malakauskas A., Mandelik R., Meletis E., Mincu M., Mötus K., Muñoz-Gómez V., Niculae M., Nikitović J., Ocepek M., Tangen-Opstal M., Ózsvári L., Papadopoulos D., Papadopoulos T., Pelkonen S., Polak M. P., Pozzato N., Rapaliutė E., Ribbens S., Niza-Ribeiro J., Roch F.-F., Rosenbaum Nielsen L., Saez J. L., Nielsen S. S., van Schaik G., Schwan E., Sekovska B., Starič J., Strain S., Šatran P., Šerić-Haračić S., Tamminen L.-M., Thulke H.-H., Toplak I., Tuunainen E., Verner S., Vilček Š., Yildiz R., Santman-Berends I. M. G. A. 2021. Overview of Cattle Diseases Listed Under Category C, D or E in the Animal Health Law for Which Control Programmes Are in Place Within Europe. *Frontiers in Veterinary Science*, 8(849) [IF21=3.471] DOI: [10.3389/fvets.2021.688078](https://doi.org/10.3389/fvets.2021.688078).

8. Rapaliute E., van Roon A., van Schaik G., Santman-Berends I., Koleci X., Mincu M., Gethmann J., Conrady B., Knific T., Hodnik J. J., Berezowski J., Carmo L. P., Madouasse A., Tarpai A., Gerilovych A., Malakauskas A., Sekovska B., Fourichon C., Kalaitzakis E., Roch F.-F., Houe H., Dudek K., Mötus K., Ózsvári L., Costa L., Guelbenzu-Gonzalo M., Henry M. K., Alishani M., Pozzato N., Hopp P., Juste R., Strain S., Mandelik R., Vilček Š., Autio T., Tamminen L.-M., Faverjon C. 2021. Existence and Quality of Data on Control Programs for EU Non-regulated Cattle Diseases: Consequences for Estimation and Comparison of the Probability of Freedom From Infection. *Frontiers in Veterinary Science*, 8(742):689375 [IF21=3.471] DOI: [10.3389/fvets.2021.689375](https://doi.org/10.3389/fvets.2021.689375).
9. Riaboff L., Relun A., Petiot C.-E., Feuilloy M., Couvreur S., Madouasse A. 2021. Identification of discriminating behavioural and movement variables in lameness scores of dairy cows at pasture from accelerometer and GPS sensors using a Partial Least Squares Discriminant Analysis. *Preventive Veterinary Medicine*, 193:105383 [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2021.105383](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2021.105383).
10. van Roon A. M., Rapaliute E., Koleci X., Muñoz V., Mercat M., Faverjon C., Santman-Berends I. M. G. A., Nielen M., More S. J., Graham D., Guelbenzu-Gonzalo M., Madouasse A., Fourichon C., van Schaik G. 2021. Key Learnings During the Development of a Generic Data Collection Tool to Support Assessment of Freedom of Infection in Cattle Herds. *Frontiers in Veterinary Science*, 8(395):656336 [IF21=3.471] DOI: [10.3389/fvets.2021.656336](https://doi.org/10.3389/fvets.2021.656336).
11. Costa L., Duarte E. L., Knific T., Hodnik J. J., van Roon A., Fourichon C., Koleci X., van Schaik G., Gunn G., Madouasse A., Berezowski J., Santman-Berends I. 2020. Standardizing output-based surveillance to control non-regulated cattle diseases: aspiring for a single general regulatory framework in the European Union. *Preventive Veterinary Medicine*, 183:105130 [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2020.105130](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2020.105130).
12. Riaboff L., Couvreur S., Madouasse A., Roig-Pons M., Aubin S., Massabie P., Chauvin A., Bédère N., Plantier G. 2020. Use of Predicted Behavior from Accelerometer Data Combined with GPS Data to Explore the Relationship between Dairy Cow Behavior and Pasture Characteristics. *Sensors*, 20(17):4741 [IF21=3.847] DOI: [10.3390/s20174741](https://doi.org/10.3390/s20174741).
13. Riaboff L., Poggi S., Madouasse A., Couvreur S., Aubin S., Bédère N., Goumand E., Chauvin A., Plantier G. 2020. Development of a methodological framework for a robust prediction of the main behaviours of dairy cows using a combination of machine learning algorithms on accelerometer data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169:105179 [IF21=6.757] DOI: [10.1016/j.compag.2019.105179](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105179).
14. van Roon A. M., Mercat M., van Schaik G., Nielen M., Graham D. A., More S. J., Guelbenzu-Gonzalo M., Fourichon C., Madouasse A., Santman-Berends I. M. G. A. 2020. Quantification of risk factors for bovine viral diarrhoea virus in cattle herds: A systematic search and meta-analysis of observational studies. *Journal of Dairy Science*, 103(10):9446-9463 [IF21=4.225] DOI: [10.3168/jds.2020-18193](https://doi.org/10.3168/jds.2020-18193).
15. van Roon A. M., Santman-Berends I. M. G. A., Graham D., More S. J., Nielen M., van Duijn L., Mercat M., Fourichon C., Madouasse A., Gethmann J., Sauter-Louis C., Frössling J., Lindberg A., Correia-Gomes C., Gunn G. J., Henry M. K., van Schaik G. 2020. A description and qualitative comparison of the elements of heterogeneous bovine viral diarrhoea control programs that influence confidence of freedom. *Journal of Dairy Science*, 103(5):4654-4671 [IF21=4.225] DOI: [10.3168/jds.2019-16915](https://doi.org/10.3168/jds.2019-16915).
16. Ariza J. M., Meignan T., Madouasse A., Beaudéau F., Bareille N. 2019. Effects in milk quantity and composition associated with extruded linseed supplementation to dairy cow diets. *Scientific Reports*, 9(1):17563 [IF21=4.996] DOI: [10.1038/s41598-019-54193-z](https://doi.org/10.1038/s41598-019-54193-z).
17. Meignan T., Madouasse A., Beaudéau F., Ariza J. M., Lechartier C., Bareille N. 2019. Does feeding extruded linseed to dairy cows improve reproductive performance in dairy herds? An observational study. *Theriogenology*, 125:293-301 [IF21=2.923] DOI: [10.1016/j.theriogenology.2018.11.020](https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.11.020).

18. Riaboff L., Aubin S., Bédère N., Couvreur S., Madouasse A., Goumand E., Chauvin A., Plantier G. 2019. Evaluation of pre-processing methods for the prediction of cattle behaviour from accelerometer data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165:104961 [IF21=6.757] DOI: [10.1016/j.compag.2019.104961](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104961).
19. Van Roon A. M., Santman-Berends I. M. G. A., Graham D., More S. J., Nielen M., Madouasse A., Mercat M., Fourichon C., Gethmann J., Frössling J., Lindberg A., Correia-Gomes C., Gunn G. J., Sauter-Louis C., Henry M. K., van Duijn L., van Schaik G. 2019. STOC Free: An Innovative Framework to Compare Probability of Freedom From Infection in Heterogeneous Control Programmes. *Frontiers in Veterinary Science*, 6:133 [IF21=3.471] DOI: [10.3389/fvets.2019.00133](https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00133).
20. Duval J. E., Bareille N., Madouasse A., de Joybert M., Sjöström K., Emanuelson U., Bonnet-Beaugrand F., Fourichon C. 2018. Evaluation of the impact of a Herd Health and Production Management programme in organic dairy cattle farms: a process evaluation approach. *Animal*, 12(7):1475-1483. [IF21=3.730] DOI: [10.1017/S1751731117002841](https://doi.org/10.1017/S1751731117002841).
21. Merlin A., Madouasse A., Ravinet N., Bareille N., Chauvin A., Chartier C. 2018. Mid-season targeted selective treatments based on flexible weight gain threshold for nematode control in dairy calves. *Animal*, 12(5) :1030-1040. [IF21=3.730] DOI: [10.1017/S1751731117002312](https://doi.org/10.1017/S1751731117002312).
22. Duval J. E., Bareille N., Fourichon C., Madouasse A., Vaarst M. 2017. How can veterinarians be interesting partners for organic dairy farmers? French farmers' point of views. *Preventive Veterinary Medicine*, 146:16-26. [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2017.07.013](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.07.013).
23. Krieger M., Sjöström K., Blanco-Penedo I., Madouasse A., Duval J. E., Bareille N., Fourichon C., Sundrum A., Emanuelson U. 2017. Prevalence of production disease related indicators in organic dairy herds in four European countries. *Livestock Science*, 198:104-108. [IF21=1.929] DOI: [10.1016/j.livsci.2017.02.015](https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.02.015).
24. Ravinet N., Lehébel A., Bareille N., Lopez C., Chartier C., Chauvin A., Madouasse A. 2017. Design and evaluation of multi-indicator profiles for targeted-selective treatment against gastrointestinal nematodes at housing in adult dairy cows. *Veterinary Parasitology*, 237:17-29. [IF21=2.821] DOI: [10.1016/j.vetpar.2017.03.001](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2017.03.001).
25. Sauter-Louis C., Jones B. A., Henning J., Stoll A., Nielen M., Van Schaik G., Smolenaars A., Schouten M., den Uijl I., Fourichon C., Guatteo R., Madouasse A., Nusinovi S., Deprez P., De Vliegher S., Laureyns J., Booth R., Cardwell J. M., Pfeiffer D. U. 2017. Herd-level animal management factors associated with the occurrence of bovine neonatal pancytopenia in calves in a multi-country study. *PLoS ONE*, 12(7):e0179878. [IF21=3.752] DOI : [10.1371/journal.pone.0179878](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179878).
26. Duval J. E., Bareille N., Fourichon C., Madouasse A., Vaarst M. 2016. Perceptions of French private veterinary practitioners' on their role in organic dairy farms and opportunities to improve their advisory services for organic dairy farmers. *Preventive Veterinary Medicine*, 133:10-21. [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2016.09.008](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.09.008).
27. Duval J. E., Fourichon C., Madouasse A., Sjöström K., Emanuelson U., Bareille N. 2016. A participatory approach to design monitoring indicators of production diseases in organic dairy farms. *Preventive Veterinary Medicine*, 128:12-22. [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2016.04.001](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.04.001).
28. Merlin A., Chauvin A., Madouasse A., Froger S., Bareille N., Chartier C. 2016. Explaining variability in first grazing season heifer growth combining individually measured parasitological and clinical indicators with exposure to gastrointestinal nematode infection based on grazing management practice. *Veterinary Parasitology*, 225:61-69. [IF21=2.821] DOI: [10.1016/j.vetpar.2016.05.006](https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2016.05.006).
29. Nusinovi S., Madouasse A., Fourichon C. 2016. Quantification of the increase in the frequency of early calving associated with late exposure to bluetongue virus serotype 8 in dairy cows: implications for syndromic surveillance. *Veterinary Research*, 47(1):18. [IF21=3.829] DOI: [10.1186/s13567-015-0296-7](https://doi.org/10.1186/s13567-015-0296-7).

30. Veldhuis A., Brouwer-Middelesch H., Marceau A., Madouasse A., Van der Stede Y., Fourichon C., Welby S., Wever P., van Schaik G. 2016. Application of syndromic surveillance on routinely collected cattle reproduction and milk production data for the early detection of outbreaks of Bluetongue and Schmallenberg viruses. *Preventive Veterinary Medicine*, 124:15-24. [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2015.12.006](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2015.12.006).
31. Bronner A., Morignat E., Hénau V., Madouasse A., Gay E., Calavas D., 2015. Devising an Indicator to Detect Mid-Term Abortions in Dairy Cattle: A First Step Towards Syndromic Surveillance of Abortive Diseases. *PLoS ONE*, 10(3):e0119012. [IF21=3.752] DOI: [10.1371/journal.pone.0119012](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119012).
32. Bronner A., Morignat E., Madouasse A., Gasqui P., Gay E., Calavas D. 2015. Utilisation des données d'insémination artificielle afin d'identifier l'impact d'un évènement abortif dans les élevages de bovins laitiers. *INRA Productions Animales*, 28(3):243-250. [IF21=0.904] DOI: [10.20870/productions-animales.2015.28.3.3029](https://doi.org/10.20870/productions-animales.2015.28.3.3029).
33. Nusinovici S., Madouasse A., Hoch T., Guatteo R., Beaudeau F. 2015. Evaluation of Two PCR Tests for *Coxiella burnetii* Detection in Dairy Cattle Farms Using Latent Class Analysis. *PLoS ONE*, 10(12):e0144608. [IF21=3.752] DOI: [10.1371/journal.pone.0144608](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144608).
34. Marceau A., Madouasse A., Lehébel A., van Schaik G., Veldhuis A., Van der Stede Y., Fourichon C. 2014. Can routinely recorded reproductive events be used as indicators of disease emergence in dairy cattle? An evaluation of 5 indicators during the emergence of bluetongue virus in France in 2007 and 2008. *Journal of Dairy Science*, 97(10):6135-6150 [IF21=4.225] DOI: [10.3168/jds.2013-7346](https://doi.org/10.3168/jds.2013-7346).
35. Madouasse A., Marceau A., Lehebel A., Brouwer-Middelesch H., van Schaik G., Van der Stede Y., Fourichon C. 2014. Use of monthly collected milk yields for the detection of the emergence of the 2007 French BTV epizootic. *Preventive Veterinary Medicine*, 113(4):484-491 [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2013.12.010](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2013.12.010).
36. Jones B. A., Sauter-Louis C., Henning J., Stoll A., Nielen M., Van Schaik G., Smolenaars A., Schouten M., Uijl I. d., Fourichon C., Guatteo R., Madouasse A., Nusinovici S., Deprez P., De Vliegher S., Laureyns J., Booth R., Cardwell J. M., Pfeiffer D. U. 2013. Calf-Level Factors Associated with Bovine Neonatal Pancytopenia – A Multi-Country Case-Control Study. *PLOS ONE*, 8(12):e80619 [IF21=3.752] DOI: [10.1371/journal.pone.0080619](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080619).
37. Madouasse A., Marceau A., Lehébel A., Brouwer-Middelesch H., Van Schaik G., Van der Stede Y., Fourichon C. 2013. Evaluation of a Continuous Indicator for Syndromic Surveillance through Simulation. Application to Vector Borne Disease Emergence Detection in Cattle Using Milk Yield. *PLoS ONE*, 8:e73726 [IF21=3.752] DOI: [10.1371/journal.pone.0073726](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073726).
38. Archer S. C., Green M. J., Madouasse A., Huxley J. N. 2011. Association between somatic cell count and serial locomotion score assessments in UK dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 94:4383-4388 [IF21=4.225] DOI: [10.3168/jds.2011-4276](https://doi.org/10.3168/jds.2011-4276).
39. Madouasse A., Browne, W.J., Huxley, J.N., Toni, F., Green, M.J., 2012. A semi-parametric model for lactation curves: Development and application. *Preventive Veterinary Medicine*, 105, 38–48. [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2012.02.009](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2012.02.009)
40. Madouasse A., Browne, W.J., Huxley, J.N., Toni, F., Bradley, A.J., Green, M.J., 2012. Risk factors for a high somatic cell count at the first milk recording in a large sample of UK dairy herds. *Journal of Dairy Science*, 95, 1873–84. [IF21=4.225] DOI: [10.3168/jds.2011-4801](https://doi.org/10.3168/jds.2011-4801)
41. Madouasse A., Huxley, J.N., Browne, W.J., Bradley, A.J., Green, M.J., 2010. Somatic cell count dynamics in a large sample of dairy herds in England and Wales. *Preventive Veterinary Medicine*, 96, 56–64. [IF21=3.372] DOI: [10.1016/j.prevetmed.2010.05.005](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2010.05.005)
42. Madouasse A., Huxley, J.N., Browne, W.J., Bradley, A.J., Dryden, I.L., Green, M.J., 2010. Use of individual cow milk recording data at the start of lactation to predict the calving to conception interval. *Journal of Dairy Science*, 93, 4677–4690. [IF21=4.225] DOI: [10.3168/jds.2010-3235](https://doi.org/10.3168/jds.2010-3235)



## 6.2 Publications de revue dans des journaux à comité de lecture

1. Riaboff L., Shalloo L., Smeaton A. F., Couvreur S., Madouasse A., Keane M. T. 2022. Predicting livestock behaviour using accelerometers: A systematic review of processing techniques for ruminant behaviour prediction from raw accelerometer data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192:106610 [IF21=6.757] DOI: [10.1016/j.compag.2021.106610](https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106610).

## 6.3 Publications effectuées dans le cadre de congrès internationaux

1. van Roon A., Santman-Berends I. G. M. A., Nielen M., Graham D. A., More S. J., Guelbenzu-Gonzalo M., Mercat M., Fourichon C., Madouasse A., Gethmann J., Sauter-Louis C., Frossling J., Agren E., Eze J. J., Van Schaik G. 2021. Confidence of freedom of infection with BVDV in several European countries: application of the STOC free model. In, *Society for Veterinary Epidemiology and Preventive Medicine (SVEPM)*, Toulouse, France, 2021/03/24-26.
2. Ariza J. M., Meignan T., Madouasse A., Chesneau G., Bareille N. 2019. Transgenerational benefits of extruded linseed supply to dairy cows on the reproductive performance. In, *70. Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP)*, Ghent, Belgium, 2019/08/26-30, 297.
3. Ravinet N., Brisseau N., Lehébel A., Quenet Y., Menudier N., Madouasse A., Chartier C., Chauvin A. 2019. Ostertagia Ostertagi Antibodies in Bulk Tank Milk in Autumn: Variability of the ELISA Results According to the Date of Sampling. In, *27. International Conference of the World Association for the Advancement of Veterinary Parasitology (WAAVP)*, Madison, Etats-Unis, 2019/07/07-11, 20.
4. Ravinet N., Lehébel A., Brisseau N., Quenet Y., Menudier N., Madouasse A., Chartier C., Chauvin A. 2019. Construction of a Decision Tree for Targeted-Selective Treatment of Dairy Cows Against Gastrointestinal Nematodes. In, *27. International Conference of the World Association for the Advancement of Veterinary Parasitology (WAAVP)*, Madison, Etats-Unis, 2019/07/07-11, 19.
5. Ravinet N., Lehébel A., Brisseau N., Quenet Y., Malard M. A., Madouasse A., Chartier C., Chauvin A. 2018. Targeted-Selective Treatment of Dairy Cows against Gastrointestinal Nematodes: a Stepwise Decision Making Strategy. In, *2. COMBAR Working Groups Meeting "Anthelmintic Resistance: Past, Present and Future"*, Leon, Spain, 2018/09/26-27, 37-38.
6. Riaboff L., Bedere N., Couvreur S., Aubin S., Goumand E., Magnier J., Madouasse A., Chauvin A., Plantier G. 2018. Influence of pasture characteristics and time of day on dairy cow behaviour predicted from GPS-data. In, *27. European Grassland Federation General Meeting Cork "Sustainable Meat and Milk Production from Grasslands"*, Cork, Irlande, 2018/06/17-21, 807-809.
7. Santman I., Fourichon C., Madouasse A., Mercat M., More S., Graham D., Gethmann J., Sauter-Louis C., Frossling J., Lindberg A., Gomes C., Gunn G., Henry M., Nielen M., Van Roon A., Van Duijn L., Van Schaik G. 2018. An innovative Surveillance analysis Tool for Outcome-based Comparison of FREEdom from infection in heterogeneous control programs. In, *15. Symposium of the International Society for Veterinary Epidemiology and Economics (ISVEE)*, Chiang Mai, Thailand, 2018/11/12-16, 270.
8. Tucoulet J., Henry P.-Y., Le Loc'h G., Madouasse A., Gourlay P. 2018. The Great Tit Parus major pox disease in France: evidence of emergence and spatio-temporal distributions from citizen science-based data. In, *13. European Wildlife Disease Association (EWDA) Conference*, Larissa, Thessaly, Greece, 2018/08/27-31.
9. van Roon A., Santman I., Graham D., More S., Nielen M., Van Duijn L., Mercat M., Fourichon C., Madouasse A., Gethmann J., Sauter-Louis C., Frossling J., Lindberg A., Gomes C., Gunn G., Henry M., Van Schaik G. 2018. Qualitative comparison of BVDV control programmes in Europe to substantiate freedom from infection. In, *15. Symposium of the International Society*

for *Veterinary Epidemiology and Economics (ISVEE)*, Chiang Mai, Thailand, 2018/11/12-16, 269.

10. Meignan T., Madouasse A., Chesneau G., Bareille N. 2017. Does feeding extruded linseed to dairy cows improve reproductive performance - an observational study. In, 68. *Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP)*, Tallinn, Estonie, 2017/08/28-2017/09/01, 455.
11. Duval J., Bareille N., Fourichon C., Madouasse A., Vaarst M. 2016. Perceptions of French private veterinary practitioners on their role in organic dairy farms. In, 67. *Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP)*, Belfast, Ireland, 2016/08/29-2016/09/02, 590.
12. Krieger M., Madouasse A., Sjostrom K., Emanuelson U., Blanco-Penedo I., Duval J. E., Bareille N., Fourichon C., Sundrum A. 2016. Prevalence of production diseases in organic dairy herds in Germany, Spain, France, and Sweden. In, 16. *International Conference on Production Diseases in Farm Animals (ICPD)*, Wageningen, The Netherlands, 2016/06/20-23, 181.
13. Duval J., Bareille N., Madouasse A., Fourichon C. 2015. Health surveillance in organic dairy farms: comparing indicators of farmers to those of scientists. In, 66. *Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (EAAP)*, Warsaw, Pologne, 2015/08/31-2015/09/04, 466.
14. Fourichon C., Nusinovici S., Madouasse A. 2015. Viral infection triggers calving: perspectives for surveillance of emerging diseases. In, 14. *Symposium of the International Society for Veterinary Epidemiology and Economics (ISVEE)*, Mérida, Yucatan, Mexique, 2015/11/03-07, 390.
15. Brouwer H., Veldhuis A., Madouasse A., Van Schaik G. 2013. Use of milk production data to improve Early Detection of vector borne Diseases. In, 64. *Annual Meeting of the European Association for Animal Production (EAAP)*, Nantes, France, 2013/08/26-30, 611.
16. Fourichon C., Marceau A., Lesuffleur T., Madouasse A., Lehébel A., Van der Stede Y., Van Schaik G. 2013. Surveillance of emerging diseases in cattle based on reproduction data. In, 64. *Annual Meeting of the European Association for Animal Production (EAAP)*, Nantes, France, 2013/08/26-30, 612.
17. Madouasse A., Lehébel A., Marceau A., Brouwer H., Fourichon C. 2013. Use of monthly collected milk yields for the early detection of vector-borne emerging diseases. In, 64. *Annual Meeting of the European Association for Animal Production (EAAP)*, Nantes, France, 2013/08/26-30, 611.
18. Marceau A., Madouasse A., Lehébel A., Lesuffleur T., Van der Stede Y., Van Schaik G., Fourichon C. 2013. Syndromic surveillance in dairy cattle: development of indicators and methods based on reproduction data for early detection of emerging diseases. In, *Society for Veterinary Epidemiology and Preventive Medicine (SVEPM)*, Madrid, Espagne, 115-124.
19. Ravinet N., Lehébel A., Madouasse A., Lopez C., Chartier C., Bareille N., Chauvin A. 2013. Selective treatment against gastrointestinal nematodes in dairy cows: towards an identification of a cow profile with improved milk production after treatment. In, *European Buiatrics Forum (EBF)*, Marseille, France, 59.
20. Madouasse A., Marceau A., Lehébel A., Peroz C., Fourichon C. 2012. Use of monthly collected milk yields for the detection of vector borne emerging diseases: a simulation based approach. In, 13. *Symposium of the International Society for Veterinary Epidemiology and Economics (ISVEE) Conference: Building Bridges - Crossing Borders*, Maastricht, The Netherlands, 2012/08/20-24, 24.
21. Pfeiffer D. U., Sauter-Louis C., Henning J., Stoll A., Nielen M., Schouten M., Van Schaik G., Smolenaars A., Fourichon C., Guatteo R., Madouasse A., Nusinovici S., Deprez P., De Vliegher S., Laureyns J., Booth R., Jones B., Cardwell J. 2012. A multi-country epidemiological investigation of Bovine Neonatal Pancytopenia (BNP). In, 13. *Symposium of the International*



#### 6.4 Publications didactiques

1. Madouasse A., 2022. STOCfree: prediction of probabilities of freedom from infection from longitudinal data. <https://github.com/AurMad/STOCfree>
2. Ravinet N., Barreto T., Chartier C., Madouasse A., Lehébel A., Brisseau N., Chauvin A. 2020. La DO lait de tank est-elle un bon outil de prédiction de l'impact de l'infestation par les strongles digestifs chez les vaches laitières ? *Bulletin des GTV*, (100):57-63.
3. Madouasse A., Nusinovici S., Monestiez P., Ezanno P., Lehébel A. 2016. Statistical methods in veterinary epidemiology. *Journal de la Société Française de Statistique*, 157(1):153-181.
4. Ravinet N., Lehébel A., Lopez C., Madouasse A., Brisseau N., Ponnau A., Chartier C., Bareille N., Chauvin A. 2015. Stratégie de traitement anthelminthique ciblé-sélectif : exemple chez la vache laitière adulte. *Bulletin des GTV*, (80):31-40.
5. Bronner A., Morignat E., Madouasse A., Calavas D. 2014. Surveiller les avortements chez les bovins à partir des données démographiques et de reproduction : un complément à la déclaration obligatoire ? *Bulletin Epidémiologique*, (65):6-11.
6. Marceau A., Madouasse A., Lehébel A., Nusinovici S., Fourichon C. 2012. Surveillance de l'émergence de maladies dans les troupeaux bovins laitiers : développement d'indicateurs de troubles de la reproduction. *Epidémiologie et Santé Animale*, 61:119-126.