



HAL
open science

Étude des freins épidémiologiques, économiques et sociologiques à l'éradication de la tuberculose bovine en France

Valentine Guétin-Poirier

► **To cite this version:**

Valentine Guétin-Poirier. Étude des freins épidémiologiques, économiques et sociologiques à l'éradication de la tuberculose bovine en France. Santé publique et épidémiologie. Université paris Est, 2020. Français. NNT : 2020PESC0079 . tel-04381316

HAL Id: tel-04381316

<https://enva.hal.science/tel-04381316v1>

Submitted on 9 Jan 2024

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

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



HAL
open science

Étude des freins épidémiologiques, économiques et sociologiques à l'éradication de la tuberculose bovine en France

Valentine Guétin-Poirier

► **To cite this version:**

Valentine Guétin-Poirier. Étude des freins épidémiologiques, économiques et sociologiques à l'éradication de la tuberculose bovine en France. Médecine humaine et pathologie. Université Paris-Est, 2020. Français. NNT : 2020PESC0079 . tel-03608159

HAL Id: tel-03608159

<https://theses.hal.science/tel-03608159>

Submitted on 14 Mar 2022

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.

UNIVERSITE PARIS-EST

ÉCOLE DOCTORALE de SANTÉ PUBLIQUE

Doctorat

Santé publique

Spécialité de doctorat : Épidémiologie

par

Valentine POIRIER

<p>ÉTUDE DES FREINS ÉPIDEMIOLOGIQUES, ÉCONOMIQUES ET SOCIOLOGIQUES À L'ÉRADICATION DE LA TUBERCULOSE BOVINE EN FRANCE</p>
--

Thèse dirigée par Barbara DUFOUR

Soutenue le 09 septembre 2020 à l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort

Jury :

Mme María-Laura Boschioli, Directeur de recherche	Présidente
Mme Nathalie Ruvoën, Professeur des Universités	Rapporteur
M. Pascal Hendrikx, Directeur de recherche	Rapporteur
Mme Florence Ménégaux, Chargée de recherche	Examinatrice
M. Jean-Philippe Amat, Chargé de recherche	Examineur
Mme Barbara Dufour, Professeur des Universités	Directrice de thèse

Invités :

Dr. Julie Rivière	Co-encadrante de thèse
DR. Sébastien Gardon	Co-encadrant de thèse

Remerciements

Un grand merci tout d'abord à **Barbara Dufour**, ma directrice de thèse, ainsi qu'à **Julie Rivière** et **Sébastien Gardon**, co-encadrants, qui m'ont donné l'opportunité de réaliser ce travail de recherche et m'ont aidé à le mener à terme. Merci pour vos relectures attentives des (très) nombreux documents dont je vous ai inondé en première partie de thèse, pour vos remarques et suggestions constructives, pour vos encouragements et votre bienveillance qui m'ont permis de mener cette thèse dans les meilleures conditions et qui ont rendu cette expérience autant agréable qu'enrichissante. Merci à **Barbara Dufour** et **Julie Rivière** pour m'avoir introduit au plaisir de l'enseignement.

Je remercie les membres de mon jury de thèse : **María-Laura Boschioli**, **Nathalie Ruvoën**, **Pascal Hendrikx**, **Florence Ménégaux** et **Jean-Philippe Amat** de s'être rendus disponibles pour la lecture de mon manuscrit ainsi que pour la soutenance.

Merci à la **DGAL** et à **l'Anses** pour le financement de ce travail.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui ont participé à ce projet. En particulier, **Fabrice Chevalier**, **Pierre Jabert** et **Maria-Laura Boschioli**, qui ont répondu à toutes mes questions sur la surveillance de la tuberculose bovine ; les **membres du comité de suivi de la tuberculose bovine**, les membres de **DDecPP**, **l'ADILVA**, les **directeurs de laboratoire**, directeurs ou présidents de **GDS**, présidents de **GTV**, **vétérinaires** pour avoir répondu ou diffusé les questionnaires nécessaires à ces travaux, les **étudiants de l'ENSV** pour leur étude sur les pratiques d'intradermotuberculation.

Mes remerciements vont également aux membres de l'équipe Epi/EpiMai qui m'ont chaleureusement accueillie. Merci à **Guillaume Crozet** d'abord pour ton apport à ce travail *via* ton stage de master puis pour les poses thé et les déjeuners tuperware et pour les échanges sur nos résultats de thèses. Merci à **Madiha Ben Khemis** et **Marthe Hujsa**. Merci à l'équipe Epi : **Benoît Durand**, **Maud Marsot**, **Gina Zanella**, **Laëtitia Canini**, **Hélène Ladreyt** et **Viviane Domarin**. Merci aussi à celles qui ont fini avant moi : **Malika Bouchez-Zacria** et **Noémie Courtejoie**.

Merci à toute **ma famille**.

À **mes parents et à mes sœurs**, c'est en m'appuyant sur notre noyau familial que j'ai pu arriver jusqu'ici.

À **mes grands-parents**, pour leur enthousiasme à me voir devenir « deux fois docteur ».

Merci à **mes amies et amis d'Alfort**, toujours présents pour rigoler, encourager ou donner des conseils avisés. Petite mention spéciale à **Anna-Charlotte** pour avoir eu la bonne idée de mener une thèse en même temps que moi.

Merci à **mes amies de la danse** pour ces moments d'évasion.

Merci **Benjamin** pour ta présence au quotidien et nos projets communs qui me poussent à toujours avancer.

VALORISATION DES TRAVAUX

VALORISATION DANS LES JOURNAUX DE RANG A

V. Poirier, J. Rivière, A. Bouveret, S. Gardon, and B. Dufour. 2019. Cost-effectiveness assessment of three components of the bovine tuberculosis surveillance system by intradermotuberculation in French cattle farms by a scenario tree approach. *Prev. Vet. Med.* **166**, 93-109.

V. Guétin-Poirier, G. Crozet, S. Gardon, B. Dufour and J. Rivière. 2019. Integrating data of veterinarians' practices in assessing the cost effectiveness of three components of the bovine tuberculosis surveillance system by intradermal tuberculin testing in French cattle farms through a scenario-tree approach. *Res. Vet. Sc.* **128**, 242-260.

V. Guétin-Poirier, J. Rivière and B. Dufour. 2020. Cost-effectiveness of two different protocols for animal tracing investigations of bovine tuberculosis outbreaks in France. *Prev. Vet. Med.* **175**, 104868.

V. Guétin-Poirier, J. Rivière, G. Crozet et B. Dufour. 2020. Assessment of the cost-effectiveness of alternative bovine tuberculosis surveillance protocols in French cattle farms using the mixed interferon gamma test. *Res. Vet. Sc.* (soumis)

AUTRES PUBLICATIONS

V. Poirier, J. Rivière, A. Praud, S. Gardon et B. Dufour. 2018. Méthode d'intégration de données sociologiques dans l'évaluation d'un dispositif de surveillance : exemple appliqué à la tuberculose bovine en élevage. *Epidemiol. Et sante anim.* **73**, 123-136.

COMMUNICATIONS ORALES LORS DE CONGRES INTERNATIONAUX

V. Poirier, J. Rivière, G. Crozet, S. Gardon and B. Dufour. 2018. Incorporating sociological data in scenario tree modelling: the example of the evaluation of the French bovine tuberculosis surveillance system. Congrès international ISVEE 15 12-17 Novembre 2018 (International Symposia on Veterinary Epidemiology and Economics), 12 November 2018, Chiang Mai, Thaïlande.

COMMUNICATIONS ORALES LORS DE CONGRES FRANCOPHONES

V. Poirier, J. Rivière, A. Praud, S. Gardon et B. Dufour. 2018. Méthode d'intégration de données sociologiques dans l'évaluation d'un dispositif de surveillance : exemple appliqué à la tuberculose bovine en élevage. Journées scientifiques de l'AEEMA, Maisons-Alfort, France, 30 mai au 1^{er} Juin 2018.

Résumé

En France, malgré les mesures de contrôle, l'incidence de la tuberculose bovine (TB) se rapproche de la limite permettant le maintien du statut officiellement indemne du pays, qui facilite les exportations de bovins vivants. Ce travail visait à identifier les freins épidémiologiques et socio-économiques à l'éradication de la TB en France, via l'évaluation coût-efficacité des composantes du dispositif de surveillance ante mortem (s.a.m.), et l'identification de protocoles de dépistage optimaux dans un contexte épidémiologique et socio-économique donné. Une modélisation stochastique par arbre de scénario a été utilisée pour évaluer les protocoles réglementaires des composantes de la s.a.m. (dépistage périodique, enquêtes épidémiologiques et dépistage aux mouvements), et les comparer en terme de coût-efficacité. Deux approches originales ont ensuite été utilisées : (i) la prise en compte de pratiques de terrain (réalisation des tests et perception de la surveillance) dans l'évaluation quantitative d'un système de surveillance, particulièrement importante pour la TB ; (ii) l'utilisation d'un outil d'aide à la décision multicritère permettant l'intégration de critères très différents pour faciliter et rationaliser la prise de décision dans un contexte multifactoriel. Ainsi, nous avons pu identifier les aspects de la s.a.m. à améliorer pour assurer son efficacité et sa pérennité (durée de blocage des élevages suspects, pratiques de l'intradermotuberculination comparative (IDC)). Nous avons mis en évidence l'intérêt d'un protocole de dépistage alternatif potentiellement plus acceptable, dans lequel l'IDC de recontrôle pratiquée dans les élevages suspects est remplacée par un test interféron gamma (antigène MIX). Des recommandations ont été proposées pour simplifier la s.a.m (arrêt du dépistage aux mouvements) et pour le choix des protocoles au meilleur équilibre coût/efficacité/acceptabilité.

Mots clés : surveillance, tuberculose bovine, coût-efficacité, arbre de scénario, aide à la décision multicritère, analyse socio-économique.

Abstract

Despite control measures, the incidence of bovine tuberculosis (bTB) in France is getting closer to the limit allowing the officially free status facilitating the export of living cattle. Our work aimed at identifying the epidemiological and socio-economical barriers to bTB eradication *via* the cost-effectiveness evaluation of the components of the *ante mortem* surveillance (*a.m.s*), and at identifying the screening protocols best fitting a given epidemiological and socio-economical context. Stochastic scenario tree modelling was used to evaluate the mandatory protocols of the three components of the *a.m.s* (periodic screening, epidemiological investigations and screening of the exchanged animals) and to compare them in terms of cost-effectiveness. Then, two novel approaches were used: (i) the consideration of field practices (tests realisation, perception of the surveillance) in the quantitative evaluation of a surveillance system, which is particularly important for bTB; (ii) the use of a multi-criteria decision aid tool that allows the integration of very different criteria to facilitate and rationalise decision making in a multifactorial context. Thus, we were able to identify the aspects of bTB *a.m.s* that need to be improved to ensure its efficiency and sustainability (lockdown's duration for a suspect herd, intradermal cervical comparative tuberculin testing (ICCT) practices). We underlined the potential interest of the use of alternative protocol improving surveillance's acceptability by replacing the ICCT used to recontrol animals of a suspect herd by interferon testing (antigen MIX). We produced recommendations on the simplification of the *a.m.s* system (stop screening exchanged animals) and on the choice of protocols with the best balance effectiveness/cost/acceptability.

Key words: surveillance, bovine tuberculosis, cost-effectiveness, scenario tree, multicriteria decision aid, socio-economic analysis.

Sommaire

REMERCIEMENTS	3
VALORISATION DES TRAVAUX	5
RÉSUMÉ	7
ABSTRACT	8
SOMMAIRE	9
INDEX DES TABLEAUX	13
INDEX DES FIGURES	16
INDEX DES ANNEXES	18
Liste des abréviations utilisées	21
INTRODUCTION	23
1^{ÈRE} PARTIE : ÉTAT DES LIEUX	25
CHAPITRE 1. LES MÉTHODES D'ÉVALUATION DES SYSTÈMES DE SURVEILLANCE EN SANTÉ ANIMALE	25
1.1. <i>Objectifs et enjeux de l'évaluation d'un système de surveillance en santé animale</i>	25
1.2. <i>Les attributs à évaluer</i>	26
1.3. <i>Évaluation de l'aspect technique d'un système de surveillance</i>	27
1.3.1. Les méthodes qualitatives et semi-quantitatives.....	27
1.3.2. Les méthodes quantitatives	29
1.4. <i>Évaluation de l'aspect économique d'un système de surveillance</i>	34
1.4.1. L'analyse de minimisation des coûts (AMC)	35
1.4.2. L'analyse coût-efficacité (ACE)	35
1.4.3. L'analyse coût-bénéfice (ACB)	35
1.4.4. L'analyse coût-utilité (ACU).....	36
1.5. <i>Évaluation des aspects humains d'un système de surveillance</i>	36
1.5.1. L'importance des aspects humains	36
1.5.2. La recherche en science sociale	37
1.6. <i>Évaluation intégrée des attributs d'un système de surveillance</i>	40
1.6.1. Les difficultés de l'évaluation des systèmes de surveillance en santé animale et la nécessité d'une prise en compte multicritère.....	40
1.6.2. Méthodes multicritères fondées sur l'efficacité de Pareto	40
1.6.3. Méthodes multicritères fondées sur la relation de surclassement (préférence)	40
1.7. <i>Conclusion du premier chapitre</i>	49
CHAPITRE 2. LA TUBERCULOSE BOVINE EN FRANCE : SITUATION ET ENJEUX.....	51
2.1. <i>La tuberculose bovine : généralités</i>	51
2.1.1. Étiologie.....	51
2.1.2. Physiopathologie de la tuberculose bovine.....	51
2.1.3. Dépistage et diagnostic	52
2.2. <i>La situation épidémiologique de la tuberculose bovine en France</i>	57
2.2.1. Historique.....	57
2.2.2. Situation actuelle	58
2.3. <i>L'organisation de la surveillance de la tuberculose bovine en France</i>	59
2.3.1. Définitions réglementaires.....	59
2.3.2. Les composantes de la surveillance de la tuberculose bovine en France	61
2.4. <i>Les enjeux de la surveillance de la tuberculose bovine</i>	64
2.4.1. Un enjeu de santé publique minime en France.....	64
2.4.2. Un enjeu économique fort	64
2.4.3. L'implication des acteurs compromise par les contraintes de la surveillance et ses difficultés de mise en œuvre	65
2.5. <i>Conclusion du deuxième chapitre</i>	67

2ÈME PARTIE : CONTRIBUTION PERSONNELLE	69
CHAPITRE 1. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE	69
CHAPITRE 2. ÉVALUATION COÛT-EFFICACITÉ DU DÉPISTAGE PÉRIODIQUE DE LA TUBERCULOSE EN ÉLEVAGE	71
2.1. <i>Objectifs spécifiques de l'évaluation</i>	71
2.2. <i>Matériel et méthode</i>	71
2.2.1. Construction et paramétrage des arbres de scénario	71
2.2.2. Estimation de la sensibilité troupeau de chaque protocole	79
2.2.3. Les coûts.....	79
2.2.4. Analyses	83
2.3. <i>Résultats</i>	83
2.3.1. Sensibilité troupeau du dépistage périodique de la TB	83
2.3.2. Coût total des protocoles de dépistage périodique de la TB.....	84
2.3.3. Répartition des coûts entre les éleveurs et l'État.....	84
2.3.4. Rapport coût-efficacité des protocoles de dépistage.....	85
2.3.5. Analyse de sensibilité	86
2.4. <i>Discussion</i>	86
2.4.1. Méthode utilisée	86
2.4.2. Résultats de l'évaluation	88
CHAPITRE 3. INTÉGRATION DE DONNÉES SUR LES PRATIQUES DES VS À L'ÉVALUATION DU DÉPISTAGE PÉRIODIQUE DE LA TB EN ÉLEVAGE	91
3.1. <i>Objectif spécifique de l'intégration de données sur les pratiques des VS</i>	91
3.2. <i>Matériel et méthode</i>	91
3.2.1. Une première étude qualitative pour identifier les facteurs ayant une influence potentielle sur les pratiques des VS	91
3.2.2. Une deuxième étude quantitative pour quantifier les pratiques d'ID et les facteurs les influençant.....	92
3.2.3. Transformation des résultats bruts de l'enquête quantitative en des variables quantitatives utilisables ..	93
3.2.4. Identification des facteurs influents à intégrer dans l'arbre de scénario	95
3.2.5. Intégration des facteurs influençant les pratiques dans l'arbre de scénario	96
3.2.6. Calculs et analyses.....	97
3.3. <i>Résultats</i>	97
3.3.1. Résultats de l'enquête qualitative.....	97
3.3.2. Identification des facteurs influençant les pratiques des VS à partir des résultats de l'enquête quantitative	98
3.3.3. Intégration des pratiques des VS dans les arbres de scénario	99
3.3.4. Sensibilité troupeau prenant en compte les pratiques du VS	101
3.3.5. Coût total des protocoles prenant en compte les pratiques des VS	102
3.3.6. Répartitions des coûts entre les éleveurs et l'État	103
3.3.7. Rapport coût-efficacité.....	104
3.3.8. Analyses de sensibilité.....	105
3.4. <i>Discussion</i>	107
3.4.1. Méthode utilisée	107
3.4.2. Résultats obtenus.....	109
3.4.3. Propositions opérationnelles	112
CHAPITRE 4. ÉVALUATION COÛT-EFFICACITÉ DE PROTOCOLES ALTERNATIFS	115
4.1. <i>Objectifs spécifiques</i>	115
4.2. <i>Matériel et méthode</i>	115
4.3. <i>Résultats</i>	115
4.3.1. Sensibilité troupeau des protocoles alternatifs.....	115
4.3.2. Coût total des protocoles alternatifs.....	117
4.3.3. Répartition des coûts entre l'État et l'éleveur.....	117
4.3.4. Rapport coût-efficacité des protocoles alternatifs.....	118
4.3.5. Analyse de sensibilité	119
4.4. <i>Discussion</i>	120
4.4.1. Estimations obtenues pour les protocoles de dépistage alternatifs	120
4.4.2. Recommandations opérationnelles	122
CHAPITRE 5. ÉVALUATION COÛT-EFFICACITÉ DE L'INVESTIGATION DES LIENS ÉPIDÉMIOLOGIQUES.....	125
5.1. <i>Objectif spécifique de l'évaluation</i>	125
5.2. <i>Matériel et méthode</i>	125

5.3.	<i>Résultats</i>	127
5.3.1.	Sensibilité troupeau de l'investigation des liens épidémiologiques.....	127
5.3.2.	Coût total et répartition des coûts de l'investigation des liens épidémiologiques	128
5.3.3.	Rapport coût-efficacité de l'investigation des liens épidémiologiques	129
5.3.4.	Analyse de sensibilité	129
5.4.	<i>Discussion</i>	130
5.4.1.	Méthode utilisée	130
5.4.2.	Résultats de l'évaluation	131
CHAPITRE 6.	ÉVALUATION COÛT-EFFICACITÉ DU DÉPISTAGE LORS DES MOUVEMENTS D'ANIMAUX.....	133
6.1.	<i>Objectif spécifique d'évaluation du dépistage lors des mouvements d'animaux</i>	133
6.2.	<i>Matériel et méthode</i>	133
6.3.	<i>Résultats</i>	135
6.3.1.	Sensibilité troupeau du dépistage aux mouvements	135
6.3.2.	Coûts du dépistage aux mouvements	135
6.3.3.	Rapport coût-efficacité du dépistage aux mouvements	136
6.3.4.	Analyse de sensibilité	137
6.4.	<i>Discussion</i>	137
6.4.1.	Méthode utilisée	137
6.4.2.	Résultats de l'évaluation	138
CHAPITRE 7.	ÉVALUATION DE LA SENSIBILITÉ GLOBALE DE LA SURVEILLANCE ANTE-MORTEM DE LA TUBERCULOSE BOVINE.....	141
7.1.	<i>Objectif spécifique de l'évaluation globale de la surveillance ante mortem</i>	141
7.2.	<i>Matériel et méthode</i>	141
7.2.1.	Nœuds de catégorie	141
7.2.2.	Probabilité d'infection.....	145
7.2.3.	Dépistage périodique en élevage	145
7.2.4.	Enquêtes épidémiologiques	146
7.2.5.	Dépistage aux mouvements	147
7.2.6.	Coûts	147
7.2.7.	Calculs	148
7.3.	<i>Résultats</i>	148
7.3.1.	Efficacité du dispositif de surveillance <i>ante mortem</i> de la TB.....	148
7.3.2.	Part de chaque composante dans la sensibilité globale du dispositif de surveillance <i>ante mortem</i>	150
7.3.3.	Coût total moyen de la surveillance <i>ante mortem</i>	151
7.4.	<i>Discussion</i>	152
7.4.1.	Matériel et méthode utilisée.....	152
7.4.2.	Résultats de l'évaluation	154
CHAPITRE 8.	CONSTRUCTION D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION MULTICRITÈRE APPLIQUÉ AU CHOIX D'UN PROTOCOLE DE SURVEILLANCE PAR DÉPISTAGE PÉRIODIQUE	159
8.1.	<i>Objectif spécifique</i>	159
8.2.	<i>Matériel et méthode</i>	159
8.2.1.	Protocoles comparés.....	159
8.2.2.	Identification des critères de comparaison	159
8.2.3.	Méthode utilisée pour la comparaison multicritère des protocoles	160
8.3.	<i>Résultats</i>	164
8.3.1.	Seuils d'indifférence et de préférence	164
8.3.2.	Poids des critères	165
8.3.3.	Classement final des protocoles de surveillance obtenu en fonction du département interrogé	165
8.3.4.	Analyse de sensibilité	166
8.4.	<i>Discussion</i>	168
8.4.1.	Méthode utilisée	168
8.4.2.	Résultats obtenus.....	170
CHAPITRE 9.	DISCUSSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES DE LA THÈSE.....	173
9.1.	<i>Les principales limites de ce travail</i>	173
9.2.	<i>Optimisation de la surveillance ante mortem</i>	175
9.2.1.	Amélioration de la compréhension des interactions entre les freins épidémiologiques, économiques et sociaux	175
9.2.2.	Amélioration des protocoles de surveillance	175
9.2.3.	Amélioration du système de surveillance <i>ante mortem</i>	176

9.3.	<i>Apports méthodologiques</i>	177
9.3.1.	Prise en compte des pratiques de terrain dans la modélisation par arbre de scénario	177
9.3.2.	Adaptation d'un outil d'aide à la décision multicritère	178
9.4.	<i>Perspectives</i>	180
9.4.1.	Améliorer le modèle et les méthodes utilisées	180
9.4.2.	Compléter l'évaluation de la surveillance de la TB.....	180
9.4.3.	Évaluer des systèmes de surveillance alternatifs	181
9.4.4.	Investiguer d'autres aspects du contrôle de la TB.....	182
9.4.5.	Appliquer les méthodes à d'autres problèmes de santé animale	184
CONCLUSION		185
RÉFÉRENCES		187
ANNEXES		203

Index des tableaux

Tableau 1. Résumé du paradigme de Churchill pour le développement d'un outil de mesure en sciences sociales (Churchill, 1979)	38
Tableau 2. Exemple de matrice de priorité entre trois critères C1, C2 et C3.....	42
Tableau 3. Calcul des poids normalisés des trois critères de l'exemple présenté dans le Tableau 2	42
Tableau 4 : Interprétation de la lecture quantitative des résultats de l'IDS (note de service DGAL/SDSPA/2015-803)	53
Tableau 5: Grille d'interprétation des résultats d'une IDC (note de service DGAL/SDSPA/2015-803)	54
Tableau 6 : Caractéristiques moyennes des tests IDS et IDC estimées dans la littérature scientifique ; coût et temps de réalisation de ces tests dans les conditions françaises	54
Tableau 7. Synthèse des définitions sanitaires des statuts indemne, suspect, susceptible et infecté pour un troupeau de bovins (AM du 15 Septembre 2003, articles 6, 12 et 13)	60
Tableau 8. Synthèse des définitions sanitaires des statuts indemne, suspect, susceptible et infecté pour un bovin (AM du 15 Septembre 2003, articles 12 et 13).....	60
Tableau 9. Valeurs des paramètres des lois de distribution utilisées pour modéliser la sensibilité et la spécificité de l'IDC, estimées à partir d'études publiées.....	76
Tableau 10. Lois de distribution utilisées pour modéliser la probabilité d'occurrence de chaque résultat possible (positif, négatif ou non conclusif) du test de dosage de l'interféron gamma (IFN γ), estimées à partir des résultats de l'étude de Praud et Dufour, 2016 réalisée dans les conditions de terrain françaises.....	76
Tableau 11. Lois de distribution normales asymétriques N(m,s,t) utilisées pour représenter, en fonction de la présence de lésions évocatrices de TB, la probabilité d'occurrence de chaque résultat possible pour les tests réalisés au LNR et dont les paramètres ont été estimés d'après Courcou et Boschioli (2013).....	78
Tableau 12. Lois de distributions utilisées pour modéliser la taille des troupeaux (en nombre d'animaux présents) par type de troupeau (type de production, taille et taux de rotation du troupeau) ; paramètres estimés d'après les données de 2016 de la BDNI.....	78
Tableau 13. Données sur les prix des tests de laboratoires réalisés dans le cadre de la surveillance de la TB obtenues grâce au questionnaire adressé aux LDA et lois de distribution utilisées dans les arbres de scénario pour modéliser le coût de chaque test	80
Tableau 14. Lois de distribution utilisées pour modéliser les coûts indirects de blocage de l'élevage (en euros par jour par animal) pour chaque type d'animal de chaque type de production (paramètres fixés d'après les résultats de Buczinski et Reuillon en 2015, décrits en annexe 7)	81
Tableau 15. Lois de distribution utilisées pour modéliser l'intervalle (en jour) entre chaque étape du protocole pour chaque protocole étudié (source : SIGAL)	82
Tableau 16. Sensibilité troupeau moyenne (en %) (moyenne [IC _{95%}]) des trois protocoles réglementaires étudiés (10 000 itérations) estimée pour chaque type de troupeau	83
Tableau 17. Coût total moyen (moyenne [IC _{95%}]) de chaque protocole estimé par arbres de scénario pour chaque type de troupeau soumis au dépistage périodique (en €/troupeau)	84
Tableau 18. Proportion du coût total moyen pris en charge par l'éleveur pour chaque type de troupeau et pour chaque protocole (en pourcentage du coût total moyen estimé)	85
Tableau 19. Points attribués aux VS pour calculer le score de réalisation de l'acte d'intradermo-tuberculination en fonction de leurs réponses au questionnaire en ligne (Crozet <i>et al.</i> , 2019)	93
Tableau 20. Points attribués aux VS, d'après leurs réponses au questionnaire en ligne, pour calculer leur score de perception du programme de surveillance et de lutte contre la TB	95
Tableau 21. Méthode utilisée dans les arbres de scénario pour calculer la sensibilité (Se) et la spécificité (Sp) de l'IDC, utilisées en fonction de la valeur du score de réalisation de l'IDC	96
Tableau 22. Résultats de la régression linéaire multivariée expliquant le score de réalisation de l'IDC	98
Tableau 23. Résultats de la régression linéaire multivariée expliquant le score de réalisation de l'IDC par le score de perception	98
Tableau 24. Résultats de la régression linéaire multivariée expliquant le score de perception	99
Tableau 25. Résultats de la régression logistique multivariée expliquant la déclaration des résultats d'IDC non-négatifs.....	99
Tableau 26. Moyenne et écart type du score de perception des VS dans les données en fonction de l'âge du VS, du nombre de personnes généralement présentes pour l'aider à la contention et de la fréquence des	

cornadis dans les élevages de sa clientèle ; et paramètres des lois bêtas utilisées pour modéliser ce score	100
Tableau 27. Sensibilité troupeau moyenne (en %) (moyenne [IC _{95%}]) des trois protocoles réglementaires étudiés, estimée pour chaque type de troupeau en prenant en compte les pratiques des VS	101
Tableau 28. Impact de la prise en compte des pratiques d'IDC et des habitudes de déclaration des résultats non-négatifs sur l'estimation de la sensibilité troupeau des protocoles	102
Tableau 29. Coût total moyen (moyenne [IC _{95%}]) de chaque protocole de dépistage estimé par type de troupeau, pour un troupeau soumis au dépistage périodique (en euros par troupeau), en prenant en compte les pratiques des VS	103
Tableau 30. Impact de la prise en compte des pratiques d'IDC et des habitudes de déclaration des résultats non-négatifs sur l'estimation du coût moyen des protocoles.....	103
Tableau 31. Proportion du coût total moyen pris en charge par l'éleveur pour chaque type de troupeau et pour chaque protocole de dépistage (en pourcentage du coût total moyen estimé).....	104
Tableau 32. Estimation de sensibilité troupeau (en %) (moyenne [IC _{95%}]) pour chaque protocole alternatif par type de troupeau.....	116
Tableau 33. Différence (en %), par type de troupeau, entre les sensibilités troupeau moyennes estimées pour les protocoles alternatifs et les sensibilités troupeau moyennes estimées pour les protocoles réglementaires correspondants	116
Tableau 34. Coût total (moyenne [IC _{95%}]) des protocoles alternatifs par type de troupeau (en €/troupeau) ...	117
Tableau 35. Coûts moyens pour l'État et pour l'élevage des protocoles alternatifs par type de troupeau, pour un troupeau soumis au dépistage (en € / troupeau), en prenant en compte les pratiques des VS.....	118
Tableau 36. Proportion (en %) du coût total moyen pris en charge par l'éleveur pour chaque protocole alternatif (en pourcentage du coût total moyen estimé).....	118
Tableau 37. Paramètres des lois normales utilisées pour modéliser la probabilité que l'animal en lien soit absent ou présent dans l'élevage au moment de l'investigation du lien épidémiologique	127
Tableau 38. Sensibilité troupeau (en %) (moyenne [IC _{95%}]) estimée par type de troupeau via la modélisation par arbre de scénario pour les deux protocoles réglementaires d'investigation d'un élevage en lien aval	128
Tableau 39. Coût total (moyenne [IC _{95%}]) (en euros par troupeau investigué) estimé par la modélisation par arbre de scénario pour les deux protocoles réglementaires d'investigation d'un élevage en lien aval par type de troupeau.....	128
Tableau 40. Coût moyen pour l'État et pour le monde de l'élevage (en euros) des protocoles d'investigation des liens épidémiologique avals, estimés par la méthode des arbres de scénario	129
Tableau 41. Paramètres des lois Béta utilisées pour modéliser le score de perception des VS pratiquant l'IDS en fonction de leur catégorie d'âge	134
Tableau 42. Paramètres des lois Normales utilisées pour modéliser la probabilité pour un animal d'être vendu au cours de l'année dans le département du Cantal.....	135
Tableau 43. Résultat de la sensibilité troupeau (moyenne [IC _{95%}]) du dépistage des animaux lors de leur mouvement par IDS ou par IDC, en prenant en compte ou non les adaptations de pratiques des VS.....	135
Tableau 44. Résultat du coût total moyen (en euros/troupeau) (moyenne [IC _{95%}]) du dépistage des animaux lors de leur mouvement par IDS ou par IDC, en fonction des pratiques des VS	136
Tableau 45. Coûts moyens pour l'éleveur (en euros/troupeau) (moyenne [IC _{95%}]) du dépistage des animaux lors de leur mouvement par IDS ou par IDC, en fonction des pratiques des VS	136
Tableau 46. Calcul du risque relatif d'infection par la TB de chaque catégorie d'élevage, utilisé dans l'arbre de scénario modélisant la surveillance ante mortem de la TB dans un élevage.....	144
Tableau 47. Bilan des paramètres surestimés et sous-estimés	154
Tableau 48. Critères sélectionnés pour réaliser une comparaison multicritère des protocoles de dépistage périodique, suite à l'avis des membre du groupe de suivi TB	160
Tableau 49. Note attribuée aux tests de dépistage en fonction du positionnement de l'acteur interrogé sur l'échelle de Likert	161
Tableau 50. Acteurs interrogés afin de définir les seuils de préférence et d'indifférence de chaque critère	162
Tableau 51. Valeur prise par l'indice de crédibilité partiel $\sigma_k(a_i, a_j)$ en fonction de la différence de la valeur du critère c_k dans les deux protocoles a_i et a_j comparés ($g_k(a_i) - g_k(a_j)$).....	163
Tableau 52. Seuils d'indifférence et de préférence de chaque critère définis avec les acteurs pour chacun des départements étudiés	164

Tableau 53. Poids des critères attribués par des chefs de service adjoint santé animale des DDPP des départements interrogés par la méthode de Rogers et Bruen (1997) pour le choix d'un protocole de dépistage périodique de la TB en élevage.....	165
Tableau 54. Valeurs fixées et leur intervalle de validité pour les paramètres de l'analyse multicritère (poids, seuil d'indifférence (q), seuil de préférence (p)), par département	167

Index des figures

Figure 1. Diagramme de Venn représentant les individus détectés par les deux protocoles parmi l'ensemble des individus infectés (Vergne <i>et al.</i> , 2015)	30
Figure 2. Représentation schématique d'un arbre de scénario simple.....	32
Figure 3. Échelle de Saaty définissant cinq catégories permettant d'associer un ratio à chaque comparaison par paire des critères (Saaty, 1986).....	42
Figure 4. Schéma de la relation de préférence entre les alternatives a_1 et a_2 selon un critère à maximiser au sens strict c_i avec un seuil de préférence p , en fonction de la différence de valeur du critère entre les alternatives a_1 et a_2 ($g_i(a_1)-g_i(a_2)$).....	44
Figure 5. Schéma de la relation de préférence entre les alternatives a_1 et a_2 selon un quasi-critère à maximiser c_i avec un seuil d'indifférence q , en fonction de la différence de valeur du critère entre les alternatives a_1 et a_2 ($g_i(a_1)-g_i(a_2)$).....	44
Figure 6. Schéma de la relation de préférence entre les alternatives a_1 et a_2 selon un pseudo-critère à maximiser c_i avec un seuil d'indifférence q et un seuil de préférence faible p , en fonction de la différence de valeur du critère entre les alternatives a_1 et a_2 ($g_i(a_1)-g_i(a_2)$)	44
Figure 7. Photographie d'un granulome tuberculeux sur le poumon d'une chèvre d'après Domingo et al., 2014.	51
Figure 8. Diagramme décisionnel permettant d'obtenir le résultat de l'abattage diagnostique en fonction des résultats des analyses de laboratoire	56
Figure 9. Évolution de l'incidence et de la prévalence annuelles de la TB en France de 1995 à 2018 (Dufour et Durand, 2020).....	58
Figure 10. Communes présentant des foyers incidents de tuberculose bovine en 2017 (95 foyers) (Saidou, 2018).	58
Figure 11. Rythmes de dépistage pour la surveillance programmée de la tuberculose bovine de chaque département français entre 2015 et 2017 (Delavenne <i>et al.</i> , 2019).....	61
Figure 12. Schéma du protocole « triage IFN » utilisé pour investiguer une suspicion faible dans un élevage (note de service DGAL/SDSPA/2016-1001)	62
Figure 13. Arbre de scénario utilisé pour modéliser le protocole de dépistage "abattage seul"	72
Figure 14. Arbre de scénario utilisé pour modéliser le protocole "abattage-recontrôle IDC"	73
Figure 15. Arbre de scénario utilisé pour modéliser le protocole de dépistage « triage IFN ».....	73
Figure 16. Arbre de scénario représentant l'abattage diagnostique d'un animal, composante commune à tous les protocoles étudiés	77
Figure 17. Rapport coût-efficacité des protocoles réglementaires de dépistage périodique en élevage de la TB, par type de troupeau	85
Figure 18. Analyse de sensibilité pour la sortie "sensibilité troupeau" par type de troupeau et par protocole (indice de Mc Klay supérieurs à 10 %).....	87
Figure 19. Analyse de sensibilité pour la sortie "coût total" par type de troupeau et par protocole (indice de Mc Klay supérieurs à 10 %)	87
Figure 20. Arbre de scénario représentant le protocole réglementaire de dépistage de la TB en élevage « abattage seul »	100
Figure 21. Rapport coût-efficacité moyen des trois protocoles de dépistage réglementaires en fonction du type d'élevage (10 000 itérations, pratiques des VS prises en compte)	105
Figure 22. Analyse de sensibilité pour la sortie "sensibilité troupeau" par type de troupeau et par protocole (indices de Mc Klay supérieurs à 10 %)	106
Figure 23. Analyse de sensibilité pour la sortie "coût total" par type de troupeau et par protocole (indices de Mc Klay supérieurs à 10 %)	106
Figure 24. Rapport coût-efficacité moyen des trois protocoles réglementaires de dépistage de la TB et des deux protocoles alternatifs par type de troupeau	119
Figure 25. Analyse de sensibilité pour la sortie "sensibilité troupeau" par type de troupeau et par protocole alternatif (indices de McKlay supérieurs à 10 %)	120
Figure 26. RCE moyen du protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX » en fonction du RCE moyen du protocole réglementaire « abattage-recontrôle IDC » pour chaque type de troupeau.....	121

Figure 27. Localisation des LDA pour l'histologie, la PCR et la culture ou le test IFN γ et rythme de dépistage des départements en 2016	123
Figure 28. Arbre de scénario utilisé pour modéliser l'investigation dans un élevage en lien aval avec un foyer de TB.....	126
Figure 29. Rapport coût-efficacité moyen des deux protocoles réglementaires d'investigation des liens épidémiologiques avals	129
Figure 30. Analyse de sensibilité pour la sortie "sensibilité troupeau" des arbres de scénario modélisant les deux protocoles d'investigation des élevages en lien aval avec un foyer de TB (indice de Mc Kay > 10 %)	130
Figure 31. Analyse de sensibilité pour la sortie "coût total" des arbres de scénario modélisant les deux protocoles d'investigation des élevages en lien aval avec un foyer de TB (indice de Mc Kay > 10 %).....	130
Figure 32. Rapport coût-efficacité du dépistage lors des mouvements d'animaux par IDC ou par IDS en prenant ou non en compte les adaptations de pratiques des VS	137
Figure 33. Arbre de scénario utilisé pour modéliser la surveillance ante mortem sur un an dans un élevage ..	142
Figure 34. Estimation de la probabilité de détecter, via la surveillance ante mortem, au moins un élevage infecté dans les départements français pour une prévalence limite fixée en fonction du nombre de foyers recensés entre 2011 et 2016.....	149
Figure 35. Estimation de la probabilité de détecter, via la surveillance ante mortem, au moins un élevage infecté dans les départements français pour une prévalence limite fixée à 0,1 %	149
Figure 36. Probabilité qu'un élevage infecté soit détecté pour une prévalence limite fixée à 0,1 %.....	149
Figure 37. Proportion d'élevages soumis au dépistage périodique chaque année tel que modélisé dans l'arbre de scénario et code insee des départements.....	150
Figure 38. Part de chaque composante de surveillance dans la probabilité de détecter l'infection, pour une prévalence limite de 0,1 % pour les départements non infectés récemment et pour lesquels cette probabilité est supérieure à 25 %	151
Figure 39. Part de chaque composante dans la probabilité pour un élevage infecté d'être détecté, dans les départements avec une prévalence fixée à 0,6 % dans le modèle	151
Figure 40. Coût annuel moyen de la surveillance ante mortem de la TB en euros/troupeau	151
Figure 41. Foyers détectés pendant l'année 2016 et composante du système de surveillance ayant permis leur détection (d'après les données SIGAL).....	155
Figure 42. Probabilité moyenne pour un élevage d'être en lien épidémiologique aval avec un foyer de TB, utilisée dans l'arbre de scénario.....	156
Figure 43. Nombre d'élevages bovins enregistrés dans la BDNI au 1 ^{er} Janvier 2016.....	156
Figure 44. Résultats du classement multicritère des protocoles étudiés pour chaque département, selon les méthodes PROMETHEE I et II	166

Index des annexes

Annexe 1. Schéma de l'algorithme permettant l'estimation des valeurs minimale et maximale que peuvent prendre un paramètre donné de l'analyse multicritère sans modifier le résultat de l'analyse (Mouine, 2011)	203
Annexe 2. Protocole de réalisation et interprétation du test de dosage de l'interféron gamma pour dépister la tuberculose bovine (adapté de Poirier, 2017).....	204
Annexe 3. Paramètres des lois de distributions utilisées pour décrire la proportion d'animaux adultes et de jeunes en fonction du type de troupeau (type de production, taille et taux de rotation), estimés à partir des données des élevages du Cantal (15)	207
Annexe 4. Description de la loi de distribution normale (Sicard, 2013)	207
Annexe 5. Calcul de la proportion d'animaux présentant des lésions détectables et évocatrices de TB en fonction du statut infectieux de l'animal	208
Annexe 6. Covariance de sensibilité et de spécificité de deux tests dépendants utilisés en parallèle (Gardner <i>et al.</i> , 2000).....	209
Annexe 7. Résultats de l'estimation des coûts journaliers d'entretien des différents types d'animaux en fonction du type de production (Buczinski et Reuillon, 2015) (tableau A) et méthode utilisée pour regrouper certains de ces résultats en des catégories de type d'animaux plus larges.	209
Annexe 8. Moyenne (tableau A) et écart type (tableau B) des lois de distribution normales s'ajustant le mieux au nombre de chaque type d'animal vendu chaque mois de l'année 2016 en France pour chaque type de troupeau (source: BDNI).....	210
Annexe 9. Coût moyen pour l'État et pour l'élevage de chaque protocole estimé par la méthode des arbres de scénario pour chaque type de troupeau, pour un troupeau suspect jusqu'à confirmation ou infirmation de la suspicion (en euros par troupeau).....	213
Annexe 10. Départements sélectionnés pour l'enquête qualitative des pratiques d'ID des VS et leurs caractéristiques (Gully <i>et al.</i> , 2018).....	214
Annexe 11. Résultats des régressions linéaires simples expliquant le score de réalisation de l'IDC (n=115)	214
Annexe 12. Résultats des régressions linéaires simples expliquant le score de perception.....	215
Annexe 13. Résultats de la régression logistique expliquant le score de perception par l'âge du VS, le nombre de personnes en général présentes pour aider à la contention des animaux et la fréquence des cornadis dans sa clientèle.....	215
Annexe 14. Résultats des régressions logistiques simples avec comme variable à expliquer le nombre de personnes présentes le plus souvent pour aider à la contention	216
Annexe 15. Résultats de la régression logistique multivariée expliquant la variable « aide à la contention ».....	216
Annexe 16. Résultat des régressions logistiques univariées expliquant la fréquence des cornadis dans la clientèle du VS.....	216
Annexe 17. Arbre de scénario représentant le protocole réglementaire de dépistage de la TB en élevage « abattage-recontrôle IDC » et prenant en compte les pratiques des VS	217
Annexe 18. Arbre de scénario représentant le protocole réglementaire de dépistage de la TB en élevage « Triage IFN » et prenant en compte les pratiques des VS	218
Annexe 19. Paramètres des lois de distribution bêta utilisées pour modéliser la probabilité que le VS déclare un résultat non-négatif à l'IDC en fonction des catégories de score de perception	218
Annexe 20. Coût moyen pour l'État et pour l'élevage de chaque protocole estimé par la méthode des arbres de scénario pour chaque type de troupeau pour un troupeau suspect jusqu'à confirmation ou infirmation de la suspicion (en euros par troupeau), en prenant en compte les pratiques des VS.....	219
Annexe 21. Évolution du pourcentage de diminution de la sensibilité troupeau de deux protocoles : l'un utilisant un seul test, et l'autre utilisant ce même test deux fois en parallèle, en fonction du nombre d'animaux infectés avec une sensibilité initiale du test de 80 % qui est altérée pour ne valoir plus que 60 %	220
Annexe 22. Arbre de scénario représentant le protocole « abattage-recontrôle IFNMIX », alternatif au protocole « abattage-recontrôle IDC ».....	221
Annexe 22. Arbre de scénario représentant le protocole « confirmation IFNMIX », alternatif au protocole « triage IFN »	222

Annexe 23. Analyse de sensibilité pour la sortie "coût total" par type de troupeau et par protocole alternatif (indices de McKay supérieurs à 10 %)	223
Annexe 25. Moyenne et écart type des sensibilités troupeau du protocole « abattage-recontrôle IDC » lorsqu'il est utilisé dans les protocoles d'investigation des liens aval, estimés en fonction de la présence de l'animal en lien dans l'élevage investigué et grâce à l'arbre de scénario décrit au chapitre 2 de la partie II.	223
Annexe 26. Analyse de sensibilité de la sortie "sensibilité troupeau" des arbres de scénario modélisant le dépistage lors des mouvements d'animaux par IDC (indices de McKay supérieurs à 10 %).....	224
Annexe 27. Analyse de sensibilité de la sortie « coût total dans un élevage infecté" des arbres de scénario modélisant le dépistage lors des mouvements d'animaux par IDC (indices de McKay supérieurs à 10 %)	224
Annexe 28. Tableau récapitulatif des études ayant mis en évidence une influence positive de la taille du troupeau sur sa probabilité d'être infecté par la TB.	225
Annexe 29. Détail des prévalences fixées dans chaque département pour l'évaluation globale du système de surveillance ante mortem de la TB.....	226
Annexe 30. Déduction d'une modélisation de la sensibilité et la spécificité brute de l'IDC à partir de données françaises.....	228
Annexe 31. Méthode d'estimation des probabilités d'obtention d'un résultat positif ou négatif dans un élevage pour chacun des protocoles réglementaires de dépistage périodique en élevage, conditionnellement aux résultats de l'IDC de première intention	229
Annexe 32. Valeurs moyennes de chaque critère utilisé dans l'analyse multicritère permettant de comparer les protocoles de dépistage périodique en élevage dans les départements de Dordogne, Nièvre, Maine-et-Loire et Manche.	231
Annexe 33. Questionnaire à destination des directeurs de GTV afin d'estimer la difficulté de réalisation de chaque test de dépistage de la TB du point de vue des VS	233
Annexe 34. Questionnaire à destination des chefs de bureau santé animale des DDPP afin de fixer les seuils de certains critères et d'estimer la difficulté de gestion administrative de chaque test de dépistage de la TB du point de vue des DDPP	234
Annexe 35. Questionnaire à destination des directeurs de GDS afin de fixer les seuils de certains critères et d'estimer la difficulté de gestion pratique de chaque test de dépistage de la TB du point de vue des éleveurs	238
Annexe 36. Extrait des sept premières questions (7/28) du questionnaire à destination des chefs de service adjoint santé animale des DDPP permettant de déterminer les poids des critères	242

Liste des abréviations utilisées

AB	Abattage
ACE	Analyse coût-efficacité
ACB	Analyse coût-bénéfice
ACU	Analyse coût-utilité
ADILVA	Association française des directeurs et cadres de laboratoires publiques d'analyse
AHP	<i>Analytical hierarchy process</i> – analyse hiérarchique des procédés
AM	Arrêté ministériel
AMC	Analyse de minimisation des coûts
Anses	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement, et du travail
APDI	Arrêté préfectoral portant déclaration d'infection
APMS	Arrêté préfectoral de mise sous surveillance
AUC	Aire sous la courbe ROC
BDNI	Base de Données Nationale d'Identification
BIC	<i>Bayesian information criterion</i> - critère bayésien d'information
Cofrac	Comité français d'accréditation
DD(CS)PP	Direction départementale (de la cohésion sociale) et de la protection des populations
DGAI	Direction générale de l'alimentation
DO	Densité optique
ELECTRE	Elimination Et Choix Traduisant la Réalité
ELISA	<i>Enzyme-linked immunosorbent assay</i> - dosage immuno-enzymatique sur support solide
GDS	Groupement de défense sanitaire
HACCP	<i>Hazard Analysis Critical Control Point</i> – Analyse des dangers et points critiques pour leur contrôle
IC95%	Intervalle de confiance à 95 %
ICCT	<i>Intradermal cervical comparative tuberculin test</i>
ID	Intradermotuberculation
IDC	Intradermotuberculation comparative
IDS	Intradermotuberculation simple
HSR	Hypersensibilité retardée
IFN γ	Interféron gamma
LDA	Laboratoire départemental agréé
LNR	Laboratoire National de Référence
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i> – Mesure de l'attractivité par une technique d'évaluation basée sur les catégories
OASIS	Outil d'Analyse de Systèmes de Surveillance en Santé
OI	Officiellement indemne
OIE	Organisation mondiale de la santé animale
OMAR	Observatoire de la Mortalité des Animaux de Rente
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OR	Odds Ratio
PBS	<i>Phosphate buffered saline</i> - tampon phosphate salin
PCR	<i>Polymerase chain reaction</i> - amplification en chaîne par polymérase
P.P.D.	<i>Purified Protein Derivated</i> - Dérivé Protéique Purifié
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations</i> - méthode de classement des préférences pour les évaluations d'enrichissement
PWM	<i>Pokeweed mitogen</i> – mitogène du raisin d'Amérique
QUALYS	<i>Quality-Adjusted life years</i> – années de vie gagnées ajustées sur leur qualité
RCE	Rapport coût-efficacité

RIMC	Réaction immunitaire à médiation cellulaire
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic</i> - caractéristique de performance
SIGAL	Système d'information de la Direction générale de l'alimentation
TB	Tuberculose bovine
TN	Témoin négatif
TP	Témoin positif
UE	Union Européenne
UTA	Utilité Additive
VS	Vétérinaire sanitaire
VIF	<i>Variance inflation factor</i> - facteur d'inflation de la variance
ZPR	Zone de prophylaxie renforcée

Introduction

La lutte organisée contre la tuberculose bovine (TB), infection réglementée à surveillance obligatoire, mobilise les éleveurs, les vétérinaires et les services vétérinaires français depuis 70 ans. Au fil des années, la réduction progressive de la prévalence de la maladie sur le territoire, combinée aux caractéristiques imparfaites des tests de dépistage utilisés, a entraîné une baisse de la confiance accordée en un résultat positif lors du dépistage. Cette baisse de confiance dans les résultats de la surveillance, associée aux contraintes économiques importantes pour les élevages suspects, ont contribué à réduire l'acceptabilité des protocoles. Ainsi, de nouveaux protocoles de surveillance et de gestion des foyers (abatage sélectif) ont été introduits dans la réglementation afin d'essayer de maintenir un équilibre efficacité/investissement humain et investissement financier/acceptabilité convenable. Cela a conduit à l'existence d'un système de surveillance complexe constitué de plusieurs composantes (dépistage périodique, enquêtes épidémiologiques, dépistage lors des échanges d'animaux, surveillance à l'abattoir) pouvant elles même se décliner en différents protocoles, et dont la mise en œuvre varie en fonction de la zone géographique. De plus, les tests d'intradermotuberculination sur lesquels s'appuient en premier lieu le dépistage de la TB en élevage sont complexes à réaliser sur le terrain et, compte tenu de l'évolution épidémiologique de la TB entraînant une baisse de confiance dans les résultats positifs, des adaptations des gestes techniques par rapport à la réglementation ont progressivement vu le jour. Or, l'objectif d'éradication de la TB n'est toujours pas atteint, et le nombre de foyers détectés est même en augmentation depuis 2010, menaçant le statut officiellement indemne de la France. Dans ce contexte, l'évaluation du système de surveillance de la TB s'imposait afin d'estimer l'efficacité et les coûts du dispositif et d'identifier les éventuels freins (épidémiologiques, économiques et/ou sociaux) à l'éradication de l'infection. Toutefois, dans un contexte si complexe, la méthodologie manquait pour pouvoir prendre en compte les adaptations de pratiques des acteurs du système de surveillance par rapport aux mesures réglementaires. De plus, dans la mesure où chaque protocole des composantes du système de surveillance peut avoir une efficacité, une acceptabilité et un coût différents, en fonction du contexte de la zone où il est appliqué, un outil d'aide à la décision permettant de comparer ces protocoles, selon des critères variés représentant cette triade, et applicable dans différents contextes locaux, pourrait s'avérer très utile pour les gestionnaires de la surveillance de la TB. Ce type d'outil existait dans d'autres disciplines mais n'avait jamais été utilisé en santé vétérinaire. Ce travail de thèse avait pour objectif de répondre à ces problématiques méthodologiques.

Dans la première partie de ce manuscrit, nous avons tout d'abord présenté dans un premier chapitre les méthodes d'évaluation des systèmes de surveillance en santé animale ; puis dans un second chapitre, la tuberculose bovine, ses enjeux et sa surveillance dans le contexte de France métropolitaine.

La seconde partie du manuscrit a été consacrée aux travaux de recherche menés au cours de ce travail de thèse. Après un premier chapitre décrivant la problématique et les objectifs de la thèse, nous avons évalué et proposé des alternatives aux protocoles de dépistage périodique en élevage. Ainsi, le chapitre 2 présente l'évaluation coût-efficacité des protocoles réglementaires, puis le chapitre 3 présente la méthode que nous avons développée pour prendre en compte, dans les simulations stochastiques, les pratiques de terrain des vétérinaires pour la réalisation de l'acte d'intradermotuberculination et son impact sur l'efficacité des protocoles réglementaires. Le chapitre 4 présente les résultats de l'évaluation de protocoles alternatifs aux protocoles réglementaires. Ensuite, les chapitres 5 et 6 reviennent sur l'évaluation coût-efficacité de chacune des autres composantes de la surveillance *ante mortem*, soit respectivement l'investigation dans les élevages en lien épidémiologique avec des foyers détectés et le dépistage lors des échanges de bovins. Le chapitre 7 a été consacré à l'évaluation globale de la surveillance *ante mortem* de la TB à l'échelle départementale. Enfin, le chapitre 8 présente l'adaptation d'une méthode d'aide à la décision

multicritère, empruntée à d'autres disciplines, à la santé animale et plus particulièrement à la surveillance de la TB en élevage, ce qui a permis d'identifier des protocoles optimaux selon un ensemble de critères épidémiologiques, économiques et techniques, et de poids accordés à ces critères. Pour finir, une discussion générale de ces travaux de thèses est proposée dans le chapitre 9.

1^{ère} partie : État des lieux

Chapitre 1. Les méthodes d'évaluation des systèmes de surveillance en santé animale

1.1. Objectifs et enjeux de l'évaluation d'un système de surveillance en santé animale

La surveillance en santé animale consiste en la collecte, le recueil, l'analyse et l'interprétation systématique, continue ou répétée de données de santé animale d'une population définie (Hoinville *et al.*, 2013). Ses objectifs peuvent être différents selon le statut épidémiologique de la région surveillée. Si l'agent pathogène est *a priori* absent de la région, la surveillance permet de détecter précocement son émergence et/ou de prouver son absence. Si l'agent pathogène est déjà présent sur le territoire étudié, elle a pour but de suivre l'évolution de l'infection dans le temps et de mettre en place des mesures de contrôle et de lutte appropriées. Les moyens tant humains que financiers étant finis, les systèmes (ou dispositifs) de surveillance doivent cibler en priorité les infections importantes en raison de leur impact économique (perte de productivité dans les élevages ou entrave aux échanges commerciaux internationaux par exemple) et/ou de santé publique (zoonose). Ces **systèmes de surveillance sont donc indispensables à la pérennité de l'élevage ainsi qu'au maintien de la santé publique**, mais ils sont souvent complexes à mettre en œuvre. C'est pourquoi leur mise en place et leur maintien nécessite la réalisation **d'évaluations internes et externes** régulières, afin de s'assurer de leur bon fonctionnement, d'identifier les aspects à améliorer et de proposer des solutions de perfectionnement.

L'évaluation est un point clé des systèmes de surveillance et peut être considérée comme partie intégrante de ces systèmes. En effet, elle permet tout d'abord de **vérifier la pertinence des objectifs** du système de surveillance et de **vérifier l'adéquation entre ces objectifs et le fonctionnement de la surveillance**. Des évaluations régulières d'un système de surveillance permettent de s'assurer que celui-ci est efficace et qu'il correspond toujours aux besoins actuels de santé publique vétérinaire, qui peuvent évoluer dans le temps (Declich et Carter, 1994 ; Teutsch *et al.*, 2000). Elle permet ensuite **d'améliorer l'efficacité du dispositif et de corriger les dérives** qui peuvent se mettre en place dans le temps afin d'assurer la **pérennité du système**.

Par ailleurs, les systèmes de surveillance reposent souvent sur de nombreux acteurs, à la fois publics et privés, et sont fréquemment constitués de plusieurs composantes. Leur évaluation doit donc se faire à la fois sur le plan **technique** (le système remplit-il ses objectifs, peut-il être amélioré), **économique** (optimisation du rapport coût/efficacité) et **humain** (relations entre les acteurs, acceptabilité du système par ses acteurs mais également par l'opinion publique) (RISKSUR, 2013). Une évaluation sur ces trois pans permet de répartir le mieux possible les ressources limitées allouées au secteur de la santé animale. Ainsi, l'objectif de l'évaluation d'un système de surveillance est **d'obtenir la meilleure balance coût (humain et financier) / bénéfice du système**, en fonction des objectifs de la surveillance (CDC, 2001). L'évaluation des systèmes de surveillance est ainsi également un outil d'aide à la répartition de ressources limitées entre différents systèmes de surveillance (Scott *et al.*, 2012).

En plus de permettre l'amélioration et d'assurer la pérennité du système de surveillance, son évaluation conduit également à objectiver la **qualité des informations** qu'il fournit afin de pouvoir discuter des résultats obtenus (Dufour et La Vieille, 2000). En effet, aucun dispositif n'étant parfait, ce n'est pas parce la présence d'un agent pathogène n'est pas détectée par un système de surveillance que celui-ci n'est pas présent. L'évaluation de la qualité des résultats d'un système de surveillance donné permet ainsi de connaître leur **fiabilité** et donc l'interprétation qui peut en être faite. Cela représente un enjeu national mais aussi international. En effet, l'évaluation régulière d'un système

permet de maintenir la crédibilité et la confiance de la communauté internationale vis-à-vis de ses résultats. Cette confiance est indispensable aux échanges commerciaux internationaux d'animaux et de leurs produits dérivés (Drewe *et al.*, 2012). C'est pourquoi de nombreuses évaluations s'attachent à montrer que le système de surveillance étudié est capable de mettre en évidence la maladie lorsque sa prévalence est au-dessus du seuil réglementaire permettant l'attribution et le maintien du statut officiellement indemne du pays (Martin *et al.*, 2007 ; Christensen *et al.*, 2011 ; El Allaki *et al.*, 2016).

1.2. Les attributs à évaluer

Il n'existe pas de méthode standardisée faisant consensus pour l'évaluation des systèmes de surveillance en santé animale (Drewe *et al.*, 2012 ; Calba *et al.*, 2015). Stärk et ses collaborateurs ont listé les principales caractéristiques que doit remplir une méthode d'évaluation d'un système de surveillance : elle doit être **objective, exacte, transparente, facile à mettre en œuvre et de préférence quantitative** car toute étude qualitative introduit une part de subjectivité (Stärk *et al.*, 2002). Plusieurs guides et outils différents ont été développés ces dernières années, majoritairement dans le domaine de la santé publique (humaine), mais également en santé animale (Drewe *et al.*, 2015). En effet, il existe des différences d'objectifs entre les systèmes de surveillance de ces deux disciplines (Calba *et al.*, 2015) : par exemple, en santé animale, le rapport coût-efficacité peut être considéré comme un indicateur important puisque la pérennité d'un système est conditionnée par un coût raisonnable permettant d'assurer la continuité des financements (Dufour *et al.*, 2006) ; alors qu'en santé publique, la sensibilité et la spécificité du dispositif peuvent être privilégiées à cause des conséquences individuelles graves que peut entraîner une erreur de diagnostic. De nombreuses méthodes d'évaluation ont été développées pour l'évaluation de systèmes de surveillance en santé animale : une revue des publications a par exemple identifié 24 méthodes d'évaluation différentes, dont 10 quantitatives et 14 qualitatives ou semi-quantitatives (Calba *et al.*, 2015).

Tous les guides s'accordent toutefois sur la nécessité, avant de choisir les attributs à évaluer, de **décrire le système de surveillance** concerné, son fonctionnement et ses objectifs (WHO, 1997 ; CDC, 2001 ; Santé Canada, 2004 ; Drewe *et al.*, 2015). Ensuite, le choix des attributs à évaluer dépend de l'objectif de l'évaluation (Salman *et al.*, 2003 ; Hoinville *et al.*, 2013 ; Drewe *et al.*, 2015). **L'implication des acteurs** de la surveillance dans l'évaluation, notamment dans le choix de ses objectifs et des attributs à évaluer, est conseillée afin de s'assurer de la pertinence opérationnelle de ces choix et de rendre les résultats de l'évaluation acceptables et utiles (CDC, 2001). La plupart du temps, un ou deux attributs seulement sont évalués (Drewe *et al.*, 2012) ce qui ne suffit toutefois pas à fournir une évaluation complète et non biaisée d'un système de surveillance (CDC, 2001). En effet, les guides d'évaluation en santé publique proposent des listes d'attributs permettant une évaluation complète, comme par exemple : **l'utilité, la simplicité, la flexibilité, la qualité des données, l'acceptabilité, la sensibilité, la valeur prédictive positive, la représentativité, la stabilité et la rapidité du système** (CDC, 2001). Cette liste regroupe des attributs permettant d'évaluer **la dimension technique** ainsi que **la dimension humaine** (acceptabilité) des systèmes de surveillance. Toutefois, **aucun consensus** n'existe sur les attributs à évaluer : Calba et ses collaborateurs (2015) en ont ainsi identifié 38 différents dans les évaluations en santé animale incluses dans leur revue de littérature scientifique. De plus, la liste proposée en exemple ci-dessus est incomplète. En effet, **l'évaluation économique** du système est également indispensable à une évaluation complète, comme le souligne l'intérêt croissant porté à cette dimension (Dufour *et al.*, 2006 ; Drewe *et al.*, 2015) ainsi que la définition de l'évaluation de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (Roberts, 1998) : « *l'évaluation est l'évaluation systématique et objective de la pertinence, de l'adéquation, des progrès, de l'efficacité, de l'efficacé et de l'impact d'une série d'actions, par rapport aux objectifs et en tenant compte des ressources et des installations déployées* ».

Les attributs peuvent être interdépendants : par exemple, la simplicité et la flexibilité d'un système de surveillance conditionnent son acceptabilité par les acteurs. Ainsi, on peut parfois réduire le nombre d'attributs à évaluer en choisissant un critère qui reflète la valeur de plusieurs attributs, mais cela n'est pas toujours possible : par exemple, la sensibilité et la spécificité d'un dispositif sont liées mais ces

deux attributs fournissent deux informations différentes et sont donc tous deux nécessaires à son évaluation (Drewe *et al.*, 2012). La plupart des études définissent un nombre limité d'attributs à évaluer pour rendre le processus d'évaluation moins coûteux et plus facilement réalisable. Cette simplification ne doit cependant pas se faire au dépend de la complétude de l'évaluation qui pourrait sinon mener à des recommandations inappropriées. Pour aider au choix d'attributs pertinents, le guide SERVAL (Drewe *et al.*, 2015) propose une classification en attributs primaires, secondaires et tertiaires, en fonction de l'objectif du système de surveillance à évaluer. Il est également possible de scinder l'évaluation en plusieurs études évaluant des aspects complémentaires du dispositif. Les paragraphes suivants détaillent les méthodes qui peuvent être utilisées pour évaluer les aspects techniques, économiques et humains d'un système de surveillance.

Il n'existe pas en santé animale de consensus sur la façon d'évaluer l'efficacité d'un système de surveillance qui permettrait de comparer facilement les systèmes entre eux, contrairement à la santé publique (Drewe *et al.*, 2012 ; RISKSUR, 2013). Le choix de la méthode dépend de l'objectif de l'évaluation qui est conduite : mise en place d'un nouveau système de surveillance, amélioration de l'efficacité d'un système de surveillance déjà existant, amélioration de l'efficacité (coût-efficacité) du dispositif, vérification de la fiabilité des données produites et/ou comparaison de dispositifs entre eux. Dans la majorité des études publiées, seul un nombre limité d'attributs est évalué. Toutefois, une évaluation complète prenant en compte les aspects techniques, économiques et humains du dispositif est nécessaire pour pouvoir énoncer des recommandations pertinentes et en accord avec le contexte socio-économique dans lequel le dispositif est déployé.

1.3. Évaluation de l'aspect technique d'un système de surveillance

L'évaluation de l'aspect technique d'un système de surveillance est primordiale afin de vérifier son fonctionnement et de s'assurer de la qualité des données recueillies par le dispositif. Elle permet également de proposer des améliorations opérationnelles. C'est l'aspect le plus souvent évalué en santé animale, sans doute car c'est celui qui semble être le plus important du point de vue des épidémiologistes qui réalisent ces évaluations techniques (Hoinville *et al.*, 2013). De nombreuses méthodes ont donc été développées pour son évaluation avec des approches qualitatives, semi-quantitatives ou quantitatives, dont les principales sont présentées ci-après.

1.3.1. Les méthodes qualitatives et semi-quantitatives

1.3.1.1. Les indicateurs de performance : des outils d'évaluation interne

L'évaluation interne d'un système de surveillance est un point clé de la qualité d'un dispositif. En effet, cette méthode permet d'en faciliter le pilotage et peut également servir à justifier la qualité du dispositif auprès des utilisateurs de ses résultats ou des bailleurs de fonds du dispositif (Hendriks et Dufour, 2004). Cette évaluation interne est permise par un ensemble d'**indicateurs de performance** qui sont définis au moment de l'élaboration du dispositif, après avoir décrit celui-ci et avoir identifié ses objectifs prioritaires. Ces indicateurs doivent permettre de décrire à la fois **la production** (détection des cas, analyse des données collectées...), **l'organisation** (coordination) et **les dimensions humaines** (relations entre les acteurs, formations et implication des acteurs) du dispositif (Hendriks et Dufour, 2004). Ils sont **mis en place et utilisés par les acteurs** du système de surveillance. Pour être efficaces et utilisés de façon pérenne, ils doivent donc être **simples à calculer** et de préférence reposer sur les données collectées pour la surveillance. Ils doivent être **calculés régulièrement** et comparés à des **valeurs seuils**. La fréquence de calcul et la valeur seuil de chaque indicateur doivent être définis en amont lors de la mise en place du système et en accord avec les acteurs (Mariner *et al.*, 2003). Si un indicateur de performance est inférieur au seuil qui lui est attribué, une analyse doit suivre pour en identifier la raison et **proposer des solutions**. Il convient également de régulièrement **mettre à jour** ces indicateurs en vérifiant qu'ils sont toujours concordants avec les procédures et objectifs de la surveillance.

Hendrikx et Dufour (2004) ont détaillé chacune des étapes permettant la mise en place et l'utilisation de tels indicateurs. L'efficacité de cette démarche a été démontrée sur le terrain, par exemple dans le cadre du programme global de l'éradication de la peste bovine (Mariner *et al.*, 2003). Cette approche présente l'avantage d'être opérationnelle puisqu'elle repose sur les acteurs de la surveillance qui doivent se l'approprier. Ainsi, elle peut donner lieu à des améliorations portées par les acteurs du système de surveillance. Elle présente toutefois le désavantage d'induire une certaine subjectivité de l'évaluation. Il est donc nécessaire de la compléter par une approche ponctuelle mais indépendante : l'audit externe (Dufour et Hendrikx, 2011). Cet audit permet, entre autres, d'apporter une validation de la méthode d'évaluation interne utilisée.

L'évaluation interne est partie intégrante du système de surveillance, elle facilite son pilotage, le suivi de sa qualité et la mise en place d'améliorations par les acteurs du dispositif. La difficulté est de parvenir à la rendre pérenne dans le dispositif mis en place ; pour cela un nombre limité d'indicateurs doit être choisi en accord avec les objectifs principaux du dispositif et ceux-ci doivent être simples à calculer à partir des données recueillies par le système de surveillance. L'implication totale des acteurs dans cette évaluation entraîne une certaine subjectivité de l'évaluation qu'il convient donc de compléter par d'autres approches.

1.3.1.2. L'audit externe

L'audit externe est mené **ponctuellement** par un ou plusieurs **évaluateurs indépendants** (c'est-à-dire n'étant pas acteurs du système de surveillance audité) à l'aide d'une **grille d'évaluation standardisée** afin de garantir une certaine objectivité de l'évaluation. Il a pour but d'étudier le fonctionnement du système de surveillance afin de **mettre en lumière ses points faibles et ses points forts et de proposer des pistes d'améliorations** (Hendrikx *et al.*, 2011).

Dès 1993, Hueston proposait une méthode semi-quantitative permettant d'évaluer un dispositif de surveillance de santé animale d'un pays sous la forme d'une grille identifiant les composantes qui devraient idéalement le constituer et leurs caractéristiques idéales (Hueston, 1993). Un score de 1 à 4 était attribué à chaque composante du dispositif (4 correspondant à une composante idéale) en fonction de la présence ou l'absence des caractéristiques identifiées en amont comme nécessaires. En 1998, Dufour développa un outil d'évaluation semi-quantitatif sur ce même principe d'attribution des scores et l'utilisa pour évaluer plusieurs dispositifs de surveillance français (Dufour, 1999). Par transposition de la méthode HACCP (*Hazard Analysis : Critical Control Point*) utilisée en hygiène alimentaire, **huit caractéristiques critiques** d'un système de surveillance furent identifiées : les objectifs, l'échantillonnage, la coordination et la sensibilisation, les facteurs environnementaux, les techniques de dépistage et de diagnostic, la collecte et la circulation des données, l'analyse des données et la circulation de l'information. La consultation d'un groupe d'expert avait permis de fixer le score maximum de chaque point critique tel que la somme des scores vaille 100. L'évaluation consistait alors à attribuer à chaque point critique une note par rapport à son score maximum et à calculer le score global du dispositif. Cela permettait d'estimer le potentiel d'amélioration de chaque point critique du dispositif dans le but de proposer des améliorations. De plus, cette standardisation rendait possible la comparaison de plusieurs dispositifs entre eux (Dufour, 1999).

L'approche française **OASIS** (Outil d'Analyse de Systèmes de Surveillance en Santé) réunit en un seul outil plusieurs méthodes existantes (Hendrikx *et al.*, 2011). Elle repose sur un questionnaire administré aux acteurs du système qui permet de collecter les informations nécessaires sur le fonctionnement du système de surveillance et les résultats opérationnels obtenus. Une grille de notation standardisée est ensuite utilisée pour attribuer une note à **dix sections clefs** : objectifs, organisation institutionnelle centrale, organisation institutionnelle sur le terrain, diagnostic de laboratoire, formalisation des procédures de surveillance, gestion des données, coordination et supervision du dispositif, formation, diffusion de l'information et évaluation du dispositif. Les notes sont attribuées par un groupe d'experts indépendants selon quatre à quatorze critères pour chaque section (**soixante-dix-huit critères** au total). Un guide de notation a été développé afin de réduire autant que possible la part de subjectivité dans l'attribution des notes. Un des points forts de cette méthode est de proposer la présentation des

résultats de l'évaluation sous **trois formes graphiques** qui **facilitent la communication des résultats** : des diagrammes en camembert illustrant le niveau de satisfaction pour chacune des dix sections, un histogramme représentant le niveau de maîtrise de sept des points critiques identifiés par Dufour (1998) et une représentation en toile d'araignée de l'estimation semi-quantitative de neuf attributs recommandés par le CDC (2001) et de la fiabilité du système. L'approche OASIS a été utilisée plusieurs fois pour l'évaluation de système de surveillance en santé animale en France (Hendrikx *et al.*, 2011 ; Calavas *et al.*, 2012 ; Gorecki, 2012 ; Lhubert *et al.*, 2015).

L'audit externe identifie les points faibles et les points forts d'un dispositif de surveillance dans le but de proposer des pistes d'amélioration. L'utilisation d'une grille standardisée par des experts indépendants permet d'assurer une meilleure objectivité de l'évaluation. Quelques acteurs de la surveillance sont néanmoins inclus dans le processus pour apporter leur expertise et assurer une meilleure acceptabilité des résultats. En France, la méthode OASIS est la principale utilisée.

Les méthodes qualitatives ou semi-quantitatives d'évaluation de l'aspect technique d'un système de surveillance présentent l'avantage d'être applicables relativement facilement et donc de pouvoir apporter rapidement des propositions d'améliorations concrètes pour un système de surveillance et d'en évaluer fréquemment l'efficacité. Elles visent à maintenir le système de surveillance dans un cercle vertueux impliquant les acteurs du dispositif, ce qui permet en théorie une amélioration du système et un maintien de sa qualité.

1.3.2. Les méthodes quantitatives

Les méthodes quantitatives sont les méthodes les plus fréquemment utilisées pour évaluer les systèmes de surveillance aussi bien en santé publique qu'en santé animale. Elles présentent en effet l'avantage de garantir une certaine objectivité de l'évaluation (ce qui rend son résultat plus acceptable) et de permettre d'estimer l'exhaustivité des données produites par le dispositif sans avoir à en évaluer tous les points critiques. Elles sont généralement utilisées pour estimer la sensibilité du système de surveillance en tant que principal attribut de son efficacité (Drewe *et al.*, 2012). La notion de sensibilité d'un système de surveillance peut être envisagée à trois niveaux. Elle peut désigner sa capacité à estimer la prévalence réelle de l'infection soit à l'échelle individuelle (détection des cas individuels), soit à l'échelle des troupeaux (détection des troupeaux infectés, c'est-à-dire détenant au moins un animal infecté), ou sa capacité de détection de la présence de l'infection sur un territoire (RISKSUR, 2013).

L'estimation quantitative de la sensibilité des dispositifs de surveillance est souvent rendue difficile par la détection non-aléatoire des cas et par l'absence de tests de dépistage et de diagnostic parfaits (Martin *et al.*, 2007). En effet, les systèmes de surveillance permettant une détection équiprobable des cas sur un territoire peuvent se révéler très coûteux, en particulier pour un agent pathogène présent à une faible prévalence. Ceci a entraîné la mise en place de dispositifs fondés sur le risque afin d'améliorer la détection tout en diminuant les coûts (Stärk *et al.*, 2006). De plus, la sensibilité et la spécificité réelles des tests de diagnostic et de dépistage sont difficiles à estimer avec exactitude, et sont donc souvent mal connues en pratique. Des méthodes ont donc été développées afin de surmonter ces difficultés et de prendre en compte les incertitudes sur les paramètres des dispositifs de surveillance ainsi que leur éventuelle variabilité.

Les sous paragraphes suivants décrivent les deux principales méthodes utilisées actuellement pour évaluer quantitativement certains attributs techniques des systèmes de surveillance en santé animale.

1.3.2.1. Les méthodes de capture-recapture

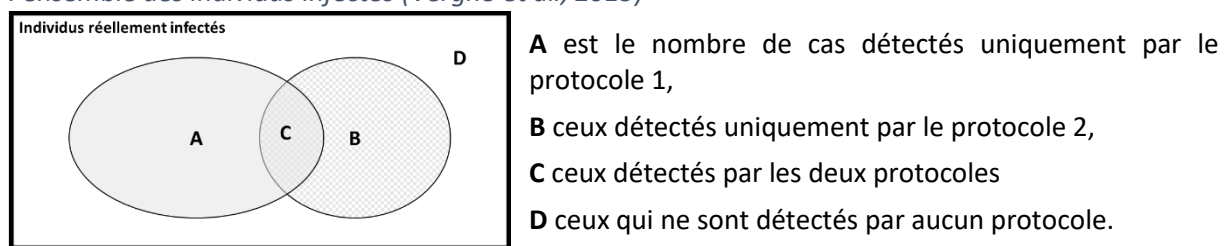
La méthode de capture-recapture est une méthode développée en premier lieu en écologie, notamment pour estimer la taille d'une population d'animaux sauvages à partir de plusieurs campagnes de captures (sachant qu'il est impossible de capturer la totalité des animaux sauvages

d'une population) d'où son nom. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet « d'estimer les paramètres biologiques d'une population en prenant en compte l'incertitude de la détection » (Vergne *et al.*, 2015). Elle peut donc être utilisée en épidémiologie pour estimer le nombre réel d'unités épidémiologiques infectées, estimer quantitativement la sous-détection et étudier les facteurs influençant cette sous-détection (Vergne *et al.*, 2015). Elle peut ainsi être appliquée à l'évaluation d'un système de surveillance.

Pour cela, deux approches existent : les **modèles multilistes**, qui nécessitent la présence de plusieurs protocoles de détection pour modéliser les détections croisées, et les **modèles unilistes** qui modélisent les fréquences de détection quand il n'existe qu'un unique protocole de détection.

Les modèles multilistes comprennent les méthodes à deux sources qui modélisent la détection croisée entre deux protocoles, ou à trois sources et plus qui modélisent la détection croisée entre trois protocoles ou plus. Nous présentons ici la méthode à deux sources qui permet de bien comprendre le fonctionnement des méthodes multilistes. Dans cette méthode, on considère que le premier protocole détecte $N_1=A+C$ individus infectés, le deuxième $N_2=B+C$ et qu'il reste D individus infectés qui ne sont détectés par aucun des deux protocoles (figure 1). Le nombre total d'individus réellement infectés est donc égal à $N=A+B+C+D$. A , B et C sont connus ; les analyses de capture-recapture permettent d'estimer la valeur de D et donc celle du nombre total d'individus infectés. Cette méthode suppose l'indépendance des protocoles de détection et une spécificité parfaite des protocoles. Une dépendance entre les protocoles peut entraîner une sur- ou une sous-estimation de la prévalence selon la nature de la dépendance et une spécificité imparfaite entraîne un risque de surestimation.

Figure 1. Diagramme de Venn représentant les individus détectés par les deux protocoles parmi l'ensemble des individus infectés (Vergne *et al.*, 2015)



L'utilisation de ce type de méthode est fréquente en santé publique mais plus rare en santé animale (Drewe *et al.*, 2012), car il est rare que des systèmes de surveillance soient composés de plusieurs protocoles non-exclusifs, c'est-à-dire ayant la possibilité de détecter des individus en commun.

Les modèles unilistes sont toutefois plus applicables en santé animale (Brønner *et al.*, 2015 ; Amat *et al.*, 2016). Deux approches existent, l'une utilisant des données tronquées en zéro : dans ce cas, la population ciblée correspond à la population infectée qui est de taille inconnue. L'objectif est alors d'estimer la taille de cette population, en modélisant le nombre de fois où chaque unité infectée est détectée. L'autre approche est celle des données dites enflées en zéro, qui cible la population totale dont la taille est connue, et permet d'estimer le nombre de faux négatifs.

1.3.2.2. La méthode des arbres de scénario

Cette méthode est utilisée depuis les années 2000 pour déterminer la probabilité de détection d'une maladie dans le cadre de dispositifs de surveillance complexes (composantes et/ou espèces surveillées multiples) (Hueston et Yoe, 2000) et pour estimer quantitativement le risque d'introduction d'agents pathogènes (en analyse de risque) (OIE, 2005). En 2007, Martin et ses collaborateurs (Martin *et al.*, 2007) ont adapté la méthode pour prouver le statut officiellement indemne d'un territoire à partir de données multiples et complexes. Depuis, elle a été fréquemment utilisée pour estimer la **capacité d'un système de surveillance donné à détecter la présence d'une maladie** à partir d'un seuil de prévalence minimum, souvent fixé par rapport au seuil réglementairement nécessaire à l'obtention du statut indemne (Hadorn *et al.*, 2009 ; Christensen *et al.*, 2011 ; Fodai *et al.*, 2016). La **répartition des coûts** de chaque étape de la surveillance peut également être modélisée dans les arbres de scénario. Ainsi,

cette méthode permet **d'identifier les points nécessitant une amélioration technique ou un effort financier** et d'évaluer le **ratio coût-efficacité** du dispositif global et de chacune de ses composantes. Différentes stratégies de surveillance (existantes ou alternatives) peuvent alors être **comparées** à partir de ce ratio afin de choisir la ou les stratégie(s) optimale(s) d'un point de vue coût-efficacité en fonction de critères choisis (zone géographique, objectif de la surveillance, type de troupeaux, etc.).

Cette méthode consiste à représenter chaque composante du système de surveillance à étudier comme un arbre évènementiel décrivant chaque « chemin », de l'infection de la population surveillée à sa détection par la composante du système de surveillance étudié. Elle se décline en cinq étapes :

- (1) Décrire les composantes du système de surveillance à évaluer
- (2) Identifier les facteurs ayant une influence positive ou négative sur la probabilité d'infection et/ou de détection
- (3) Paramétrer les branches de l'arbre de scénario
- (4) Calculer la probabilité d'occurrence de chaque branche de l'arbre
- (5) Calculer la sensibilité globale du système de surveillance.

1.3.2.2.1. Décrire le système de surveillance à évaluer

Décrire le système de surveillance à évaluer aussi exhaustivement que possible est la première étape de la modélisation par arbre de scénario. Il faut notamment préciser :

- **Le champ d'application** du modèle (à une maladie ou à une infection, un agent pathogène ou un syndrome) et description de la population couverte (dite « population de référence ») (espèce, localisation géographique, groupes à risque, etc.) ;
- **L'unité de l'analyse** : individu, groupe d'animaux, troupeau, exploitation ;
- **La période temporelle** : elle est définie en fonction de l'épidémiologie de l'infection (vitesse de diffusion, éventuelle saisonnalité, durée de la maladie, etc.), de la fréquence des analyses ou de l'obtention des résultats du système de surveillance (rapport annuel ou mensuel, tests de dépistage périodiques, délai d'obtention des résultats d'analyses, etc.), de l'importance économique et politique de l'infection (évaluations régulières sur de courtes périodes pour les infections à fort impact, plus espacées lorsque leur importance est moindre) et de l'organisation des systèmes de production sous surveillance (unités avec des périodes de production fixes comme les bassins de poissons ou les lots de poulets de chair) ;
- **La définition du cas** (sortie positive du modèle) : souvent, le cas est défini comme la mise en évidence de l'agent pathogène.

Si le dispositif de surveillance contient plusieurs composantes, un arbre de scénario doit être construit pour chacune d'elles.

1.3.2.2.2. Identifier les facteurs influants sur la probabilité de détection ou d'infection

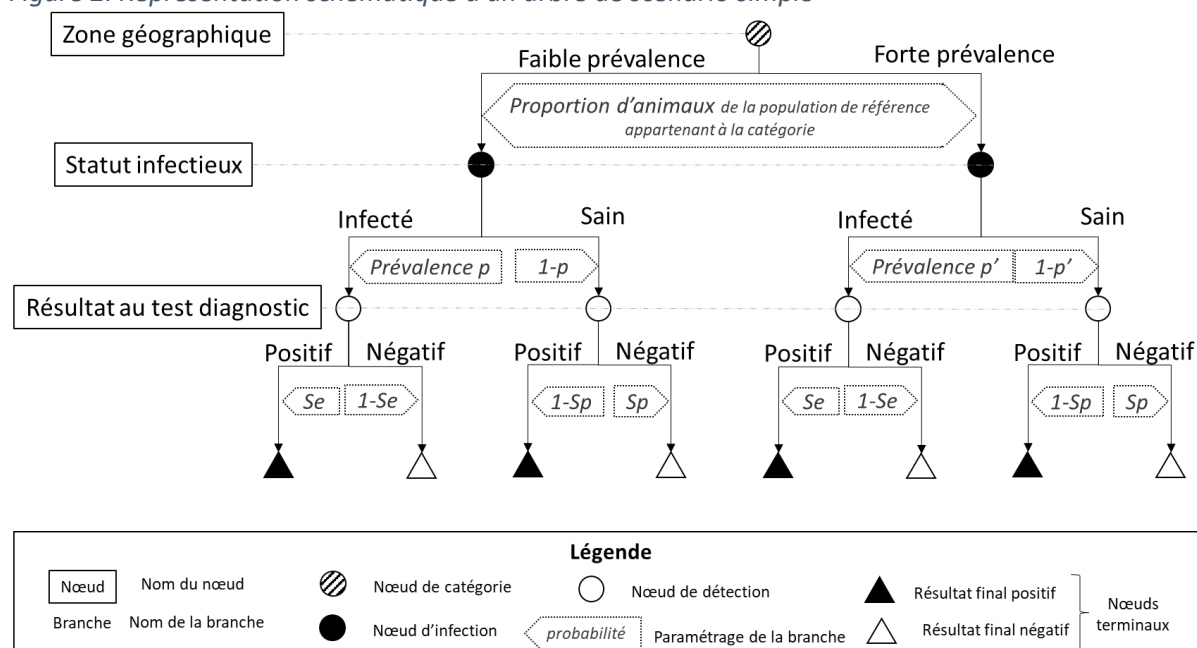
Identifier les facteurs ayant une influence positive ou négative sur la probabilité d'infection et/ou de détection d'un élevage ou d'un animal (selon l'unité épidémiologique utilisée) permet de définir les différents nœuds qui constitueront l'arbre de scénario et seront reliés entre eux par les branches de l'arbre. On distingue différents types de nœuds :

- **Les nœuds de catégorie** qui permettent de subdiviser la population étudiée en groupes possédant la même probabilité d'infection (nœud de catégorie d'infection ou de risque) et/ou de détection (nœud de catégorie de détection) ;
- **Les nœuds d'infection** qui indiquent le statut infectieux de l'unité épidémiologique considérée et n'admettent que deux branches : « infecté » ou « indemne » ;
- **Les nœuds de détection** qui déterminent si l'infection est détectée ou non. Il s'agit le plus souvent de résultats de tests positifs ou négatifs.

Les nœuds sont ensuite ordonnés, chronologiquement au déroulement du dispositif de surveillance, en ordre décroissant de taille de groupe et en plaçant les nœuds d'infection avant les nœuds de détection et les nœuds de catégorie avant les nœuds d'infection et/ou de détection auxquels ils s'appliquent. Par exemple, dans la figure 2, deux catégories de zones géographiques sont définies en fonction de leur prévalence pour l'infection considérée (faible et forte prévalence), car cette

prévalence influence la probabilité que l'unité considérée (l'animal ou l'élevage par exemple) soit infectée.

Figure 2. Représentation schématique d'un arbre de scénario simple



1.3.2.2.3. Paramétrer les branches de l'arbre de scénario

À chaque branche de l'arbre de scénario est associée une probabilité de survenue (figure 2). Cette probabilité peut être une valeur fixe, en cas d'approche déterministe, ou être modélisée par une loi de distribution en cas d'approche stochastique. L'approche stochastique présente l'avantage de permettre la prise en compte de l'incertitude qui peut exister lors de l'estimation de telles probabilités ainsi que leur variabilité. L'origine des données utilisées pour le paramétrage des branches peut être très variée. Il peut s'agir de données issues des publications scientifiques, d'études spécifiques, d'extractions de bases de données, de données historiques ou encore d'opinions d'experts (Clemen et Winkler, 1999 ; Vose, 2000). La méthode des arbres de scénario permet ainsi d'utiliser des données de sources variées et d'associer des données représentatives (issues d'études structurées) avec des données non représentatives (échantillonnage à l'abattoir, opinions d'experts) qui étaient auparavant plutôt utilisées dans les évaluations qualitatives.

Dans leur méthode, Martin et ses collaborateurs introduisent la notion de **prévalence limite**, notée P^* , qui est associée au nœud d'infection (Martin *et al.*, 2007). Elle est souvent déterminée à l'échelle de l'animal mais peut être définie à plusieurs niveaux comme l'élevage ou la zone géographique. La prévalence limite correspond à la **prévalence minimale que l'on souhaite pouvoir détecter par le système de surveillance** ; la sensibilité estimée du dispositif n'est alors valable que pour cette valeur de prévalence limite. Elle n'est donc pas définie en fonction de la prévalence réelle de la maladie mais selon des standards nationaux ou internationaux, souvent à partir des seuils de prévalence rendant possibles les échanges commerciaux (fixés par l'OIE (organisation mondiale de la santé animale) ou l'Union Européenne par exemple), ou selon une estimation minimale de la prévalence qui serait attendue si la maladie était présente.

Enfin, ils ont également introduit le **risque différentiel** qui permet de prendre en compte la différence de probabilité d'infection entre les catégories définies par un nœud de catégorie d'infection et ainsi d'évaluer les avantages de la mise en place d'une surveillance ciblée. Des données historiques ou des avis d'experts permettent d'estimer le risque relatif de chaque catégorie (RR_i). À chaque branche i du nœud de catégorie est ensuite associé un risque relatif ajusté (Ar_i) calculé selon la formule (1) afin que le risque moyen dans la population de référence soit égal à un : (1) $Ar_i = \frac{RR_i}{\sum_{j=1}^k RR_j * PrP_j}$ où PrP_i est la proportion d'unités de la population de référence appartenant à la catégorie i et k le nombre de

branches définies par le nœud de catégorie. Ce risque relatif ajusté est ensuite multiplié par la prévalence pour obtenir la probabilité d'infection des unités de chaque catégorie (P_i^*).

En plus des données d'ordre épidémiologique, il est également possible d'associer à chaque branche des données économiques, ce qui permet d'estimer le coût du système évalué (Hénaux et Calavas, 2017 ; Rüegg *et al.*, 2018).

1.3.2.2.4. *Calculs de la probabilité globale d'occurrence de chaque branche et de la sensibilité de chaque composante*

La probabilité d'occurrence de chaque branche de l'arbre peut être calculée en multipliant les probabilités associées à chaque nœud la composant. Il est ensuite possible de calculer la sensibilité individuelle d'une composante du dispositif de surveillance (notée CSeU, qui correspond à la probabilité qu'une unité infectée soit détectée) en sommant les probabilités d'occurrence de tous les chemins de l'arbre correspondant à une unité infectée et aboutissant à un résultat final positif (c'est-à-dire à la détection de l'infection).

La sensibilité globale d'une composante de la surveillance (CSe) correspond à la probabilité qu'**au moins une** unité de la population de référence soit infectée et détectée. Elle se calcule selon l'équation (2) : (2) $CSe = 1 - (1 - CSeU)^n$ où n est le nombre d'unités dans la population.

1.3.2.2.5. *Calcul de la sensibilité globale du système de surveillance*

La sensibilité globale d'un système de surveillance (SSe) comprenant **k composantes indépendantes** entre-elles est facilement calculable à partir de CSe_k (la sensibilité globale de chacune de ces composantes), en appliquant l'équation (3) : (3) $SSe = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - CSe_j)$

Si les composantes du dispositif sont dépendantes, il est nécessaire de le prendre en compte par un calcul séquentiel des sensibilités globales de chaque composante. À chaque étape, le calcul de CSe_k utilise comme distribution à priori de la prévalence les P_i^* calculées lors de l'estimation de CSe_{k-1} . Si certains groupes étudiés dans CSe_k ne l'étaient pas dans CSe_{k-1} , alors la valeur initiale de P^* peut être utilisée. L'ordre de l'analyse n'a pas d'influence sur le résultat final (Martin *et al.*, 2007). La sensibilité globale du dispositif peut ensuite être calculée selon la formule (3).

Une autre possibilité est de modéliser toutes les composantes dans un même arbre, ce qui semble plus instinctif mais peut conduire à un arbre très complexe et peu lisible (Hueston et Yoe, 2000).

1.3.2.2.6. *Analyse de sensibilité*

Comme pour de nombreux modèles, un arbre de scénario peut faire l'objet d'une analyse de sensibilité. L'analyse de sensibilité a pour but d'étudier comment un modèle réagit aux variations de ses variables d'entrée (Jacques, 2005) ; ce qui permet notamment d'identifier les variables dont la distribution a le plus d'influence sur le changement de la valeur des sorties du modèle (Vose, 2010 ; Jacques, 2011). Ainsi, les variables clés - par l'impact de leurs variations sur la sortie du modèle - peuvent être discernées de celles ayant une influence moindre et des études complémentaires peuvent éventuellement être mises en œuvre pour réduire l'incertitude sur ces variables clés et, en conséquence, sur le(s) résultat(s) du modèle. Il existe plusieurs méthodes d'analyse de sensibilité, en fonction de la dépendance des entrées du modèle entre elles, qui permettent de calculer pour chaque variable d'entrée du modèle un indice révélateur de son influence sur la variabilité de la sortie du modèle (Jacques, 2011).

La modélisation par arbre de scénario permet d'estimer la sensibilité et le coût d'un système de surveillance à plusieurs composantes, à partir de données multiples et complexes. Elle permet également, en utilisant une approche stochastique, de prendre en compte l'éventuelle variabilité et/ou incertitude associée(s) aux estimations des paramètres du modèle.

1.4. Évaluation de l'aspect économique d'un système de surveillance

Le coût d'un système de surveillance est depuis longtemps identifié comme un attribut à évaluer (Declich et Carter, 1994). Actuellement, dans un contexte de réduction des moyens financiers et humains, la prise en compte des aspects économiques est de plus en plus importante. Elle peut intervenir à la fois dans la hiérarchisation des maladies à contrôler (étude d'impact), dans le choix des dispositifs de surveillance à mettre en œuvre et dans leur optimisation (Perry *et al.*, 2001). L'analyse économique concerne à la fois les coûts et les conséquences des programmes qu'elle évalue. En effet, pour faire des choix, les décideurs ont besoin de connaître à la fois le coût d'un programme donné – car la pérennité d'un système est conditionnée par un coût raisonnable qui permet d'assurer la continuité des financements (Dufour *et al.*, 2006) - et ses bénéfices.

L'**étude d'impact** est la première étape de toute analyse économique d'une maladie. Son but est de quantifier les pertes dues à la maladie. Elle permet de fournir une meilleure vision de l'impact de cette maladie et une première estimation des pertes qui pourraient être évitées par la mise en place d'un système de surveillance. Elle doit permettre d'identifier les impacts directs et indirects de la maladie (Dijkhuizen et Morris, 1997). Les **impacts directs** correspondent aux pertes de production en élevage (mortalités, avortements, diminution de fertilité, réduction de la production laitière...) ainsi qu'aux ressources supplémentaires qui doivent être utilisées du fait de la maladie (coût des soins, de la vaccination, des mesures de lutte...) (Horst *et al.*, 1999). Les **impacts indirects** peuvent être multiples : interruption des échanges commerciaux, perte de patrimoine génétique, perte dans les filières aval (abattoir, transformation, commercialisation) ce qui peut avoir un impact sur l'emploi (fermeture d'usines) et éventuellement sur les prix en causant un déséquilibre de l'offre et de la demande (Teutsch *et al.*, 2000). De plus, une maladie peut avoir **des répercussions négatives dans d'autres secteurs** comme par exemple l'environnement (pollution causée par les mesures de lutte (Tisdell *et al.*, 1999), diminution de la biodiversité, réduction des populations sauvages) ou le tourisme (Thompson *et al.*, 2002). Enfin, des **pertes sur le long terme** sont possibles, engendrées par un défaut de **confiance** des consommateurs, des entreprises ou des pays importateurs vis-à-vis des services vétérinaires ou des industries agroalimentaires (Peterson et Chen, 2005 ; Romano et Stefani, 2006) et/ou par une **déstabilisation des marchés internationaux** (Giamalva, 2008).

En pratique, en santé animale, de telles études d'impact sont rarement effectuées car l'impact indirect d'une maladie est très difficile à estimer (Rushton *et al.*, 1999). En effet, les pertes dues à une maladie sont souvent difficiles à quantifier en santé animale car ses effets ne sont pas toujours très visibles, elles peuvent être influencées par d'autres facteurs comme la nutrition, les conditions zootechniques et elles peuvent avoir une dimension temporelle (la maladie peut avoir un impact différent selon le moment où elle apparaît dans l'élevage) et se manifestent souvent en concomitance avec d'autres maladies (Dijkhuizen et Morris, 1997). De plus, la santé animale est rarement abordée d'un point de vue macro-économique, c'est-à-dire en prenant en compte les effets dans d'autres secteurs.

L'évaluation économique des systèmes de surveillance de santé animale s'appuie donc la plupart du temps sur des méthodes permettant d'estimer les coûts et les conséquences des dispositifs d'un point de vue micro-économique, afin de comparer les différentes options possibles. Pour toutes ces analyses, il est important de préciser le point de vue (État, éleveurs, grand public, industries agroalimentaires...) qui est adopté. En effet, certains items peuvent représenter un coût pour un certain point de vue mais pas pour un autre (par exemple, le blocage de l'élevage en cas de suspicion d'une maladie réglementée entraîne un coût pour l'éleveur mais pas pour l'État).

Drummond et ses collaborateurs (Drummond *et al.*, 2005) ont répertorié les quatre principales méthodes d'évaluation économique. Elles se distinguent les unes des autres par leur façon de mesurer et d'évaluer les conséquences, et sont présentées ci-après.

1.4.1. L'analyse de minimisation des coûts (AMC)

Cette méthode est indiquée lorsque l'on souhaite comparer des dispositifs de même performance. L'analyse de l'efficacité de ces dispositifs revient alors à les comparer uniquement en termes de coût et à rechercher la solution la moins coûteuse. On peut également s'intéresser à la répartition des coûts de chaque dispositif. Par exemple en santé animale, certains coûts sont pris en charge par l'État et d'autres par les éleveurs, selon le dispositif de surveillance les coûts peuvent se distribuer différemment entre ces deux acteurs.

L'AMC peut être considérée comme une forme particulière d'analyse coût-efficacité pour laquelle les conséquences des protocoles comparés sont équivalentes.

1.4.2. L'analyse coût-efficacité (ACE)

L'analyse coût-efficacité permet de **comparer des protocoles qui ont le même résultat attendu**, par exemple la comparaison de deux composantes d'un système de surveillance selon leur sensibilité. On étudie alors l'importance des coûts liés à un seul type d'effet. Le résultat de ces comparaisons peut être exprimé soit **en effet par unité de coût** (par exemple nombre d'années de vie gagnées/euros dépensés ou nombre de troupeaux détectés infectés/euros dépensés) soit **en coût par unité d'effet** (euros dépensés pour une année de vie gagnée, coût par foyer détecté). On peut ensuite comparer les programmes deux à deux par le calcul d'un ratio coût-efficacité. L'expression du résultat en coût par unité d'effet est particulièrement utile lorsqu'il existe une contrainte de budget et tant que les protocoles étudiés ne sont pas radicalement différents (Drummond *et al.*, 2005). Toutefois, les résultats d'une analyse coût-efficacité peuvent être difficiles à interpréter (Garber et Phelps, 1997). En effet, la comparaison des ratios permet de déterminer le protocole le plus coût-efficace, ce qui ne garantit pas de choisir un protocole efficace. De plus, un seul effet peut être étudié, ce qui peut être considéré comme réducteur puisque la qualité d'un dispositif repose également sur d'autres attributs tels que sa faisabilité ou sa flexibilité par exemple (cf. paragraphe 1.2).

L'analyse coût-conséquence désigne chez certains auteurs une variante de l'analyse coût-efficacité qui présente aux décideurs plusieurs mesures de résultats pour un même programme, en leur laissant le choix de statuer sur leur importance relative.

L'ACE comptabilise les conséquences de systèmes de lutte en unités naturelles (telles que le nombre d'années de vie gagnées ou le nombre de foyers effectivement découverts) ; un seul effet, commun à toutes les options étudiées, est pris en compte. La clef est alors de choisir un attribut pertinent en fonction de l'objectif de la surveillance, afin de fournir une information utile à la prise de décision. L'attribut utilisé comme représentant le bénéfice de chaque protocole étudié est, dans la plupart des évaluations de santé animale, la sensibilité du dispositif (Drewe *et al.*, 2012).

1.4.3. L'analyse coût-bénéfice (ACB)

L'ACB s'intéresse à la comparaison de protocoles ayant des effets communs mais multiples, ou dont les effets ne sont pas tous communs. Pour cela, cette méthode **mesure les effets de chaque protocole en unité monétaire** ce qui permet ensuite de comparer entre eux des protocoles aux effets très différents ou d'évaluer l'intérêt de la mise en place d'un dispositif en comparant ses bénéfices à son coût total (les bénéfices devant au moins être égaux aux coûts). Les résultats d'une telle analyse peuvent être présentés sous la forme soit d'un **ratio coût-bénéfice**, soit d'une simple somme représentant le **bénéfice net** (ou la perte) d'un programme par rapport à un autre, calculé en soustrayant le coût du programme à la valeur de son ou ses bénéfice(s) exprimé(s) dans la même unité monétaire.

La **difficulté de cette méthode est d'évaluer les bénéfices de santé en unité monétaire** (Drewe *et al.*, 2012). Pour cela, en santé publique, certains auteurs évaluent la « propension à payer » des individus pour des bénéfices de santé, c'est-à-dire combien ils seraient prêt à payer pour obtenir un bénéfice

donné ou alors leur propension à payer pour éviter les coûts (Narrod *et al.*, 2012). En santé animale, les bénéfices d'un dispositif de surveillance semblent plus faciles à estimer en unité monétaire. En effet, ils peuvent être exprimés en terme de conséquences économiques de l'infection évitées par une détection précoce permettant une réaction rapide (Scott *et al.*, 2012). Par exemple, il est possible d'estimer, dans un premier temps grâce à la modélisation, le nombre d'animaux qui ne vont pas mourir à cause de l'infection (en comparant à une situation hypothétique où le dispositif à évaluer ne serait pas en place). Sa multiplication par la valeur commerciale des animaux en question peut ainsi fournir une estimation du bénéfice du protocole en unité monétaire (RISKSUR, 2013). Si cette approche est impossible ou ne suffit pas, les bénéfices non monétaires peuvent également être évalués *via* la « propension à payer » des acteurs.

L'inconvénient de devoir attribuer une valeur monétaire à un bénéfice de santé pousse de nombreux scientifiques à préférer l'ACE à l'ACB (Garber et Phelps, 1997). De plus, l'ACE est moins lourde à mettre en œuvre et peut donc plus facilement être utilisée pour évaluer différentes actions possibles pratiquement en temps réel (Babo Martins et Rushton, 2014).

1.4.4. L'analyse coût-utilité (ACU)

L'ACU est préférée par les analystes qui émettent des réserves quant à l'évaluation monétaire des bénéfices qui peut être discutable, particulièrement en santé publique où il s'agit de définir la valeur monétaire d'une vie humaine. Dans cette méthode, le bénéfice des dispositifs comparés (dont les effets peuvent être différents) sont mesurés en années de vie passées en bonne santé ou QUALYS (*Quality-Adjusted life years*), correspondant aux années de vie gagnées ajustées sur leur qualité. Cette méthode est très utilisée en santé publique, notamment pour comparer des programmes de santé qui prolongent la vie en contrepartie d'effets secondaires importants, par exemple les chimiothérapies. Elle n'est toutefois pas utilisée en santé animale car il n'existe pas de mesure d'efficacité standardisée semblable au QUALYS (RISKSUR, 2013). Cependant, il est possible de l'utiliser si l'on s'intéresse à des dispositifs appliqués en élevage pour contrôler des zoonoses dans un objectif de santé publique. Il est alors possible d'estimer dans un premier temps l'efficacité du dispositif pour la réduction de la prévalence de l'infection chez les animaux, et d'en déduire ensuite l'effet en santé publique en QUALYS. Cela a par exemple été réalisé pour évaluer les mesures de lutte en élevage pour réduire la présence de *Campylobacter* dans la viande des poulets de chair (Pitter *et al.*, 2018). Cette approche est toutefois marginale en santé animale.

Les évaluations économiques sont fréquemment utilisées pour comparer des dispositifs en santé animale et en santé publique. Leurs résultats peuvent aider à la prise de décision. Toutefois, elles négligent le plus souvent la répartition des coûts qui peut être un aspect primordial dans la prise de décision. De plus, certains attributs comme ceux en lien avec les aspects humains du système (acceptabilité, faisabilité, etc.), pourtant identifiés comme majeurs dans la qualité d'un système de surveillance, ne sont pas systématiquement évalués (cf. paragraphe 1.2). Certains bénéfices des dispositifs difficiles à mesurer tels que le gain de la confiance des consommateurs, l'acceptabilité du risque, le bien-être animal, etc. ne sont pas pris en compte malgré leur intérêt. Pour une prise de décision éclairée, d'autres approches complémentaires sont donc nécessaires.

1.5. Évaluation des aspects humains d'un système de surveillance

1.5.1. L'importance des aspects humains

Un système de surveillance peut sembler idéal dans ses aspects technico-économiques mais n'avoir aucune efficacité sur le terrain du fait d'un défaut d'investissement de certains de ses acteurs ou d'un défaut de communication entre eux. En effet, l'efficacité d'un système de surveillance repose en très grande partie sur ses acteurs et sur leur investissement dans le dispositif. Cet investissement peut dépendre d'une large variété de facteurs, allant de leur **capacité matérielle** à leur **volonté** à suivre les

pratiques prescrites (Pfeiffer, 2006). Selon Pfeiffer (2006), un des facteurs majeurs de cette volonté d'application est leur **perception du risque** engendré par la maladie considérée : plus ils le perçoivent comme important, plus ils sont enclins à s'investir dans le dispositif de surveillance. De plus, les **conséquences de la détection** d'un agent pathogène dans un élevage (blocage des échanges, abattage total ou partiel des animaux) peuvent également influencer négativement l'acceptabilité du système telle que définie par le guide d'évaluation des systèmes de surveillance de santé publique américain (CDC, 2001) – c'est-à-dire comme l'attribut reflétant l'envie d'une personne ou d'une organisation à participer au système de surveillance- (Delabouglise *et al.*, 2017 ; Pham *et al.*, 2017).

Par ailleurs, la pérennité du système de surveillance dépend également des moyens qui lui seront alloués sur le long terme. L'identification des **acteurs impliqués dans le financement** du dispositif est donc importante, ainsi que la compréhension de leur motivation et de leurs prises de décision afin de les prendre en compte dans la gestion du système, notamment en terme de **communication des résultats**.

Les aspects humains d'un système de surveillance font donc appels aux notions de perception, de compréhension des mécanismes de prise de décision et de relations entre les acteurs. Pour les évaluer, des approches empruntées aux sciences sociales doivent-être utilisées. La sous partie suivante présente succinctement quelques notions de base sur la recherche en sciences sociales.

1.5.2. La recherche en science sociale

En sciences sociales, il existe différentes approches de recherche répondant à des principes logiques différents. L'approche qualitative permet, à partir de retours de terrain (entretiens, observations), d'établir des hypothèses et théories sur un phénomène étudié. L'approche quantitative repose sur la réalisation d'expérimentations qui permettent de tester des hypothèses et éventuellement de mettre en évidence des relations de cause à effet par une approche dite hypothético-déductive. Ces deux approches sont complémentaires puisque les hypothèses émises suite à une approche qualitative peuvent ensuite être testées par une approche quantitative.

1.5.2.1. Les approches qualitatives en sciences sociales

Les approches qualitatives ont pour but de comprendre et non pas d'expliquer des phénomènes. Elles sont utilisées pour faire émerger des hypothèses et non pour les vérifier (Bryman, 1984), pour comprendre en profondeur un phénomène ou un contexte de terrain, ou pour capturer les pratiques d'un groupe social précis et le sens qu'il leur donne. Elles s'appuient notamment sur des observations directes, un travail sur archives et/ou des entretiens. L'**entretien** est une technique centrale de la démarche qualitative. Il s'agit d'une interaction entre le chercheur et la personne sollicitée, dans l'objectif explicite d'une étude sociologique. Ces entretiens peuvent être **semi-directifs** : les questions posées doivent être les plus ouvertes possibles, l'objectif étant de laisser la personne sollicitée s'exprimer librement et de la façon la plus complète possible sur le thème d'intérêt. Les données ainsi collectées présentent l'intérêt d'être riches, de donner un accès à la complexité des représentations individuelles et permettent de faire émerger des idées et des hypothèses parfois inattendues. Les entretiens semi-directifs s'appuient sur des guides d'entretien qui définissent les thèmes à aborder avec la personne enquêtée. Il arrive fréquemment que ces guides évoluent en cours d'étude à la lumière des entretiens précédents. Le **nombre d'entretiens à réaliser n'est pas fixé a priori** ; on considère que le nombre d'entretiens est optimal à partir du moment où la **saturation théorique** est atteinte, c'est-à-dire quand plus aucune idée nouvelle n'est exprimée au cours des entretiens (Crano *et al.*, 2015).

1.5.2.2. Les approches quantitatives en sciences sociales

Les approches quantitatives en sciences sociales permettent généralement de tester des théories. En sciences sociales, les échelles sont souvent utilisées pour la mesure de certaines variables ordinales. La plupart ont été développées dans le but de vérifier le principe de distance (c'est-à-dire le fait que les écarts entre les valeurs prises par la variable sont interprétables), en s'appuyant sur les travaux de

Cox selon lesquels sept modalités de réponse seraient le nombre optimal pour une échelle. En effet, cela permettrait de pouvoir assimiler les variables obtenues à des variables quantitatives métriques plus aisément manipulables (Cox, 1980). De plus, selon Miller (Miller, 1956), les individus posséderaient une capacité de discernement des catégories autour du nombre sept (plus ou moins deux). Ainsi, proposer un nombre inférieur de catégories entrainerait une perte de nuance dans l'information, alors qu'en proposer plus diminuerait la validité de la réponse car la personne interrogée ne serait plus cognitivement capable de faire la distinction entre les catégories proches.

Un enjeu important dans les approches quantitatives est la question de la mesure des indicateurs d'intérêt. En effet, en sociologie, on étudie des « faits sociaux » difficilement mesurables, souvent complexes et qui ne peuvent pas être synthétisés en une unique variable mesurable par une valeur réelle. Par exemple, l'intention a souvent été utilisée comme indicateur permettant de prédire le comportement ou le choix d'un décideur, jusqu'à ce qu'un écart important entre les résultats de la mesure d'intentionnalité et le comportement avéré soit mis en évidence (50 % de mauvaises prédictions des choix d'un consommateur) (Dubois et Quaghebeur, 1997). Il faut donc identifier les k variables Y_k permettant de décrire le mieux possible le concept d'intérêt, puis mesurer chacune de ces variables. En 1979, Churchill a proposé un paradigme pour le développement d'outils de mesure en sciences sociales, synthétisé dans le tableau 1.

Tableau 1. Résumé du paradigme de Churchill pour le développement d'un outil de mesure en sciences sociales (Churchill, 1979)

Étapes du processus d'élaboration	Modalités d'évaluation
1- Définir le concept étudié	Revue de la littérature, entretiens libres
2- Générer un échantillon de variables potentiellement utilisables pour mesurer ce concept	Littérature, introspection, entretiens semi-directifs...
3- Collecte de données primaires	$n > 30$, sur un échantillon avec des caractéristiques proches de la population d'intérêt
4- "Purification" de la mesure : suppression des variables qui s'éloignent du sujet	Coefficient alpha de Cronbach ⁽¹⁾ , Split-half ⁽²⁾ , analyse en composante principale
5- Collecte de données	$n > 200$
6- Estimer la fiabilité de la mesure	Coefficient alpha de Cronbach ⁽¹⁾ , Split-half ⁽²⁾
7- Estimer la validité de la mesure	Procédure de validation discriminante ⁽³⁾ et convergente ⁽⁴⁾ , et validation nomologique ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ $\alpha = \frac{k}{k-1} * \frac{1-k}{k+2 \sum_{ij} r_{ij}}$ avec k le nombre de variables, n la taille de l'échantillon and r_{ij} le coefficient de corrélation

entre les variables i et j (Cronbach, 1951). α est compris entre zéro et un. Si $\alpha = 0$, les corrélations entre les variables sont nulles et en conséquence l'outil de mesure n'est pas fiable puisqu'il n'a aucune cohérence interne. Si $\alpha = 1$, la mesure est parfaitement fiable. On considère la fiabilité de la mesure satisfaisant si $\alpha > 0,7$ (Nunnally, 1967).

⁽²⁾ L'échantillon est divisé aléatoirement en deux parties suffisamment grandes, les résultats des mesures obtenues pour les deux échantillons et pour l'échantillon global doivent être très proches.

⁽³⁾ Deux mesures de deux concepts différents et indépendants doivent produire des résultats non corrélés.

⁽⁴⁾ Deux mesures du même concept doivent produire des résultats convergents (fortement corrélés)

⁽⁵⁾ Deux mesures de deux concepts différents mais théoriquement liés doivent rendre compte à la fois de la direction et de l'intensité de ce lien.

La mesure des concepts soumet le chercheur à certains risques qu'il convient d'éviter. D'abord, la mesure ne donne à voir qu'une réalité altérée, et ne doit donc pas être employée de façon dogmatique. De plus, une focalisation stricte sur les critères quantitatifs n'est pas souhaitable : ils sont plus aisément manipulables mais présentent un certain appauvrissement de l'information par rapport à des données

qualitatives complexes : ainsi, utiliser uniquement des critères quantitatifs dans un souci de commodité réduirait la validité de la mesure. Enfin, la trop forte contextualisation de la mesure (outil valable uniquement dans un contexte particulier) doit être évitée car cela en réduit la portée et l'application.

Les approches quantitatives fournissent des données plus facilement manipulables et peuvent permettre de vérifier des théories par des approches expérimentales très proches de celles qui sont utilisées en épidémiologie. Toutefois, cela se fait généralement au prix d'une réduction plus ou moins importante de nuances et d'informations par rapport à des approches qualitatives.

1.5.2.3. Les applications en santé animale

De nombreux travaux ont déjà exploré la dimension humaine de la gestion des maladies en santé animale. La plupart de ces études ont utilisé des approches qualitatives ou semi-quantitatives pour étudier :

- l'acceptabilité des protocoles de surveillance (Calba *et al.*, 2016 ; Schulz *et al.*, 2016) ;
- la volonté et la capacité des acteurs à :
 - o déclarer des cas suspects en particulier pour la surveillance événementielle (Heffernan *et al.*, 2008 ; Gilbert *et al.*, 2014),
 - o mettre en place des mesures de biosécurité (Sayers *et al.*, 2014 ; Brennan *et al.*, 2016 ; Renault *et al.*, 2018b) ou des mesures de contrôle (Ellis-Iversen *et al.*, 2010),
 - o respecter des protocoles réglementaires (Rivière *et al.*, 2018),
- le mécanisme de la prise de décision d'acteurs lorsqu'un cas est détecté (Gilbert *et al.*, 2014).

La prise de conscience croissante de l'importance de la dimension humaine dans le fonctionnement d'un système de surveillance a entraîné le développement des approches d'épidémiologie participative qui sont à mi-chemin entre la sociologie et l'évaluation technique d'un système de surveillance, puisqu'elles impliquent les acteurs de terrain dans l'évaluation du système et dans la recherche de solution (Bardsley et Thrusfield, 2014 ; Calba *et al.*, 2016 ; Bach *et al.*, 2017). Récemment, une évaluation de l'acceptabilité de différentes stratégies de surveillance de la peste porcine classique chez le sanglier en Allemagne par cette méthode a permis de comparer les protocoles entre eux et de fournir des informations d'aide à la décision pour l'optimisation de ce dispositif (Schulz *et al.*, 2016). En 2017, l'influence sur l'efficacité du dispositif de la mise en place de compensations financières des éleveurs en cas de détection de la maladie surveillée a été mise en évidence, en particulier pour la déclaration des maladies porcines au Vietnam (Pham *et al.*, 2017).

Ainsi, les facteurs humains des dispositifs de surveillance et notamment leur acceptabilité auprès des acteurs le constituant sont à présent largement identifiés en tant que facteur d'importance assurant le bon fonctionnement et la pérennité d'un dispositif. De nombreuses études s'attachent à mieux les comprendre et à les investiguer, et ils sont désormais en partie pris en compte dans les méthodes d'évaluation des dispositifs, *via* des estimations qualitatives d'acceptabilité et de communication entre les acteurs comme ce qui est proposé par exemple dans la méthode OASIS (Hendrikx *et al.*, 2011).

En santé animale, bien que les facteurs humains des systèmes de surveillance soient de plus en plus investigués et que plusieurs méthodes d'évaluation (comme la méthode OASIS) tentent de prendre en compte ces aspects, l'approche utilisée est la plupart du temps partielle et teintée de subjectivité. De plus, les outils d'évaluation économique ayant pour vocation d'aider à la sélection du dispositif le plus approprié ne prennent pas en compte ces aspects, qui sont souvent évalués séparément après mise en place des dispositifs de surveillance, plus fréquemment dans une logique d'amélioration plutôt que de choix des protocoles à mettre en place.

1.6. Évaluation intégrée des attributs d'un système de surveillance

1.6.1. Les difficultés de l'évaluation des systèmes de surveillance en santé animale et la nécessité d'une prise en compte multicritère

L'évaluation complète d'un système de surveillance comporte donc trois pans principaux (technique, économique et humain) qui peuvent-être évalués séparément. Toutefois, ces trois aspects sont intimement liés. Un défaut dans l'un des trois peut avoir un impact sur les deux autres. Par exemple, une adaptation des pratiques des acteurs par rapport aux recommandations peut entraîner des surcoûts sur le long terme et diminuer l'efficacité du système de surveillance. Mais les effets peuvent également être inversés : en particulier, investir beaucoup d'argent dans un système peut permettre une amélioration de ses performances au détriment de sa « rentabilité ». Si la mise en place et le fonctionnement d'un système de surveillance repose toujours sur les acteurs de terrain, la décision d'initiation d'un programme de surveillance pour une infection donnée, l'allocation de fond pour son fonctionnement ainsi que le maintien du programme relève des stratégies des politiques publiques. Or, les décideurs doivent tenir compte des trois aspects. Pour faire le choix des protocoles de surveillance à appliquer, ils doivent prendre en considération tous les critères évoqués précédemment auxquels peuvent parfois s'ajouter des critères politiques (opinion publique, réglementation européenne...). Toutefois, ces critères évoluant parfois en sens inverse, il devient vite difficile de prendre une décision objective qui prendrait en compte toutes les informations scientifiques et socio-économiques disponibles. De plus, la prise en compte quantitative de ces trois pans de la surveillance dans une unité commune est impossible, ce qui interdit l'utilisation d'une analyse monocritère (Roy et Bouyssou, 1993). Les méthodes d'aide à la décision multicritère, empruntées à d'autres disciplines notamment l'économie et l'écologie, peuvent donc être un atout pour les aider dans leurs choix. En effet, ces méthodes permettent de classer différentes alternatives d'actions en fonction de multiples critères, afin d'identifier une solution optimale selon les critères choisis et les poids attribués à chacun d'eux.

1.6.2. Méthodes multicritères fondées sur l'efficacité de Pareto

L'efficacité de Pareto stipule qu'une option est préférable à une autre si elle est considérée comme meilleure sur au moins un critère et est au moins aussi bonne sur tous les autres critères (Monjardet, 2012). Cette méthode considère que chaque critère est équivalent (il y a donc compensation entre les critères). Dans le cadre de la recherche de l'alternative la plus efficace, il est rare de pouvoir identifier la solution qui satisfasse l'optimum de Pareto. En effet, cette situation est rarement rencontrée dans les problèmes de décision multicritère : certains critères comme par exemple le coût et l'efficacité sont souvent inversement proportionnels.

1.6.3. Méthodes multicritères fondées sur la relation de surclassement (préférence)

Il est donc souvent nécessaire d'utiliser des méthodes de surclassement pour lesquelles on introduit un système de représentation des préférences du ou des décideur(s) pour chaque critère, ainsi qu'un système de représentation de l'importance relative des critères dans le problème de décision. Dans ces méthodes, contrairement aux méthodes fondées sur l'efficacité de Pareto, les critères ne sont pas compensatoires et l'incomparabilité entre les alternatives est acceptée.

Le problème de décision à résoudre doit être dans un premier temps défini. Pour cela, les alternatives à étudier sont décrites par un ensemble de critères et sous-critères, de façon à représenter le plus exhaustivement possible le problème de décision multicritère en question. L'ensemble des critères choisis doit respecter trois principes définis ci-après (Roy et Bouyssou, 1993) :

- **L'exhaustivité** : Si l'ensemble des critères de deux alternatives prennent les mêmes valeurs alors elles sont indifférentes. En pratique, pour tester l'exhaustivité d'un ensemble de critères choisis, il

convient de se demander s'il est possible d'imaginer deux alternatives identiques selon l'ensemble des critères mais pour lesquelles il existe tout de même des arguments permettant de refuser la relation d'indifférence entre elles.

- **La cohésion** : si on augmente la valeur d'un critère d'une alternative, la nouvelle alternative ainsi définie doit être préférée à l'alternative initiale.

- **La non redondance** : les critères superflus car redondants doivent être évités.

Tout ensemble de critère (C) vérifiant ces trois principes forment ce qu'on appelle une **famille cohérente de critères**.

Une fois le problème de décision décrit, les méthodes d'analyse multicritère permettent de prendre en compte les préférences du ou des décideur(s) que le modèle de décision cherche à éclairer, pour classer les différentes alternatives par ordre de préférence ou générer des groupements d'alternatives en fonction de ces préférences. Deux familles de méthode existent : les méthodes d'agrégation complète et les méthodes d'agrégation partielle.

1.6.3.1. Méthodes d'agrégation complète (ou agréger et comparer)

1.6.3.1.1. Principe des méthodes d'agrégation complète

Ces méthodes consistent à attribuer à chaque alternative un score, appelé **utilité globale** (notée U), représentatif des préférences des décideurs. Pour chaque alternative du problème, les critères sont mesurés par une valeur numérique, appelée **utilité marginale**. Ces valeurs sont ensuite agrégées par un calcul introduisant des **pondérations** attribuées à chaque critère, reflétant les préférences des décideurs, pour fournir un score global (U) pour l'alternative (la plupart du temps *via* une moyenne pondérée) (Roy et Bouyssou, 1993). **La meilleure alternative, selon les préférences du décideur, sera alors celle avec le score (utilité globale U) le plus élevé.** Dans ce type de méthode se pose la question des méthodes permettant d'attribuer les poids des critères (notés w_{ci}) et d'estimer les utilités marginales. Les méthodes d'agrégation complète permettent une égalité entre les critères et les alternatives (quand leurs utilités globales sont égales) mais il est impossible de considérer que les alternatives sont incomparables.

1.6.3.1.2. La méthode AHP (Analytical hierarchy process)

La méthode précurseur de cette famille fut la méthode AHP (Saaty, 1986), qui se fonde sur l'utilisation de l'échelle de Saaty (Saaty, 1977) pour l'estimation des poids. Le décideur doit exprimer selon une échelle qualitative à 5 catégories (même importance, légèrement plus important, plus important, beaucoup plus important et absolument plus important) l'importance relative des critères pris deux à deux. L'échelle de Saaty permet à partir de cette comparaison d'associer une valeur au ratio des poids des deux critères comparés (figure 3). Une matrice de priorité par paire en est déduite (un exemple de matrice est présenté dans le tableau 2). Le poids de chaque critère est ensuite calculé en sommant les ratios obtenus *via* sa comparaison avec les autres critères et en normalisant ensuite cette somme, tel que la somme des poids attribués à l'ensemble des critères du problème de décision soit égale à 1 (l'exemple du calcul des poids des critères C1, C2 et C3 comparés dans le tableau 2 est présenté dans le tableau 3). Pour chaque critère, en comparant qualitativement les alternatives deux à deux, la même méthode est utilisée pour attribuer une valeur aux ratios d'utilité marginale des alternatives selon ce critère. En utilisant les mêmes modalités de calcul que pour les poids, les utilités marginales de chaque alternative selon chaque critère peuvent être estimées. L'utilité marginale globale de chaque alternative est alors calculée par la moyenne des utilités marginales de chaque critère pour l'alternative, pondérée par le poids des critères.

Figure 3. Échelle de Saaty définissant cinq catégories permettant d'associer un ratio à chaque comparaison par paire des critères (Saaty, 1986)

Le critère C1 a la même importance que le critère C2 $\leftrightarrow \frac{wc1}{wc2} = 1$
Le critère C1 est légèrement plus important que le critère C2 $\leftrightarrow \frac{wc1}{wc2} = 3$
Le critère C1 est plus important que le critère C2 $\leftrightarrow \frac{wc1}{wc2} = 5$
Le critère C1 est beaucoup plus important que le critère C2 $\leftrightarrow \frac{wc1}{wc2} = 7$
Le critère C1 est absolument plus important que le critère C2 $\leftrightarrow \frac{wc1}{wc2} = 9$

Tableau 2. Exemple de matrice de priorité entre trois critères C1, C2 et C3

Dans cet exemple, le décideur a jugé C1 plus important que C2 et légèrement plus important que C3, et C3 plus important que C2.

	Critère C1	Critère C2	Critère C3
Critère C1	1	5	3
Critère C2	1/5	1	1/5
Critère C3	1/3	5	1

Tableau 3. Calcul des poids normalisés des trois critères de l'exemple présenté dans le Tableau 2

	Somme des comparaisons	Poids normalisés
Critère C1	1+5+3=9	9/16,73 = 0,54
Critère C2	1/5 + 1 + 1/5 = 1,4	1,4/16,73 = 0,08
Critère C3	1/3 + 5 + 1 = 6,33	6,33/16,73 = 0,38
total	16,73	1

1.6.3.1.3. La méthode MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique)

La méthode MACBETH peut être utilisée à partir d'un logiciel (M MACBETH), qui estime les utilités marginales et les poids des critères en fonction de l'intensité de préférence entre les critères (nulle, très faible, faible, modérée, forte, très forte et extrême) exprimée par le décideur (Bana e Costa *et al.*, 2016). L'expression de ces intensités de préférence mène à un système d'inéquations à résoudre. Par exemple, en considérant les alternatives a1, a2, a3, a4, a5 et a6 définies par un ensemble de critères $C=\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$, étudions l'intensité de préférence du décideur pour chacune de ces alternatives selon le critère c_i . Si le décideur exprime ses préférences de la façon suivante : selon le critère c_i , les alternatives a1 et a2 lui sont indifférentes, il préfère fortement a3 à a4 et il préfère faiblement a5 à a6, on obtient alors l'équation (4) et l'inéquation (5) dans lesquelles $u_i(k)$ est l'utilité marginale de l'alternative k selon le critère c_i .

$$(4) u_i(a1)=u_i(a2)$$

$$(5) u_i(a3) - u_i(a4) > u_i(a5) - u_i(a6)$$

Ainsi, en comparant les alternatives selon chacun des critères, un système d'inéquations est défini. Le logiciel résout ce système et estime des valeurs pour toutes les utilités marginales. Pour estimer les poids, il faut ensuite renseigner une matrice de préférence comparant les critères deux à deux. Leur estimation est réalisée selon la même méthode que celle permettant l'estimation des utilités marginales.

Cette méthode présente l'avantage d'être interactive : les utilités sont calculées au fur et à mesure, ce qui permet au décideur de mieux percevoir la quantification obtenue à partir de son expertise et donc

de la modifier si besoin. Une étude de consistance permet de vérifier la cohérence des informations de préférences fournies par le décideur. Le logiciel propose également une étude automatique de la robustesse du classement ainsi qu'une analyse de la sensibilité du classement final aux poids choisis. Cette analyse de sensibilité estime l'impact du choix de ces poids et permet de voir si un changement de poids d'un critère donné (le poids des autres critères ne variant pas en proportion) entraînerait un changement dans le classement des alternatives.

1.6.3.1.4. La méthode UTA (Utilité Additive)

La méthode UTA part de l'hypothèse que le décideur est initialement capable d'établir des relations de préférence sur un nombre restreint d'alternatives seulement (alternatives dites de référence). Les utilités marginales des critères sont supposées suivre des fonctions linéaires par morceaux et monotones (strictement croissantes ou strictement décroissantes) et valent 0 lorsque le critère prend sa valeur minimale. Un programme linéaire complexe est alors capable de déduire, à partir des préférences exprimées par le décideur, l'utilité globale de chaque alternative. Cette méthode peut être réalisée à partir du logiciel DIVIZ qui est disponible en libre accès.

Les méthodes d'agrégation complète présentent l'avantage de synthétiser l'ensemble des critères en un critère commun facile à interpréter, mais peuvent sembler trop artificielles lorsque les critères considérés sont de natures très différentes. De plus, elles ne permettent pas de prendre en compte d'éventuels seuils d'indifférence dans les critères (c'est-à-dire un seuil en dessous duquel, pour un critère donné une différence de la valeur de deux alternatives pour ce critère serait indifférente au décideur : elle n'entraînerait pas de préférence d'une alternative par rapport à l'autre si elles sont égales selon tous les autres critères). Cela peut être pris en compte avec des méthodes d'agrégations partielles. Enfin, les méthodes AHP et MACBETH nécessitent que le décideur exprime ses préférences sur de très nombreuses comparaisons (comparaison deux à deux de toutes les alternatives selon tous les critères et comparaison des critères deux à deux), ce qui peut vite s'avérer très fastidieux (par exemple, 40 comparaisons pour classer 4 alternatives selon 5 critères).

1.6.3.2. Méthodes d'agrégation partielle

1.6.3.2.1. Principe des méthodes d'agrégation partielle

Ces méthodes se fondent sur la règle de Condorcet : « une action en surclasse une autre si elle est au moins aussi bonne que l'autre relativement à une majorité de critères, sans être trop nettement plus mauvaise que cette autre relativement aux autres critères » (Condorcet, 1785). Les alternatives sont tout d'abord **comparées deux à deux selon chacun des critères**. Dans un second temps, ces **comparaisons sont agrégées**, ce qui permet d'obtenir un classement des alternatives.

Pour l'ensemble de ce paragraphe 1.6.3.2, on pose : $A=\{a_1, a_2, \dots, a_j\}$ l'ensemble des alternatives du problème de décision, $C=\{c_1, \dots, c_k\}$ les critères utilisés pour décrire chaque alternative et w_i le poids du critère c_i . On note $g_i(a_l)$ la description de a_l selon le critère c_i , $i \in [1, k]$ et $l \in [1, j]$.

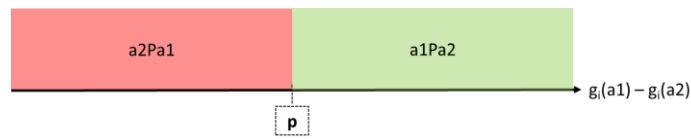
Dans ces méthodes, on définit deux types de critères :

- Les **critères gains** ou critères à maximiser tels que le décideur préfère a_1 à a_2 quand $g_i(a_1) > g_i(a_2)$
- Les **critères coût** ou critère à minimiser tels que le décideur préfère a_1 à a_2 quand $g_i(a_1) < g_i(a_2)$

Afin de pouvoir comparer les alternatives selon chacun des critères, des seuils doivent être définis avec le décideur. On distingue trois type de critères, selon les seuils que l'on choisit de leur fixer (Vanderpooten, 2008).

Les critères au sens strict, pour lesquels seul un **seuil de préférence (p)** est défini. C'est la valeur à partir de laquelle le décideur va préférer l'alternative a_1 à l'alternative a_2 ($a_1 Pa_2$), tous autres critères égaux par ailleurs (figure 4). Par exemple, si on doit faire le choix d'un protocole de surveillance et que l'on s'intéresse au critère sensibilité, il faut définir à partir de quelle différence de sensibilité le décideur va préférer mettre en œuvre le protocole 1 plutôt que le 2.

Figure 4. Schéma de la relation de préférence entre les alternatives a_1 et a_2 selon un **critère à maximiser au sens strict** c_i avec un seuil de préférence p , en fonction de la différence de valeur du critère entre les alternatives a_1 et a_2 ($g_i(a_1) - g_i(a_2)$)



Les **quasi-critères**, pour lesquels seul un **seuil d'indifférence (q)** est défini. Il s'agit de la valeur en dessous de laquelle le décideur ne fait pas de différence entre les alternatives 1 et 2 (a_1Ia_2 et a_1Ia_1) ; c'est-à-dire la différence qu'il considère comme négligeable (figure 5).

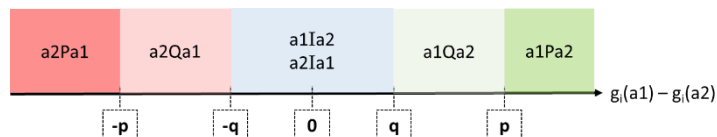
Figure 5. Schéma de la relation de préférence entre les alternatives a_1 et a_2 selon un **quasi-critère à maximiser** c_i avec un seuil d'indifférence q , en fonction de la différence de valeur du critère entre les alternatives a_1 et a_2 ($g_i(a_1) - g_i(a_2)$)



Remarque = a_2Pa_1 quand $g_i(a_2) - g_i(a_1) > q$, donc quand, comme sur le schéma, $g_i(a_1) - g_i(a_2) < -q$

Les **pseudo-critères**, pour lesquels on définit deux seuils : le seuil d'indifférence q , tel que défini ci-dessus, et le seuil de préférence faible (p) qui établit une zone intermédiaire correspondant à une différence pour laquelle le décideur préfère tout de même l'action a_1 mais cette préférence est moins importante qu'en cas de préférence forte P (figure 6). On introduit ainsi la notion de préférence faible (Q) par opposition à la préférence forte (P).

Figure 6. Schéma de la relation de préférence entre les alternatives a_1 et a_2 selon un **pseudo-critère à maximiser** c_i avec un seuil d'indifférence q et un seuil de préférence faible p , en fonction de la différence de valeur du critère entre les alternatives a_1 et a_2 ($g_i(a_1) - g_i(a_2)$)



La **notion de veto** peut également être introduite pour certains critères. Un seuil est alors défini à partir duquel l'alternative avec un critère supérieur à ce seuil ne peut pas être préférée par le décideur, même si cette alternative est préférée selon tous les autres critères.

La définition de ces seuils permet d'établir un modèle de comparaison des alternatives selon chaque critère, afin de comparer les alternatives deux à deux. Un modèle d'agrégation de ces comparaisons est ensuite défini, de façon différente pour chaque méthode afin de générer un classement des alternatives.

1.6.3.2.2. Choix des poids des critères

La question du choix des poids des critères est centrale dans l'analyse multicritère, et de nombreuses méthodes existent (Rogers et Bruen, 1997). La première, décrite par Hokkanen et Salminen en 1994, consiste à demander au décideur d'exprimer sa préférence directement en attribuant un poids à chaque critère (Hokkanen et Salminen, 1997). Simos (Simos, 1990) utilise des cartes représentant les critères, le décideur doit ranger les cartes par ordre d'importance des critères, autorisant les exæquo et utilisant des cartes blanches pour renforcer les écarts entre les critères. La troisième méthode (Mousseau, 1995) s'appuie sur des méthodes mathématiques et des théories psychologiques. Elle permet de déterminer pour l'ensemble des poids l'intervalle de valeurs admissibles à partir d'inégalités

linéaires entre ces coefficients. Ces inégalités sont posées grâce aux réponses des décideurs sur les comparaisons binaires d'alternatives fictives différentes les unes des autres sur un maximum de trois critères. Roy et Bouyssou (1993) énoncent les principes à respecter pour l'estimation des poids des critères selon cette méthode :

1. Elle doit reposer sur un dialogue entre le décideur et le chercheur,
2. Il faut éviter d'interroger directement sur la valeur des poids, mais plutôt formuler les questions en terme d'actions à comparer,
3. Les alternatives à comparer doivent être réalistes mais non réelles. Si elles sont irréalistes, on risque d'obtenir des réponses arbitraires de l'interrogé confronté à des situations nouvelles par rapport à son expérience. Si elles sont trop réalistes, cela entraînerait des réponses prenant en compte des aspects trop particuliers des actions volontairement mis de côté,
4. Lorsqu'un jugement de préférence est demandé entre deux alternatives, elles doivent être précisément définies par l'ensemble des valeurs qu'elles prennent selon chaque critère et les deux alternatives ne doivent pas différer de plus de trois critères (sinon il y a une trop grande difficulté de comparaison). Pour chaque critère leur différence doit être un peu supérieure au seuil de préférence sans trop se rapprocher du seuil de véto,
5. Il faut utiliser une alternative de référence a_0 dont les performances $g_j(a_0)$ se situent au voisinage de la médiane des performances des alternatives réelles,
6. Il faut limiter autant que possible le nombre de questions à poser afin de ne pas provoquer un phénomène de saturation chez la personne interrogée ce qui pourrait être néfaste à la qualité de ses réponses.

Cette dernière méthode est considérée par Rogers et Bruen (1997) comme la plus juste sur le plan des théories mathématiques et psychologiques mais est complexe à mettre en œuvre. C'est pourquoi ils proposent une alternative, à mi-chemin entre les différentes méthodes d'estimation des poids des critères. Dans cette méthode, chaque critère est listé en y associant une **estimation qualitative** désirable et une indésirable. Par exemple, pour le critère « sensibilité » qui interviendrait dans le choix d'un protocole de dépistage, on pourrait poser : « très sensible » / « très peu sensible ». Chaque critère est donc exprimé par ses extrêmes. Les critères sont ensuite comparés deux à deux : on place le décideur dans la situation idéale où les deux critères à comparer seraient optimum. On lui indique ensuite qu'un des deux critères doit changer en son extrême indésirable. Le décideur doit choisir celui des deux critères pour lequel il est le moins enclin à autoriser ce changement. Toutes les paires de critères doivent être ainsi comparées, ce qui permet de construire une matrice de comparaison. Pour chaque critère, le nombre de fois où le décideur a refusé de le faire passer à une valeur indésirable est comptabilisée, ce qui permet de calculer le score de résistance du critère. Le poids final de chaque critère est obtenu en normalisant les scores de résistance. Des exemples concrets de l'estimation des poids sont disponibles dans Meskens et Roubens (2011).

1.6.3.2.3. La méthode ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité)

La méthode ELECTRE, développée en 1960 par Bernard Roy, est la plus souvent utilisée. Il existe différents développements de cette méthode, qui n'ont pas tous le même objectif. Par exemple, parmi les plus utilisées, ELECTRE IS permet au décideur de choisir, parmi un ensemble d'alternatives, le sous ensemble le plus petit contenant la meilleure alternative (Roy et Bouyssou, 1993). ELECTRE III permet de proposer une recommandation sous la forme d'un classement où l'incomparabilité et les exæquos entre les alternatives sont permis (Maystre *et al.*, 1994) : c'est cette méthode que nous détaillons ci-dessous. Les méthodes ELECTRE s'intéressent à des relations de surclassement, c'est-à-dire de préférence ou de présomption de préférence. On dit que l'alternative a_1 surclasse l'alternative a_2 ($a_1 Sa_2$) si elle est au moins aussi bonne que a_2 , donc si a_1 est préférée à a_2 ou si a_1 et a_2 sont indifférents. Dans cette méthode, des **pseudo-critères** sont utilisés (1.6.3.2.1), un seuil d'indifférence et un seuil de préférence sont donc définis pour chaque critère.

L'étape préliminaire de cette méthode est de définir le poids des critères, les seuils d'indifférence et de préférence et les seuils véto avec le ou les décideur(s). Le poids des critères rend compte de leur importance dans la prise de décision. Une fois ces paramètres définis, la première étape de la méthode

ELECTRE III consiste à calculer pour chaque critère les **indices de concordance partiels** des alternatives comparées deux à deux. Ces indices traduisent la concordance des données avec l'affirmation « **a₁ est au moins aussi bon que a₂ selon le critère c_i** ». On note $\sigma_i(a_1, a_2)$ l'indice de concordance relatif à cette affirmation. Il varie, selon la valeur de la différence $g_i(a_1) - g_i(a_2)$ lorsqu'on la compare aux seuils d'indifférence et de préférence (figure 6), entre 0 (a_2 est préféré à a_1 selon le critère c_i) et 1 (a_1 et a_2 sont indifférents ou a_1 est préféré à a_2). Lorsque a_1 est faiblement préféré à a_2 (figure 6), $\sigma_i(a_1, a_2)$ s'obtient par résolution de l'équation (6) si le critère est à maximiser et (7) si il est à minimiser.

$$(6) g_i(a_2) = (q_i - p_i) * \sigma_i(a_1, a_2) + g_i(a_1) + p_i$$

$$(7) g_i(a_2) = (p_i - q_i) * \sigma_i(a_1, a_2) + g_i(a_1) + q_i$$

Un indice de concordance globale de l'affirmation « a_1 est au moins aussi bon que a_2 », noté $\sigma(a_1, a_2)$, s'obtient alors par l'équation (8)

$$(8) \sigma(a_1, a_2) = \frac{\sum_{i \in [1, k]} w_i * \sigma_i(a_1, a_2)}{\sum_{i \in [1, k]} w_i}$$
 avec w_i le poids du critère g_i et $\sigma_i(a_1, a_2)$, l'indice de concordance de l'affirmation « a_1 est au moins aussi bon que a_2 selon le critère c_i ».

Puis, on calcule **les indices de discordance** des alternatives comparées deux à deux selon chaque critère, noté $d_i(a_1, a_2)$ (indice de discordance de l'affirmation « **a₁ est au moins aussi bon que a₂ selon le critère c_i**). Cet indice permet d'examiner les cas où a_1 est moins bonne que a_2 en mesurant la diminution de l'indice de concordance. L'indice de discordance a une valeur minimale de 0 quand il n'y a pas de raison de réfuter l'affirmation « a_1 est au moins aussi bonne que a_2 ». Si d'après le critère c_i à maximiser, le décideur montre un fort désaccord avec l'affirmation « a_1 est au moins aussi bonne que a_2 », c'est-à-dire que $g_i(a_2) - g_i(a_1) >$ seuil de véto (V), alors l'indice de discordance est égal à 1. Entre ces deux situations, $d_i(a_1, a_2)$ se calcule selon l'équation : (9) $d_i(a_1, a_2) = \frac{g_i(a_2) - g_i(a_1) + p_i}{V_i - p_i}$. Si il n'y a pas de seuil véto, alors $d_i(a_1, a_2) = 0$ pour toutes les paires d'alternatives.

Ces indices de concordance et de discordance permettent le calcul des **degrés de crédibilité globaux** ($\delta(a_x, a_y)$) avec x et $y \in [1, j]$ et $x \neq y$) des relations de surclassement entre chaque alternative prises deux à deux (c'est-à-dire la crédibilité de l'affirmations « a_x est au moins aussi bon que a_y »). Ce degré de crédibilité est calculé en pondérant l'indice de concordance global ($\sigma(a_x, a_y)$) par un coefficient d'autant plus petit que les indices de discordance $d_i(a_x, a_y)$ selon chaque critère c_i sont proches de 1.

La phase finale de la méthode ELECTRE III consiste à **exploiter les indices de surclassement par paires** via les **distillations ascendante** (on sélectionne la moins bonne alternative en premier puis on classe les autres alternatives de la moins bonne à la meilleure) **et descendante** (on sélectionne en premier l'alternative la meilleure et ainsi de suite pour obtenir un classement des alternatives de la meilleure à la moins bonne). Ces classements sont réalisés grâce à un algorithme complexe qui compare deux à deux les indices de surclassement grâce à un seuil de discrimination de l'indice de crédibilité qui traduit l'écart maximal qu'il peut y avoir entre l'indice de crédibilité de l'affirmation « a_1 surclasse a_2 » et celui de « a_3 surclasse a_4 » sans que l'on puisse juger de façon indéniable que la première affirmation est plus solidement établie que la seconde (Roy et Bouyssou, 1993). Cette analyse peut être réalisée sous R grâce à la fonction Electre3 dans le package « outrankingTools ». On obtient ainsi deux pré-classements souvent différents. **Le classement final est l'intersection de ces deux pré-classements.**

1.6.3.2.4. La méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) (Brans et al., 1986)

Dans la méthode PROMETHEE, le classement repose **uniquement sur une analyse de concordance**. La discordance n'est pas prise en compte et donc **aucun seuil véto ne peut être pris en compte**. Les préférences sont des préférences strictes et des pseudo critères sont utilisés (1.6.3.2.1). Comme dans ELECTRE, des poids w_i sont attribués à chaque critère de $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ en fonction de l'importance de ces critères pour le décideur.

Pour chaque alternative a_1 du problème de décision, les **indices de crédibilité partiels** $\sigma_i(a_1, a_2)$ des propositions « a_1 est préférée à a_2 selon le critère c_i » sont calculés pour chaque alternative de A et pour chaque critère c_i appartenant à C selon le système d'équation. $\sigma_i(a_1, a_2)$ peut prendre des valeurs entre 0 (quand $(a_2 \text{Sa}_1)$ selon le critère c_i (figure 6)) et 1 (quand $(a_1 \text{Pa}_2)$ selon le critère c_i (figure 6)). Si a_1 est faiblement préférée à a_2 (figure 6), alors $\sigma_i(a_1, a_2)$ croît linéairement et est d'autant plus proche de 1 que la différence $g_i(a_1) - g_i(a_2)$ se rapproche du seuil de préférence p_i (pour un critère à maximiser) ou de $-p_i$ (pour un critère à minimiser).

L'**indice de crédibilité global** ($\sigma(a_1, a_2)$) de la proposition « a_1 est préférée à a_2 » est ensuite obtenu en sommant les indices de concordances partiels $\sigma_i(a_1, a_2)$ obtenus pour chaque critère pondéré par les poids normalisés des critères.

Les indices de crédibilité comparant chaque alternative à toutes les autres sont ensuite synthétisés. Pour chaque alternative a_x , sont calculés : le « **flux négatif** » (φ^-) qui est la somme des indices de crédibilité globaux des propositions « a_y est préféré à a_x » pour $y \in [1, j] \setminus x$; et le « **flux positif** » (φ^+) qui est la somme des indices de crédibilité globaux des propositions « a_x est préféré à a_y » pour $y \in [1, j] \setminus x$. Ainsi, le flux φ^- d'une alternative a_x représente la force de la crédibilité des comparaisons en défaveur d'une préférence de a_x , et le flux φ^+ la force de la crédibilité des comparaisons en faveur d'une préférence de a_x .

À partir de ces flux, les alternatives peuvent être classées selon deux méthodes.

Soit en créant deux pré-classements (PROMETHEE I) : l'un issu du classement des alternatives par valeur croissante de flux négatif (a_1 surclasse a_2 si la force de la crédibilité des comparaisons en défaveur d'une préférence de a_1 est inférieure à celle des comparaisons en défaveur d'une préférence de a_2), l'autre par classement des alternatives par valeur décroissante de flux positif (a_1 surclasse a_2 si la force de la crédibilité des comparaisons en faveur d'une préférence de a_1 est supérieure à celle des comparaisons en faveur d'une préférence de a_2). Le classement final est alors obtenu par l'intersection de ces deux pré-classements, c'est-à-dire que l'on considère qu'une alternative en surclasse une autre si et seulement si elle la surclasse dans les deux pré-classements. Si les relations de surclassement entre deux alternatives sont divergentes entre les deux pré-classements, alors ces deux alternatives sont considérées comme incomparables.

Soit en calculant un flux net ($\varphi(a_x)$) pour chaque alternative (PROMETHEE II) qui correspond à la différence entre d'une part, la force de la crédibilité des comparaisons en faveur d'une préférence de a_x et d'autre part, la force de la crédibilité des comparaisons en défaveur d'une préférence de a_x (soit $\varphi^+(a_x) - \varphi^-(a_x)$). Les alternatives sont alors classées par flux net décroissant (l'alternative a_1 surclasse l'alternative a_2 si et seulement si $\varphi(a_1)$ est supérieur à $\varphi(a_2)$).

Bilan de la méthode PROMETHEE

La première étape de la méthode consiste à calculer les indices de concordances partiels puis globaux de chaque couple d'alternatives. L'agrégation de ces comparaisons deux à deux se fait ensuite par le calcul simple des flux entrants et flux sortants de chaque alternative, ce qui permet de classer simplement les alternatives entre elles. Le protocole d'agrégation des comparaisons est plus simple que dans la méthode ELECTRE III mais la méthode ne permet pas la prise en compte de seuils véto. La méthode PROMETHEE est plus stable que la méthode ELECTRE, c'est-à-dire que son résultat final est moins sensible à de faible variation des seuils de préférence et d'indifférence définis (Brans *et al.*, 1986).

Dans les deux méthodes, l'utilisation de pseudo-critères présente l'avantage d'améliorer le réalisme de la modélisation des préférences (Bouyssou et Roy, 1987).

1.6.3.3. Robustesse de la solution obtenue

L'étude de la robustesse d'une solution obtenue par l'application de méthodes d'aide à la décision multicritère consiste à étudier dans quelle mesure une variation des données due à une erreur de mesure ou d'estimation risque de modifier le résultat (Roy, 2002). En effet, certains paramètres d'un problème de décision peuvent être imprécis, incertains, mal connus ou mal définis, et les systèmes de préférences des décideurs peuvent être instables. De plus, les conditions de mise en œuvre des alternatives envisagées peuvent évoluer dans le temps, pouvant rendre la solution caduque.

Les résultats peuvent être plus ou moins tributaires des valeurs particulières attribuées à chaque paramètre. L'objectif d'une évaluation de la robustesse est de se rendre compte de cette dépendance du résultat aux paramètres fixés.

La définition du concept de robustesse ne fait pas consensus (Mouine, 2011). Des recherches opérationnelles visent actuellement au développement de méthodes permettant son évaluation (Roy, 2007). L'analyse de sensibilité est l'approche la plus classique pour estimer à posteriori la robustesse du résultat d'une analyse multicritère (Roy et Bouyssou, 1993). Elle permet de déterminer les intervalles dans lesquels les valeurs prises par chaque paramètre (poids, utilités, etc. selon la méthode) d'un critère donné peuvent évoluer sans que la classification finale des alternatives ne soit modifiée.

Mouine (2011) propose une méthode d'analyse de sensibilité permettant de déterminer ces intervalles lors de l'utilisation de la méthode ELECTRE III. Il s'agit d'un algorithme d'incrémental qui augmente ou diminue la valeur du paramètre étudié (selon que l'on recherche respectivement la valeur maximale ou la valeur minimale de l'intervalle), d'un certain pas défini comme présenté en annexe 1. À chaque pas, un classement des alternatives est réalisé selon la méthode ELECTRE III. L'incrémental s'arrête lorsque le classement obtenu est différent du classement précédent et que le pas d'incrémental est inférieur à la précision souhaitée.

1.7. Conclusion du premier chapitre

L'évaluation est un exercice primordial à la mise en place et à la pérennité des systèmes de surveillance. Bien qu'aucun consensus n'existe ni sur les méthodes à utiliser ni sur les attributs à évaluer, la nécessité d'ajuster la méthode et les attributs aux objectifs du dispositif et de l'évaluation semble admise. De plus, trois dimensions sont indispensables à prendre en compte pour réaliser une évaluation complète d'un système de surveillance : l'aspect technique, l'aspect économique et l'aspect humain. Leur évaluation quantitative est généralement réalisée séparément ou en ne prenant en compte qu'un nombre très limité d'attributs (par exemple dans le cas d'une évaluation coût-efficacité). Les aspects humains sont majoritairement évalués de façon qualitative, ce qui présente l'inconvénient d'inclure une part d'interprétation. Plusieurs méthodes ont déjà été développées pour évaluer ces trois dimensions simultanément par des approches semi-quantitatives dans une perspective d'amélioration d'un dispositif déjà en place (HACCP, méthode OASIS). Toutefois, il est rare de combiner dans une approche quantitative des critères évaluant ces trois aspects car ils sont de nature très différente. Pourtant, leur intégration dans une même évaluation quantitative semble intéressante dans la mesure où ils sont interdépendants et peuvent donc s'influencer mutuellement. Ainsi, une évaluation omettant un ou plusieurs de ces trois aspects risque de mener à des recommandations peu pertinentes voire inadaptées à la réalité du terrain.

Une des problématiques de cette thèse est donc de développer une méthode permettant l'intégration quantitative de ces trois aspects de la surveillance dans un objectif d'évaluation, à travers l'exemple de l'évaluation de la surveillance *ante mortem* de la tuberculose bovine (TB). L'objectif est d'être en mesure de fournir des recommandations opérationnelles applicables sur le terrain permettant une amélioration de la surveillance de cette infection, prenant en compte des aspects techniques, économiques et sociologiques.

Par ailleurs, l'évaluation de multiples attributs de divers protocoles de surveillance peut fournir les données nécessaires à leur comparaison dans le but de choisir objectivement le protocole le plus adapté à un contexte donné. Malheureusement, l'augmentation du nombre de critères à prendre en compte complexifie fortement le processus de décision. Les méthodes d'aide à la décision multicritère sont largement utilisées dans des disciplines variées d'étude d'impact, de gestion du territoire (choix de la localisation d'une nouvelle usine par exemple ou du tracé d'une nouvelle ligne électrique...), de gestion des ressources humaines et matérielles, planification militaire, etc. (Martel, 1999) pour gérer cette complexification des choix. En santé animale, des approches multicritères ont déjà été mises en œuvre notamment dans l'appréciation des risques (Tran et Roger, 2018) mais elles n'ont jamais été appliquées au choix d'un protocole de dépistage en santé animale. Ces approches posent de nombreuses questions méthodologiques, notamment pour l'estimation de l'importance de chaque critère pris en compte. **Un des objectifs de ce travail était donc de mettre au point un outil permettant la mise en place d'une aide à la décision multicritère pour le choix de protocoles de dépistage en santé animale, appliqué à la tuberculose bovine, en prenant en compte des critères épidémiologiques, économiques et sociologiques.**

Chapitre 2. La tuberculose bovine en France : situation et enjeux

2.1. La tuberculose bovine : généralités

2.1.1. Étiologie

La tuberculose bovine (TB) est une maladie **bactérienne contagieuse**. Elle atteint préférentiellement les bovins mais peut toucher de nombreuses espèces animales vertébrées (aussi bien domestiques que sauvages). L'Homme peut également être infecté. C'est une maladie d'évolution **chronique** due à ***Mycobacterium bovis*** ou, plus rarement, à ***Mycobacterium tuberculosis*** ou à ***Mycobacterium caprae*** ; qui sont des bactéries de l'ordre des Actinomycétales, de la famille des *Mycobacteriaceae* et appartenant au complexe *Mycobacterium tuberculosis*.

On distingue trois groupes dans les *Mycobacteriaceae*, selon leur pouvoir pathogène : (1) les **bactéries pathogènes** appartenant au complexe *Mycobacterium tuberculosis* ou au complexe *Mycobacterium avium intracellulare* ; (2) les mycobactéries **opportunistes** provoquant des infections souvent bénignes et peu contagieuses chez les bovins et (3) les mycobactéries **saprophytes** qui sont présentes dans l'environnement et dans la flore commensale des animaux. L'infection par des mycobactéries dites atypiques (mycobactéries opportunistes ou saprophytes) ou par des mycobactéries pathogènes du complexe *M. avium intracellulare* telles que *M. avium paratuberculosis* peut provoquer des **résultats faussement positifs** aux tests de dépistage ou de diagnostic de la TB (Vordermeier *et al.*, 2007).

2.1.2. Physiopathologie de la tuberculose bovine

La voie respiratoire est la principale voie de transmission de la TB, par contact direct, avec inhalation d'aérosols infectieux (Pollock et Neill, 2002). **L'ingestion de matière contaminée** (lait, fourrage, eau, etc.) peut également être source de contamination par voie digestive. Les mycobactéries étant très résistantes dans l'environnement, une contamination indirecte par du matériel, des bâtiments ou des pâturages contaminés est également possible (Fine *et al.*, 2011).

La localisation des lésions est corrélée à la modalité de contamination (Fitzgerald *et al.*, 2016). Ainsi, la majorité des lésions observées chez les bovins sont situées dans les poumons et les nœuds lymphatiques trachéobronchiques. Les lésions typiques mais non pathognomoniques de la TB sont les **tubercules**, des nodules **granulomateux** jaunâtres de deux à vingt millimètres de diamètre (figure 7), dont elle tire son nom (OIE, 2015), et présentant souvent en leur centre une nécrose caséeuse et des minéralisations (Domingo *et al.*, 2014).

Après pénétration de l'agent pathogène dans l'organisme, une réaction immunitaire à médiation cellulaire (RIMC) faisant intervenir les macrophages et les **lymphocytes T** se met en place (Pollock *et al.*, 2001, 2006 ; McGill *et al.*, 2014). Si cette RIMC ne suffit pas à éliminer tous les bacilles, ils se multiplient dans les macrophages, ce qui entraîne la formation d'une lésion initiale : le **chancre d'inoculation**. Le drainage de cette lésion par le nœud lymphatique locorégional correspondant entraîne ensuite le développement d'une seconde lésion tuberculeuse dans ce nœud lymphatique. L'association de ces deux lésions forme le **complexe primaire** et sa localisation indique le point d'entrée de l'agent pathogène. Localement, la libération d'antigène bacillaire permet la phase d'induction ou de sensibilisation de l'animal, causant l'apparition d'une **hypersensibilité retardée** (HSR), spécifique des protéines bacillaires (Liebana *et al.*, 2008). C'est sur la mise en évidence de cette HSR par intradermotuberculination (ID) que s'appuie le dépistage de la TB. La réponse immunitaire à

Figure 7. Photographie d'un granulome tuberculeux sur le poumon d'une chèvre d'après Domingo *et al.*, 2014.



médiation humorale se met en place dans un second temps, produisant des anticorps antituberculeux après quelques semaines à quelques mois (de la Rua-Domenech *et al.*, 2006 ; Waters *et al.*, 2010).

Les caractéristiques des lésions de TB évoluent avec la maladie (Palmer *et al.*, 2007). Suite à la primo-infection, si la réponse immunitaire de l'hôte est efficace, l'infection peut guérir ou se stabiliser. Dans ce cas, la lésion sur l'organe porte d'entrée cicatrise et disparaît macroscopiquement ; cependant, celle au niveau du nœud lymphatique persiste. On parle alors de **complexe primaire dissocié**.

Si la réponse immunitaire est insuffisante, la tuberculose évolue sous forme aiguë. La séreuse est alors congestionnée et présente des tubercules gris et miliaires (Note de service DGAL/SDSPA/2013-8123). Elle peut évoluer en **tuberculose de surinfection**, soit sous la forme d'une **tuberculose miliaire aiguë** qui entraîne rarement des signes cliniques peu spécifiques chez l'animal atteint (hypertrophie des nœuds lymphatiques, et dans les cas les plus avancés atteinte majoritairement respiratoire (Pollock et Neill, 2002) et atteinte importante de l'état général des animaux en fin d'évolution) ; soit par une **évolution lente** avec extension de proche en proche (tuberculose à généralisation progressive) qui peut se stabiliser suite à une augmentation secondaire des défenses immunitaires de l'hôte. Si les défenses immunitaires de l'hôte diminuent à nouveau, les lésions stabilisées évoluent vers un ramollissement : on parle alors de **tuberculose caséuse de surinfection**. Une stabilisation peut à nouveau avoir lieu avec déshydratation et calcification du caséum et fibrose périphérique.

La TB est une infection chronique, son évolution peut s'étendre sur des mois à des années et elle est généralement asymptomatique chez les bovins. Le diagnostic clinique de la TB est donc très difficile, d'où un usage nécessaire de tests de dépistage et de diagnostic. L'infection entraîne des lésions macroscopiques la plupart du temps discrètes, évocatrices de la maladie mais non pathognomoniques, ainsi qu'une réaction d'hypersensibilité retardée, détectable par ID.

2.1.3. Dépistage et diagnostic

2.1.3.1. Dépistage *ante mortem*

L'infection n'entraînant généralement pas de signes cliniques, des tests ont été développés pour dépister les animaux infectés, dans le cadre de la prophylaxie ou de l'assainissement d'un foyer de TB par abattage sélectif. Trois types de test de dépistage existent : l'ID, le test de dosage de l'interféron gamma (test IFN γ) et les tests sérologiques.

2.1.3.1.1. Le dépistage allergique de la tuberculose bovine

Le dépistage allergique de la TB détecte l'HSR développée par les animaux infectés. Une injection de tuberculine provoque une **réaction** locale d'apparition **différée mais durable** chez les animaux déjà sensibilisés (Pollock *et al.*, 2001).

Cette hypersensibilité de l'animal infecté comprend trois phases :

- La période ante-allergique, qui correspond au délai entre la pénétration du bacille dans l'organisme et le moment où la réaction d'hypersensibilité devient décelable par ID. Elle dure de 15 jours à six mois (durée moyenne : trois à huit semaines) mais si l'infection est latente, elle peut alors durer des mois voire des années. Un animal récemment infecté peut donc ne pas être détecté par cette méthode de dépistage, d'où la nécessité de renouveler périodiquement les ID.
- La période allergique, qui est durable (de plusieurs années à quelques semaines selon les conditions de l'infection et la réaction de l'hôte). Pendant cette phase, les bovins infectés sont détectables par dépistage allergique. L'intensité de la réaction allergique peut toutefois fluctuer en fonction de facteurs (de la Rua-Domenech *et al.*, 2006) :
 - Physiologiques : réaction moins importante des animaux jeunes ou âgés (Julio Álvarez *et al.*, 2014 ; Lahuerta-Marin *et al.*, 2016) et des femelles proches du part (six semaines avant et après) ;
 - Pathologiques : la présence de maladies intercurrentes peut diminuer la réactivité de

- l'organisme et donc l'intensité de sa réaction à la tuberculine (Claridge *et al.*, 2012) ;
- Thérapeutiques : principes actifs immunosuppresseurs, vaccins, phénomène **d'accoutumance à l'injection de tuberculine** (Coad *et al.*, 2010) entraînant une anergie qui peut se prolonger jusqu'à six semaines (d'où l'importance de séparer deux ID d'au minimum six semaines).
 - La période d'anergie post-tuberculeuse : Lorsque la maladie est à un stade avancé, les capacités de réaction de l'organisme sont saturées. Aucune réaction allergique n'est alors décelable par ID.

En France, la pratique du dépistage allergique est réglementée par l'État et seule l'ID est autorisée. Les deux seules méthodes officielles sont l'intradermotuberculation cervicale simple (IDS) et l'intradermotuberculation cervicale comparative (IDC). Les injections au niveau de l'épaule ou du pli sous caudal sont proscrites en France car la sensibilité du test est bien moindre en ces sites d'injection (Baisden *et al.*, 1951 ; de la Rua-Domenech *et al.*, 2006 ; Schiller *et al.*, 2010).

L'IDS consiste à injecter une dose de 0,1 à 0,2 mL de **tuberculine bovine** normale P.P.D. (Dérivé Protéique Purifié de *Mycobacterium bovis*) titrant 25 000 unités internationales/mL dans le **derme de l'encolure**, à la limite de son tiers postérieur et de son tiers moyen. Avant l'injection, l'absence de lésion doit être vérifiée, le site d'injection est repéré par la tonte des poils et une **première mesure du pli de peau** notée B0 est effectuée à l'aide d'un **cutimètre** (Note de service DGAL/SDSPA/2015-803).

La lecture du résultat se fait 72 heures (+/- 4 heures) après l'injection. Ce délai permet de ne pas prendre en compte les réactions précoces non spécifiques qui pourraient se produire dans les 48 heures après l'injection et de détecter les réactions tardives. Elle consiste en la **mesure (notée B3) du pli de peau** au lieu d'injection à l'aide d'un **cutimètre**.

L'interprétation du résultat est fondée sur l'augmentation de l'épaisseur du pli de peau au point d'injection, obtenue par soustraction des deux mesures de plis de peau effectuées (DB=B3-B0) (tableau 4). Elle pouvait auparavant être qualitative (réaction positive en cas de présence de signes cliniques (œdème diffus ou étendu, exsudation, nécrose, douleur ou inflammation des canaux lymphatiques ou des nœuds lymphatiques de cette région), mais ce type de réaction locale intense n'est plus observé sur le terrain en France. La non mesure du pli de peau avant l'injection était tolérée mais il a été montré que ces méthodes alternatives subjectives étaient incompatibles avec les exigences actuelles de la surveillance (Lambert et Bénet, 2015).

Tableau 4 : Interprétation de la lecture quantitative des résultats de l'IDS (note de service DGAL/SDSPA/2015-803)

Valeur de DB (en mm)	Interprétation des résultats de l'IDS
DB ≥ 4 mm	Positif
2 mm < DB < 4 mm	Douteux
DB ≤ 2 mm	Négatif

L'IDC repose sur le même principe que l'IDS mais elle permet de comparer la réaction due à l'injection de tuberculine bovine à celle engendrée par l'injection de tuberculine aviaire (Tuberculine aviaire P.P.D. -Dérivé Protéique Purifié de *Mycobacterium avium* - titrant à 25 000 unités internationales/mL). Les mycobactéries non tuberculeuses ayant une plus grande parenté avec *M. avium* qu'avec *M. bovis*, *M. tuberculosis* ou *M. caprae*, les bovins sensibilisés par l'infection à ces bactéries présenteront *a priori* une réaction plus importante à la tuberculine aviaire. Les deux injections se pratiquent sur la même face de l'encolure, espacées de 10 à 15 cm. **Le protocole d'injection est le même que pour l'IDS**. On utilise deux seringues distinctes, une pour chaque type de tuberculine. **Les plis de peaux sont mesurés avant injection**, aux points d'injection de la tuberculine aviaire (A0) et bovine (B0). La lecture se fait 72h (+/- 4 h) après les injections. De la même façon que pour l'IDS, elle consiste en la **mesure des plis de peau B3 et A3** au niveau des sites d'injection à l'aide d'un **cutimètre**.

À partir des mesures réalisées, sont calculés DB = B3 – B0 : l'épaississement, en millimètres, du pli cutané au lieu d'injection de la tuberculine bovine ; et DA = A3 – A0 : l'épaississement, en millimètres,

du pli cutané au lieu d'injection de la tuberculine aviaire. L'interprétation du test en fonction des valeurs de DB et de la différence entre DB et DA est présentée dans le tableau 5.

Tableau 5: Grille d'interprétation des résultats d'une IDC (note de service DGAL/SDSPA/2015-803)

Réaction à la tuberculine bovine	Différence d'épaissement entre les réactions aux tuberculines bovine et aviaire	Interprétation du résultat de l'IDC
DB > 2 mm	DB – DA > 4 mm	Positif
	1 mm ≤ DB – DA ≤ 4 mm	Douteux
	DB – DA < 1 mm	Négatif
DB ≤ 2mm	Quelle que soit la valeur de DB-DA	Négatif

Le choix entre l'IDS et l'IDC varie selon le contexte et est fonction des caractéristiques de ces deux tests, détaillées dans le tableau 6. En théorie, l'IDC permet, au détriment de sa sensibilité, de gagner en spécificité par rapport à l'IDS, elle est donc logiquement utilisée dans les cheptels dans lesquels il existe un risque de réactions croisées non spécifiques ou pour les tests de recontrôle dans un cheptel suspect pour lesquels on souhaite éviter les faux positifs. L'utilisation de l'IDS est en théorie préconisée dans les autres situations afin de favoriser une bonne sensibilité du dépistage.

Tableau 6 : Caractéristiques moyennes des tests IDS et IDC estimées dans la littérature scientifique ; coût et temps de réalisation de ces tests dans les conditions françaises

	IDS	IDC
Sensibilité (de la Rua-Domenech et al., 2006)	97,2 % [80,2 - 100]	80,0% [50,0 - 100]
Spécificité (de la Rua-Domenech et al., 2006)	86,3% [75,5 - 96,8]	99,5% [78,8 - 100]
Coût moyen (16 conventions tarifaires de 2017-2018)	Environ 2 €	Environ 8€
Temps de réalisation	IDS < IDC	

La réalisation de l'ID nécessite beaucoup de temps et une excellente contention des animaux (pas toujours disponible dans les élevages) ainsi que des manipulateurs expérimentés (Gully, 2018). De plus, la lecture des résultats est très opérateur-dépendant. C'est pourquoi d'autres tests de dépistages plus faciles à mettre en œuvre ont été développés.

2.1.3.1.2. Le dépistage allergique *in vitro* : le test de dosage de l'interféron gamma

Le test IFN γ a été développé en Australie dans les années 1980. Dès 1991, l'intérêt d'utiliser ce test a été souligné, soit à la place de l'ID pour dépister la TB, soit en parallèle de l'ID pour augmenter la sensibilité du dépistage (Wood et al., 1991).

Le test IFN γ permet de révéler la réponse immunitaire à médiation cellulaire de l'hôte. Les lymphocytes T des animaux ayant déjà été en contact avec l'un des antigènes utilisés dans le test *in vitro* (choisis pour être le plus spécifique possible de *M. bovis*) réagissent à une stimulation par ces antigènes en produisant de l'IFN γ , une cytokine dont la principale fonction est d'activer les macrophages (Abbas et Lichtman, 2009). Après stimulation *in vitro* des lymphocytes, la quantité d'IFN γ produite est estimée par un test ELISA (dosage immuno-enzymatique sur support solide) sandwich (Rothel et al., 1990). La quantification se fait par mesure de la densité optique (DO). L'interprétation des résultats peut donner lieu à des résultats positifs, non conclusifs, négatifs ou ininterprétables. En cas de résultat ininterprétable, un nouveau prélèvement doit être réalisé sur l'animal correspondant afin de refaire le test.

Ce test est réalisé selon le protocole décrit en annexe 2, dans les laboratoires départementaux français agréés (LDA) pour cette technique par le laboratoire national de référence pour la TB (LNR), à partir de

sang prélevé sur tube hépariné par le vétérinaire sanitaire (VS). Le prélèvement doit être acheminé **dans les six à huit heures** au LDA et la conservation du prélèvement doit se faire à une température comprise entre 17 et 23 °C. Le non-respect de ces conditions d'acheminement entraîne une diminution significative de la production d'IFN γ par les lymphocytes des animaux infectés, augmentant ainsi le risque de faux négatifs (Waters *et al.*, 2007). Des réactions positives non spécifiques ayant été mises en évidence chez les animaux jeunes, ce test est utilisé sur des **animaux de plus de six mois** (Olsen *et al.*, 2005).

Dans les conditions françaises et selon les seuils d'interprétation fixés par le LNR (annexe 2), la **sensibilité** brute du test IFN γ a été estimée à 93 % [88 % ; 98 %]_{IC 95%} et sa **spécificité** à 81,83 % [80,34 % ; 83,31 %]_{IC 95%} (avec les résultats non conclusifs considérés comme des résultats négatifs) (Praud et Dufour, 2016). Comme il se fonde sur la réaction allergique des animaux infectés, tout facteur ayant un impact sur cette réaction (cf. 2.1.3.1.1) peut avoir un impact sur les caractéristiques du test, à l'exception de l'accoutumance aux injections de tuberculine bovine. En effet, plusieurs études ont montré que l'ID n'interférait pas avec les résultats du test IFN γ (Wood et Jones, 2001 ; Rangen *et al.*, 2009 ; Coad *et al.*, 2010).

Comparé à l'ID, le test IFN γ est plus facile à réaliser sur le terrain puisque le prélèvement par prise de sang à la queue nécessite de ne manipuler l'animal qu'une fois et avec une contention moins exigeante. La stimulation allergique étant réalisée *in vitro*, elle n'interfère pas avec la réaction allergique de l'hôte. Aucun intervalle minimal entre deux tests sur un même animal n'est donc à respecter. De plus, le test IFN γ permettrait de détecter les animaux tuberculeux plus précocement que l'ID (Neill *et al.*, 1994 ; de la Rua-Domenech *et al.*, 2006 ; Lahuerta-Marin *et al.*, 2015). Toutefois, ce test est plus coûteux que l'ID : 40 à 60 € par animal, contre deux à huit euros pour l'ID et sa réalisation nécessite la relative proximité d'un LDA afin de pouvoir respecter le délai d'acheminement des prélèvements de quelques heures (6 en moyenne), ce qui limite son utilisation sur le terrain.

D'après la directive Européenne CE/64/432, le seul usage du test IFN γ reconnu par l'Union Européenne (UE) est son utilisation en parallèle de l'ID afin d'augmenter la sensibilité globale de la détection des animaux infectés dans les foyers. Pourtant, son utilisation en série a été approuvée dans plusieurs protocoles nationaux (OIE, 2015), par exemple en France, puisqu'il a été montré que, dans les conditions françaises, son utilisation en série avec une ID était au moins aussi sensible que l'utilisation en série d'une ID puis d'une IDC (Praud *et al.*, 2016). En France, le test IFN γ est utilisé depuis 2008. Il est autorisé :

- a. **En parallèle d'une ID** dans le cadre d'un abattage sélectif (note de service DGAL/SDSPA/2014-541) ;
- b. **En première intention en remplacement de l'IDS en Camargue** (départements 13, 34, 30) (dérogation prévue pour les animaux de combat de contention difficile) ;
- c. **En série après une ID non négative**, lorsque la suspicion de tuberculose est considérée comme faible (note de service DGAL/SDSPA/2016-1001).

2.1.3.1.3. Les tests sérologiques

Les tests sérologiques mettant en évidence la présence d'anticorps dirigés contre *M. bovis* présentent le double avantage d'être faciles à réaliser et peu coûteux. Malheureusement, ils n'ont pas une sensibilité et une spécificité suffisantes pour constituer une alternative acceptable aux tests d'ID et IFN γ (Waters *et al.*, 2006 ; van der Heijden *et al.*, 2016). Ils sont utilisés dans les pays en développement dans lesquels la tuberculose est enzootique et où la stratégie consiste en une détection peu coûteuse et un abattage des animaux aux stades avancés de la maladie (de la Rua-Domenech *et al.*, 2006).

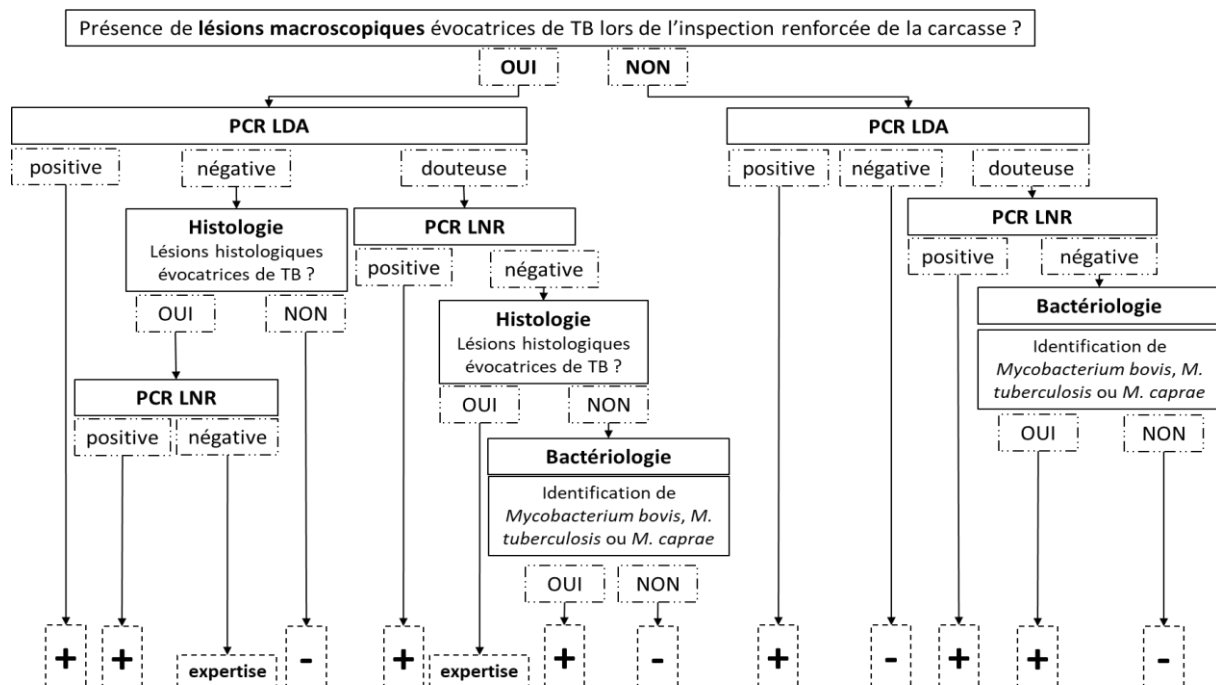
L'ID et le test IFN γ sont donc les deux principaux tests de dépistage *ante mortem* de la TB. L'IDS est plus sensible que l'IDC, tandis que l'IDC est plus spécifique. L'ID est moins coûteuse que le test IFN γ mais sa qualité est très dépendante de l'opérateur. Le test IFN γ est techniquement plus facile à réaliser pour le VS mais est plus coûteux et nécessite la relative proximité d'un LDA. De plus, il n'est pas reconnu par l'UE en tant qu'alternative à l'ID (sauf cas particulier de la Camargue).

2.1.3.2. Dépistage *post mortem*

Le dépistage *post mortem* consiste en la détection de lésions macroscopiques évocatrices de TB lors de l'inspection des carcasses à l'**abattoir**. Ces lésions sont recherchées systématiquement sur tous les animaux abattus. Lorsque des lésions sont observées sur les carcasses, les organes atteints et les nœuds lymphatiques qui leur sont associés sont prélevés afin de réaliser des examens complémentaires (PCR, analyse histologique, mise en culture cf. paragraphe 2.1.3.3) (annexe II de la note de service DGAL/SDSPA/2016-1001).

Dans le cadre d'un **abattage diagnostique** à la suite d'une suspicion, la carcasse subit une inspection renforcée avec prélèvements systématiques, en plus des organes lésés éventuellement détectés et des nœuds lymphatiques les drainant, des nœuds lymphatiques rétropharyngiens, médiastinaux et trachéobronchiques. Ces prélèvements seront transmis aux LDA pour réalisation des tests diagnostiques décrits en 2.1.3.3. L'interprétation des résultats de ces tests, menant au diagnostic, est schématisée sur la figure 8.

Figure 8. Diagramme décisionnel permettant d'obtenir le résultat de l'abattage diagnostique en fonction des résultats des analyses de laboratoire



Légende = « + » : résultat positif à l'abattage diagnostique, « - » : résultat négatif à l'abattage diagnostique.

2.1.3.3. Diagnostic

La TB étant la plupart du temps asymptomatique et les signes qu'elle peut entraîner étant non spécifiques, le diagnostic clinique est inadapté à la détection de l'infection. Seul un diagnostic expérimental est possible. En France, le LNR pour la TB est le laboratoire de santé animale de l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement, et du travail) à Maisons-Alfort. La bactériologie et l'amplification en chaîne par polymérase (PCR) sont systématiquement réalisées en cas de suspicion de TB sur un animal. L'histologie s'ajoute aux deux tests précédents si des lésions macroscopiques ont été détectées sur la carcasse.

2.1.3.3.1. Bactériologie

L'isolement de *M. bovis*, *M. tuberculosis* ou *M. caprae* suffit à établir le diagnostic de TB (Corner, 1994). Les mycobactéries sont des bactéries à croissance lente, le résultat d'une bactériologie est donc long à obtenir (en moyenne quatre à six semaines pour un résultat positif et trois mois pour un résultat négatif). Un résultat négatif n'est pas considéré comme suffisant pour lever une suspicion d'infection.

En effet, la sensibilité de la bactériologie a été estimée à 78,1 % [72,9 % ; 82,8 %]_{IC95%} dans les conditions françaises (Courcoul *et al.*, 2014).

Les examens bactériologiques directs (avec coloration de Ziehl) qui fournissent un résultat rapide (en trois à 24 heures) sont peu sensibles (Varello *et al.*, 2008) et ne sont donc jamais utilisés seuls.

2.1.3.3.2. La méthode d'amplification génétique PCR

Elle est réalisée soit sur tubes après deux semaines de culture pour détecter *M. bovis* (en général, en l'absence de colonies visibles), soit directement sur des broyats de prélèvement. Si la PCR sur broyat de prélèvement est positive, la bactériologie est tout de même réalisée afin d'identifier, par des méthodes de biologie moléculaire (spoligotypage et recherche des répétitions en tandem polymorphe (VNTR)), les souches concernées. La sensibilité et la spécificité de la PCR ont été estimées, dans les conditions françaises, à respectivement 87,7 % ([82,5 % ; 92,3 %]_{IC95%}) et 97,0 % ([94,3 % ; 99,0 %]_{IC95%}) (Courcoul *et al.*, 2014).

Les résultats de la PCR réalisée dans les LDA sont obtenus dans un délai de deux à trois jours ; en cas d'envoi du prélèvement au LNR pour confirmation, les résultats sont obtenus dans un délai de deux à quatre semaines (communication personnelle, M.L. Boschioli, directrice du LNR).

2.1.3.3.3. Histopathologie

L'examen histologique n'est pas spécifique de *M. bovis* : les autres bactéries de la famille des *Mycobacteriaceae* provoquent des lésions similaires. Sa spécificité est estimée à 83,3 % [78,7 % ; 87,6 %]_{IC95%} (Courcoul *et al.*, 2014). Toutefois, sa sensibilité est considérée comme très satisfaisante (Varello *et al.*, 2008) pour une valeur estimée à 93,6 % [89,9 % ; 96,9 %]_{IC95%} (Courcoul *et al.*, 2014). Elle est donc utilisée en complément des autres tests diagnostiques dans le protocole de diagnostics *post-mortem* (figure 8, paragraphe 2.1.3.2). Les résultats de l'histopathologie sont obtenus en sept à dix jours en moyenne (communication personnelle, M.L. Boschioli).

Seul l'isolement de *M. bovis*, *M. tuberculosis* ou *M. caprae* sur culture donne lieu à une certitude. Une PCR positive au LNR permet également de confirmer un diagnostic. Les résultats des autres tests doivent être associés. L'interprétation de ces tests de diagnostic expérimentaux nécessite de tenir compte du contexte épidémiologique du cheptel et des modalités de prélèvement. Les interprétations de l'association de ces tests pour le diagnostic de la TB sont prévues par la réglementation française et détaillées dans la figure 8.

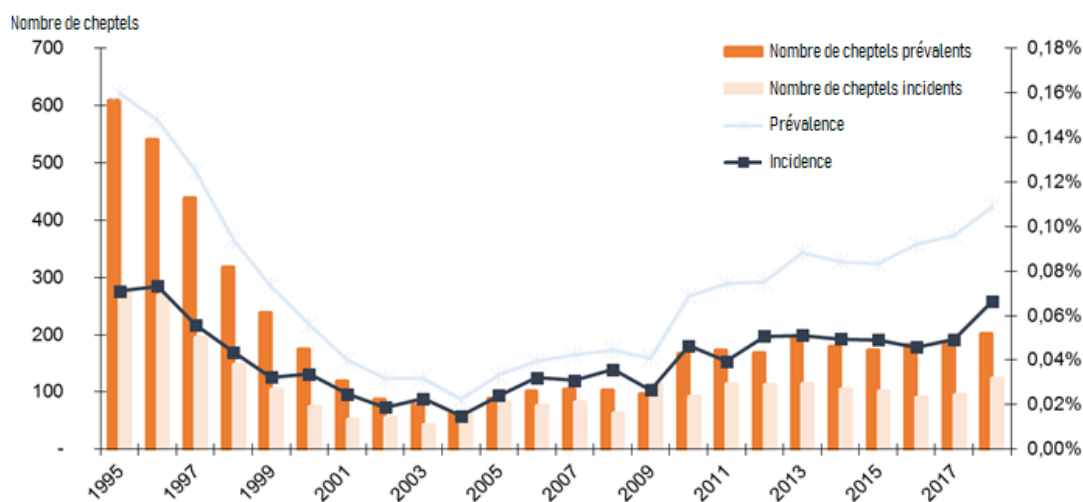
2.2. La situation épidémiologique de la tuberculose bovine en France

2.2.1. Historique

Au moment du début de la lutte obligatoire contre la TB dans les années 1950, la TB était très présente sur le territoire. Ainsi, en 1954, environ 25 % des élevages étaient infectés (Bénet *et al.*, 2006) avec en moyenne trois ou quatre bovins infectés par troupeau (Anses, 2011). La mise en place des mesures de lutte obligatoires a permis une diminution de la prévalence de la maladie et, en 1999, l'obligation de recourir à un abattage total des animaux dans les cheptels infectés (arrêté ministériel (AM) du 4 Mai 1999) a permis de réduire encore plus efficacement la prévalence de la TB dans les cheptels français (Bénet *et al.*, 2006). Ainsi, en 2000, la France a été reconnue « officiellement indemne » de TB par l'UE (Décision de la commission européenne du 27 décembre 2000). Ce statut réglementaire facilite les échanges d'animaux vivants avec les autres pays Européens ; toutefois, il ne signifie pas que l'infection est éradiquée mais que sa prévalence au 31 décembre est inférieure à 0,1 % depuis six ans. À partir de 2004, l'évolution du nombre de foyers s'est inversée, traduisant une inquiétante augmentation de la prévalence qui met actuellement en danger le statut officiellement indemne de la France (figure 9).

Cette augmentation est liée à la situation particulière d'un petit nombre de départements (Dordogne, Côte d'Or, Pyrénées-Atlantiques, Landes, etc.) qui concentrent la majorité des foyers. En parallèle de cette augmentation de foyers, le rôle de la faune sauvage inquiète car certaines espèces ont joué le rôle de réservoir dans d'autres pays comme par exemple le blaireau en Irlande (Griffin *et al.*, 2005). En 2001, le premier foyer de tuberculose à *M. bovis* a été découvert sur des cerfs élaphe (*Cervus elaphus*) tués à la chasse en forêt de Brotonne (Seine-Maritime et Eure, Normandie) ; des enquêtes complémentaires ont montré que les sangliers (*Sus scrofa*) y étaient également très atteints (Hars *et al.*, 2006). Depuis, des blaireaux (*Meles meles*) ont également été détectés infectés notamment en Dordogne, Côte d'Or et dans les Pyrénées Atlantiques (Anses, 2011 ; Réveillaud *et al.*, 2017). C'est pour cette raison qu'un dispositif national de surveillance de la TB dans la faune sauvage, SYLVATUB, a été mis en place fin 2011 (Rivière, 2016). Jusqu'à présent, ce sont des bovins infectés qui étaient à l'origine de ces contaminations des espèces sauvages (Dufour et Bénét, 2015).

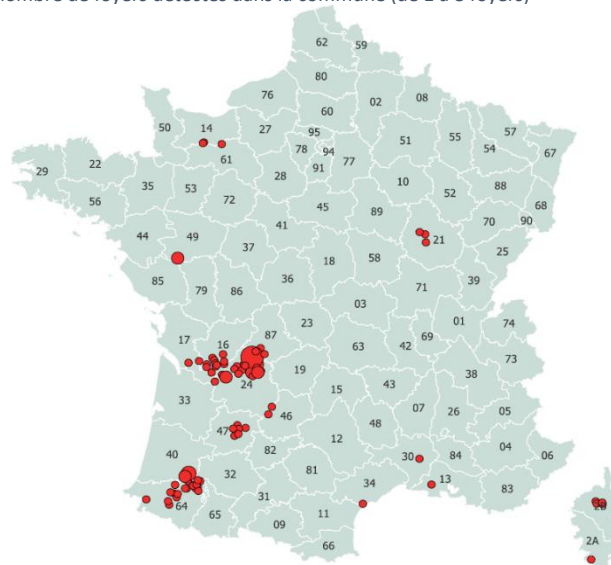
Figure 9. Évolution de l'incidence et de la prévalence annuelles de la TB en France de 1995 à 2018 (Dufour et Durand, 2020)



2.2.2. Situation actuelle

Actuellement, la prévalence apparente continue d'augmenter faiblement, approchant la France du seuil maximal permettant le maintien du statut officiellement indemne (Delavenne *et al.*, 2019) (équivalent à environ 200 foyers par an). La distribution des foyers a évolué : la Côte d'Or, qui était historiquement la plus touchée, est parvenue à réduire fortement ses foyers grâce à une forte sensibilisation des acteurs de terrain et des mesures mises en œuvre pour augmenter l'acceptabilité du dispositif de surveillance et de lutte qui ont permis une meilleure application de ces mesures (Delavenne *et al.*, 2019). Les foyers se concentrent à présent majoritairement dans les départements du sud-ouest de la France (figure 10) où les acteurs étaient moins bien sensibilisés (Guillon *et al.*, 2018) et dans lesquels les voies de transmission de la TB sont compliquées par la présence d'animaux de la faune sauvage infectés (Bouchez-Zacria *et al.*, 2018).

Figure 10. Communes présentant des foyers incidents de tuberculose bovine en 2017 (95 foyers) (Saidou, 2018). Chaque point représente une commune possédant au moins un foyer de tuberculose bovine en 2017, la taille des points étant proportionnelle au nombre de foyers détectés dans la commune (de 1 à 8 foyers)



Cependant, les foyers de TB sont détectés plus précocement qu'auparavant. En effet, en 2017, seuls 30 % des foyers ont été découverts suite à la détection de lésions évocatrices de TB lors de l'inspection systématique des carcasses à l'abattoir contre 75 % en 2000 (Saidou, 2018) ; la majorité des foyers sont donc à présent détectés grâce au dépistage *ante mortem*.

L'origine des foyers ne peut pas toujours être déterminée. Un élevage indemne de TB peut théoriquement s'infecter par trois voies : l'introduction d'un animal infecté dans l'élevage, le voisinage avec un foyer (domestique ou sauvage) ou la résurgence de l'infection dans un élevage suite à une précédente infection. La part de chacune de ces voies de contamination est mal définie en France, toutefois le rôle du voisinage semble être prédominant sur l'introduction d'un animal infecté (Palisson *et al.*, 2016). De plus, il arrive que les foyers soient circonscrits à une zone géographique particulière et dus à un même génotype (Michelet *et al.*, 2019), laissant supposer l'existence d'un facteur local d'entretien et de propagation de l'infection. C'est cette crainte qui pousse à surveiller la faune sauvage.

Plus de soixante ans après la mise en place des premières mesures collectives de lutte contre la TB ayant permis une réduction considérable de sa prévalence, la France peine à l'éradiquer sur son territoire. Malgré les mesures de prophylaxie et de lutte mises en place, le nombre de foyers stagne en France autour de la valeur seuil garantissant le statut officiellement indemne. La plupart des foyers domestiques sont à présents regroupés dans le Sud-Ouest où la présence d'espèces sauvages infectées semble compliquer le contrôle de l'infection.

2.3. L'organisation de la surveillance de la tuberculose bovine en France

2.3.1. Définitions réglementaires

La TB est une maladie à déclaration obligatoire à l'OIE. En France, c'est un danger sanitaire de première catégorie chez toutes les espèces de mammifères (AM du 29 juillet 2013). Le système de surveillance français a pour but la détection la plus précoce possible des foyers, le maintien du statut officiellement indemne et à terme l'éradication de l'infection sur le territoire métropolitain. Il comprend un système de surveillance *ante mortem* dont les composantes (dépistage périodique en élevage, dépistage des animaux lors de leur mouvement et enquêtes épidémiologiques amont et aval) doivent assurer la détection précoce de l'infection des cheptels, et un système de surveillance *post mortem*. Cette surveillance s'appuie sur des définitions sanitaires conformes à la directive européenne 64/432 du conseil du 26 juin 1964, fixées par l'arrêté ministériel du 15 Septembre 2003 article 12 et 13 et synthétisées dans le tableau 7 et le tableau 8.

Les **troupeaux suspects** sont placés sous arrêté préfectoral de mise sous surveillance (**APMS**). Les modalités de gestion d'un élevage suspect sont précisées dans la note de service DGAL/SDSAP/2014-223. L'APMS induit notamment le blocage de l'élevage, c'est-à-dire l'interdiction pour cet élevage de vendre des animaux vivants ou du lait cru, ce qui pénalise économiquement les éleveurs. Le troupeau recouvre sa qualification si les résultats des contrôles par ID, les investigations épidémiologiques et les analyses de laboratoire prévues (cf. paragraphe 2.3.2) sont considérés comme favorables. Si les résultats sont défavorables, le troupeau est déclaré infecté.

Les **troupeaux susceptibles** d'être infectés sont placés sous **APMS de suivi épidémiologique**, ce qui induit la mise en place d'investigations complémentaires mais sans blocage systématique de l'élevage. Lorsque l'élevage est **confirmé infecté**, l'APMS est remplacé par un arrêté préfectoral portant déclaration d'infection (**APDI**) qui prescrit l'application des mesures d'assainissement (abattage total ou sélectif du cheptel).

Tableau 7. Synthèse des définitions sanitaires des statuts indemne, suspect, susceptible et infecté pour un troupeau de bovins (AM du 15 Septembre 2003, articles 6, 12 et 13)

Statut	Définition sanitaire	
Indemne	Tous les bovins sont exempts de signes cliniques de TB ET Les bovins de plus de six semaines sont contrôlés tous les ans ⁽¹⁾ par ID et obtiennent des résultats négatifs ET Le dépistage à l'introduction d'un animal est réalisé conformément à la réglementation (cf. 2.3.2.1) ET Les animaux d'autres espèces sensibles à la TB, infectés ou de statut sanitaire inconnu, sont séparés du troupeau	
	Susceptible	Un lien épidémiologique à risque a été établi avec un animal infecté de TB
	Suspect	Au moins un animal du troupeau est suspect
Infecté	Au moins un animal du troupeau est infecté	
À risque	Ancien foyer depuis moins de 10 ans ⁽²⁾ OU Lien identifié avec un foyer domestique ou sauvage de TB n'ayant pas mené à l'identification du troupeau en tant que foyer OU Des dispositions réglementaires au maintien du statut indemne n'ont pas été respectées OU Elevages commercialisant du lait cru ou fournissant des animaux reproducteurs OU Troupeaux présentés au public	

⁽¹⁾ Il existe une dérogation qui permet d'espacer ces contrôles dans les départements à très faible prévalence (cf. paragraphe 2.3.2.1).

⁽²⁾ En pratique les anciens foyers sont classés à risque pendant trois ans suite à leur assainissement.

Tableau 8. Synthèse des définitions sanitaires des statuts indemne, suspect, susceptible et infecté pour un bovin (AM du 15 Septembre 2003, articles 12 et 13)

Statut	Définition sanitaire	
Indemne	Appartient à un élevage indemne	
Suspect	Quel que soit le troupeau dont il est issu Lésions évocatrices de tuberculose sur la carcasse OU Lésions histologiques évocatrices constatées au LDA OU Réaction non négative à l'ID ou au test IFNy	
	Issu d'un troupeau officiellement indemne	PCR du LDA positive
Infecté	Quel que soit le troupeau dont il est issu Signes cliniques + ID positive OU Isolement et identification de M. bovis , M. caprae ou M. tuberculosis OU IDC positive + lésions évocatrices à l'histologie réalisée par le LDA OU PCR positive + lésions évocatrices à l'histologie réalisée par le LDA OU PCR positive confirmée par la mise en évidence spécifique de l' ADN bactérien de M. bovis , M. caprae ou M. tuberculosis	
	Issu d'un troupeau suspect ou susceptible	PCR positive

2.3.2. Les composantes de la surveillance de la tuberculose bovine en France

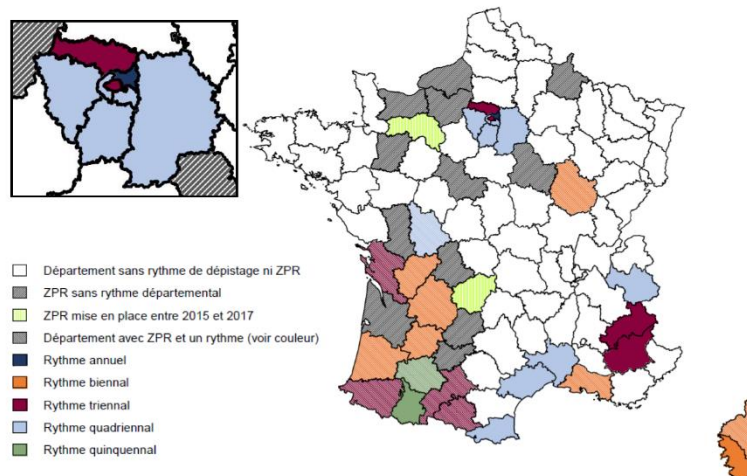
2.3.2.1. Surveillance *ante mortem*

Ce paragraphe détaille les modalités de la surveillance *ante mortem* de la TB dans les élevages français, composante évaluée dans ce travail de thèse.

2.3.2.1.1. Dépistage programmé en élevage

Conformément à la réglementation française, le dépistage programmé en élevage consiste en l'**ID annuelle** de tous les animaux de plus de six semaines. Cependant, la diminution de la prévalence de la TB et le défaut de spécificité des tests de dépistage utilisés ont entraîné une diminution de la valeur prédictive positive des résultats. C'est pourquoi un **allègement des rythmes** de dépistage est permis par la réglementation en fonction de la prévalence de l'infection dans les départements les années précédentes, afin de limiter

Figure 11. Rythmes de dépistage pour la surveillance programmée de la tuberculose bovine de chaque département français entre 2015 et 2017 (Delavenne et al., 2019)



l'impact économique de l'obtention de résultats faussement positifs. Ainsi, le dépistage peut devenir **biennal, triennal ou quadriennal voire être complètement interrompu** dans certains départements français (figure 11) (cette interruption du dépistage concernait 54 départements en 2017). De plus, en pratique, dans la majorité des départements pratiquant encore ce dépistage périodique, seuls les **animaux de plus de 24 mois** sont dépistés car la contention des animaux plus jeunes est plus difficile. Dans certains départements, des **zones de prophylaxie renforcée (ZPR)** dans lesquels les élevages sont soumis à un dépistage annuel sont définies. Ces ZPR correspondent à un zonage réalisé autour de foyers domestiques ou sauvages (Note de service DGAL/SDSPA/2018-598). Les élevages classés « à risque » (tableau 7) sont également soumis à un dépistage annuel.

Le choix de l'ID de dépistage (IDS ou IDC) dépend du département et du contexte épidémiologique. Auparavant, l'IDC était privilégiée dans les élevages où l'on craignait une interférence avec des mycobactéries atypiques. La **tendance actuelle est la généralisation de l'IDC**. En effet, la lecture qualitative de l'IDC est impossible contrairement à celle de l'IDS qui est toujours pratiquée par certains VS. Ainsi, l'IDC, *a priori* moins sensible que l'IDS (cf. paragraphe 2.1.3.1.1), permet en fait un dépistage plus sensible car elle est mieux réalisée sur le terrain. L'utilisation de l'IDC a donc été rendue obligatoire, d'abord pour le dépistage périodique en Dordogne et dans les zones à risque de Nouvelle-Aquitaine et d'Occitanie (Note de service DGAL/SDSPA/2017-841) pour la campagne de dépistage 2017-2018, puis, pour la campagne 2018-2019, dans les 12 départements de la région Nouvelle-Aquitaine, dans les départements dans lesquels une ZPR a été définie et dans tous les élevages classés à risque (Note de service DGAL/SDSPA/2018-598).

Un résultat non-négatif à l'ID de dépistage (ID1) chez au moins un animal du troupeau testé entraîne une suspicion de TB qui a pour conséquences la mise sous APMS de l'élevage et la conduite d'investigations complémentaires. Ces investigations peuvent être réalisées selon **trois protocoles** distincts définis par la note de service DGAL/SDSPA/2016-1001. La direction départementale (de la cohésion sociale et) de la protection des populations (DD(CS)PP) identifie le protocole à utiliser, principalement sur la base de l'estimation qualitative de la probabilité pour que cette suspicion

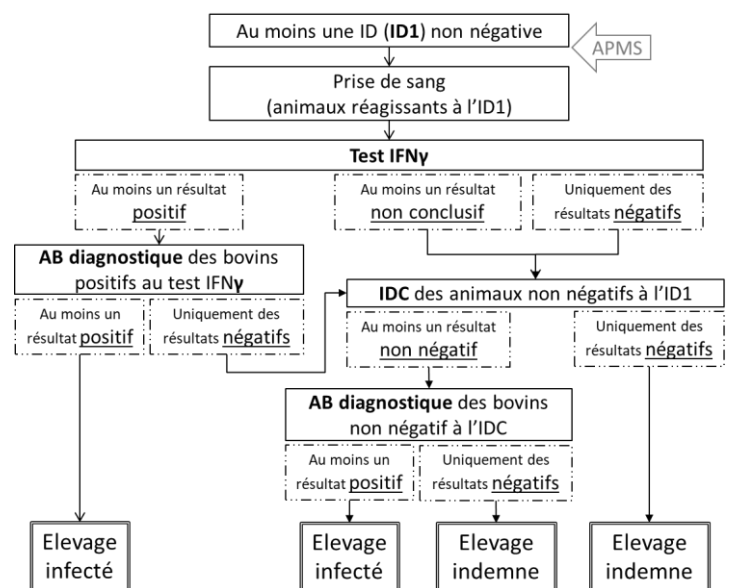
traduise une réelle infection. S’il semble probable qu’il s’agisse réellement d’une infection, la suspicion est qualifiée de « **suspicion forte** » ; dans le cas contraire, on parle de « **suspicion faible** ». Une IDC positive, un nombre important de réactions non négatives à l’ID1 dans le troupeau, un troupeau classé « à risque » et le voisinage avec un foyer de TB moins de trois ans (foyer sauvage) à cinq ans (foyer domestique) auparavant, sont des critères entraînant le classement en « suspicion forte ». Ce classement permet d’adapter le protocole utilisé : pour les suspicions fortes, on souhaite optimiser la sensibilité du protocole pour augmenter sa valeur prédictive négative (pour avoir plus confiance en un résultat négatif). Au contraire, pour les suspicions faibles, l’objectif est d’avoir la meilleure spécificité possible afin d’améliorer la valeur prédictive positive (et donc la confiance dans les résultats positifs).

Il existe un seul **protocole réglementaire pour une suspicion forte (protocole « abattage-recontrôle IDC »)**, qui consiste à réaliser un **abattage diagnostique** des animaux suspects (i.e. ayant obtenu un résultat non-négatif à l’ID1). Si, conformément à la procédure décrite dans le paragraphe 2.1.3.2, le résultat d’un des abattages diagnostiques est positif, l’élevage est considéré comme infecté. S’ils sont tous négatifs, les animaux de plus de 24 mois sont testés une seconde fois par IDC au minimum six semaines plus tard (recontrôle, **IDC2**). Les éventuels animaux réagissant subissent à leur tour un abattage diagnostique. Si leurs résultats sont négatifs ou si aucun animal n’a réagi à l’IDC de recontrôle, l’élevage retrouve sa qualification « officiellement indemne ». Dans le cas contraire, l’élevage est déclaré infecté.

En cas de suspicion faible, deux protocoles existent. La voie rapide (**protocole « abattage seul »**) consiste en l’**abattage diagnostique** des animaux réagissant. Le résultat (positif ou négatif) du ou des abattage(s) diagnostique(s) détermine le statut (respectivement infecté ou indemne) de l’élevage.

La voie lente (ou conservatoire) (**protocole « triage IFN »**), est plus complexe (figure 12). Elle repose sur l’utilisation en série du **test IFN γ** . Seuls les animaux ayant fourni un résultat positif à ce test IFN γ ou non-négatif à une seconde IDC sont abattus pour diagnostic. En cas d’**abattage diagnostique** positif, l’élevage est déclaré infecté. Une particularité de ce protocole est la **possibilité d’allègement des mesures de blocage**. En effet, à l’issue des tests IFN γ , si tous les résultats sont négatifs, le mouvement des animaux n’ayant pas réagi à l’ID1 est autorisé ; si au moins un résultat est non conclusif sans résultat positif au test IFN γ , le mouvement des animaux non réagissant à l’ID1 est autorisé uniquement vers l’engraissement.

Figure 12. Schéma du protocole « triage IFN » utilisé pour investiguer une suspicion faible dans un élevage (note de service DGAL/SDSPA/2016-1001)



Remarque : Deux alternatives existent pour ce protocole, nous ne présentons que l’alternative la plus fréquemment utilisé d’après F. Chevalier, le coordinateur national de la lutte contre la TB

Légende = ID : intradermotuberculination, AB : abattage, APMS : arrêté préfectoral de mise sous surveillance.

2.3.2.1.2. Dépistage aux mouvements

L’arrêté ministériel du 15 Septembre 2003 prévoit le dépistage obligatoire de tous animaux échangés âgés de plus de six semaines. Toutefois des dérogations sont prévues. Ainsi, ce dépistage n’est plus obligatoire si la durée du transfert a été inférieure ou égale à six jours, ce qui est la plupart du temps le cas. L’obligation est conservée pour les animaux **provenant d’un élevage classé à risque** ou **provenant d’un département où la prévalence annuelle de la TB cumulée sur 5 ans est supérieure à**

la moyenne nationale et à destination d'un élevage possédant un taux de rotation supérieur à 40 % (Note de service DGAL/SDSPA/2006-8051 modifiée par les notes de service 2011-8209 et 2017-863).

Entre 2015 et 2017, ce dépistage n'a permis d'identifier qu'un seul foyer de TB (Delavenne *et al.*, 2019), deux en 2018.

2.3.2.1.3. Liens épidémiologiques

Suite à la découverte d'un foyer de TB, une enquête est menée pour identifier les élevages en lien avec le foyer. Sont recherchés :

- a. **Les liens avals** : les élevages ayant acheté des animaux à l'élevage foyer entre le moment de l'infection du foyer et sa détection. Si on ne parvient pas à estimer la date d'infection du foyer, l'enquête peut remonter jusqu'à neuf ans ; en moyenne elle remonte jusqu'à cinq ans avant la détection du foyer (communication personnelle, coordinateur national TB F. Chevalier) ;
- b. **Les liens amonts** : les élevages ayant vendu des animaux à l'élevage foyer. De la même façon que pour la recherche de lien aval, lorsque l'on ne peut pas définir de fenêtre épidémiologique, la recherche peut concerner jusqu'aux neuf années précédant la détection du foyer ;
- c. **Les liens de voisinage, échanges de matériel ou de bovins.**

Les élevages identifiés en lien épidémiologique sont considérés comme **susceptibles** d'être infecté et doivent être placés sous **APMS de suivi épidémiologique**, qui prévoit des investigations complémentaires au sein de l'élevage mais ne bloque pas la circulation des animaux. Deux protocoles d'investigations sont possibles pour les liens avals, la voie conservatoire ou la voie rapide, décrites ci-après. L'investigation des élevages en lien amont et en lien de voisinage se fait de la même façon que l'investigation d'une suspicion forte issue du dépistage périodique. Pour les liens amont, elle est réalisée lors de la campagne de prophylaxie suivante (communication personnelle F. Chevalier).

Deux situations sont possibles lors de **l'investigation d'un lien aval**. Soit le **bovin issu** (c'est-à-dire celui responsable du lien) **n'est plus présent** dans l'élevage en lien. Dans ce cas, tous les animaux de plus de 24 mois sont testés par IDC. En cas de résultat(s) non-négatif(s), l'élevage est placé sous APMS de suspicion et l'investigation se poursuit selon le protocole de suspicion forte décrit en 2.3.2.1.1. Si le **bovin issu est toujours présent** dans l'élevage aval, il est alors soumis à une IDC. Si celle-ci est non négative, l'élevage est placé sous APMS de suspicion et la même procédure que lorsque le bovin issu est absent est appliquée. Si **l'IDC est négative**, il est possible de lever l'APMS de suivi, l'élevage retrouve son statut indemne mais est classé « à risque » (**protocole « identifier et tester »**). Une autre possibilité est de réaliser un **abattage diagnostique de l'animal** même si le résultat de l'IDC est négatif (**protocole « identifier et abattre »**). En cas de résultat positif, l'élevage sera déclaré infecté ; dans le cas contraire, il sera à nouveau considéré indemne sans classement « à risque ».

La surveillance *ante mortem* est donc un système complexe comprenant trois composantes : le dépistage périodique en élevage, le dépistage lors des mouvements et l'investigation des liens épidémiologiques.

L'investigation des suspicions issues du dépistage périodique peut être faite selon trois protocoles différents en fonction de la confiance qu'accorde la DD(CS)PP à cette suspicion. Quel que soit le protocole, ce sont les résultats des abattages diagnostiques qui permettent de distinguer les élevages infectés des élevages indemnes. Le dépistage périodique a été, en 2017, responsable de la détection de 61 % des foyers (Delavenne *et al.*, 2019).

De nombreuses dérogations au dépistage aux mouvements existent, il n'est à présent obligatoire que dans certaines situations particulièrement à risque et n'a permis de détecter que deux élevages infectés en 2018 (2 % des foyers détectés).

L'investigation des liens épidémiologiques permet de rechercher l'origine de la contamination d'un élevage foyer (liens amonts, liens de voisinage) et de s'assurer que ce foyer n'a pas lui-même diffusé la maladie (liens avals, liens de voisinage). Cette composante de la surveillance a permis la détection de 9 % des foyers incidents de 2017 (Delavenne *et al.*, 2019).

2.3.2.2. Surveillance *post mortem* à l'abattoir

À l'abattoir, toutes les carcasses sont inspectées, la présence d'éventuelles lésions évocatrices de TB est systématiquement recherchée. En cas de détection de lésions, l'organe lésé ainsi que les nœuds lymphatiques qui le drainent sont envoyés à un LDA afin de réaliser une analyse histologique, une PCR et une culture bactérienne (Note de service DGAL/SDSPA/2014-108). L'animal et son élevage d'origine sont déclarés suspects de TB et un APMS est pris sur l'élevage en attendant les résultats des analyses de laboratoire. Si les analyses de laboratoire confirment l'infection de l'animal (tableau 8), l'élevage est placé sous APDI (Note de service DGAL/SDSPA/2016-1001).

La surveillance *post mortem* s'appuie sur la présence de lésions macroscopiques sur les carcasses. Elle permet une détection tardive des foyers de TB. En 2017, 28 % des foyers incidents ont été détectés grâce à cette modalité de dépistage (Delavenne *et al.*, 2019).

2.3.2.3. Le dispositif SylvaTub : surveillance de la faune sauvage

Le dispositif SylvaTub est un dispositif de surveillance de la faune sauvage qui a pour objectifs la détection de l'infection à *M. bovis* dans la faune sauvage libre, le suivi du niveau d'infection dans les zones où l'infection a été détectée chez des espèces sauvages et l'amélioration des connaissances de l'interaction entre la faune sauvage et la faune domestique par le typage moléculaire des souches (Rivière, 2016). Ce système de surveillance concerne les cerfs, les chevreuils (*Capreolus capreolus*), les sangliers et les blaireaux. Il s'appuie sur une surveillance événementielle (recherche de lésions évocatrices de TB chez les cervidés et les sangliers tués à la chasse et chez les cervidés, les sangliers et les blaireaux trouvés morts ou mourants) et une surveillance programmée (piégeage de blaireaux dans les zones à risque et échantillonnage des grands gibiers tués à la chasse) (Note de service DGAL/SDSPA/2018-708).

2.4. Les enjeux de la surveillance de la tuberculose bovine

2.4.1. Un enjeu de santé publique minime en France

L'aspect zoonotique, s'il est encore reconnu comme un véritable enjeu de santé publique dans certains pays en développement (Sichewo *et al.*, 2019), n'est plus vraiment la raison motivant les forts investissements dédiés à la surveillance et la lutte contre la TB dans les pays développés. En effet, en Europe et en Amérique du Nord, il a été estimé que seuls 0,5 % à 1 % des cas de tuberculose chez l'Homme étaient dus à *M. bovis* (Robert *et al.*, 1999 ; Ashford *et al.*, 2001) et les cas rapportés correspondaient à des infections généralement contractées à l'étranger ou à la réactivation de l'infection chez des personnes ayant vécu avant la mise en place de la pasteurisation systématique du lait (de la Rua-Domenech *et al.*, 2006). Grâce à la pasteurisation du lait et aux mesures de surveillance qui ont permis de réduire drastiquement la prévalence de l'infection dans ces pays développés, la TB n'y est désormais plus considérée comme un véritable problème de santé publique (Thoen *et al.*, 2006).

En France, du fait de la très faible prévalence de l'infection chez les bovins et de la pasteurisation du lait, les enjeux de santé publique sont minimes comparés aux enjeux économiques de la surveillance de la TB.

2.4.2. Un enjeu économique fort

Chaque année, des moyens financiers et humains importants sont mis en œuvre pour la surveillance et la lutte contre la TB. Ainsi, en France, la gestion de la TB coûte actuellement environ 22,3 millions d'euros par an (dont 18,6 à l'Etat et 3,7 aux éleveurs) (Hénaux *et al.*, 2017). La sollicitation de ces moyens est motivée par les enjeux économiques de la surveillance de la TB, induits principalement par

la nécessité de conserver un statut officiellement indemne (OI). En effet, ce statut, attribué par l'UE aux pays avec un très faible taux d'incidence, facilite voire conditionne les échanges commerciaux d'animaux vivants et de sous-produits animaux avec les autres pays. Or, la France exporte beaucoup d'animaux à l'étranger : 87 % des jeunes bovins sont exportés, en particulier vers l'Italie et l'Espagne (Institut de l'élevage and Confédération Nationale de l'Élevage, 2018). La perte du statut OI entraînerait l'arrêt de certains de ces échanges et/ou les complexifierait en rendant obligatoire la réalisation de tests de dépistage sur tous animaux à exporter, entraînant ainsi une diminution de la compétitivité de la filière française face à d'autres pays exportateurs. Le système de surveillance doit donc permettre une détection des foyers la plus précoce possible afin de limiter la diffusion de l'infection et ainsi de conserver le statut OI de la France (Saidou, 2018).

La conservation du statut OI de la France est actuellement l'enjeu économique majeur de la surveillance de la TB, qui justifie les investissements humains et financiers importants engagés dans le contrôle de cette infection.

2.4.3. L'implication des acteurs compromise par les contraintes de la surveillance et ses difficultés de mise en œuvre

L'efficacité du système de surveillance *ante mortem* de la TB repose grandement sur l'implication de ses principaux acteurs : les éleveurs, les VS et la DD(CS)PP. Or, cette surveillance impose des contraintes matérielles parfois importantes qui peuvent devenir difficilement supportables. Ces contraintes peuvent provoquer une lassitude de ces acteurs, réduisant l'acceptabilité du dispositif et donc son efficacité. Ce type d'effet a déjà été mis en évidence par des approches sociologiques qualitatives dans d'autres pays européens comme l'Irlande (Meskell *et al.*, 2013), l'Espagne (Ciaravino *et al.*, 2017) et la Belgique (Calba *et al.*, 2016). En France, l'évaluation OASIS du dispositif de surveillance de la TB menée en 2012 (Gorecki, 2012), soulignait un manque d'acceptabilité du dispositif. Toutefois, peu d'études avaient été publiées au début de ce travail sur l'engagement des acteurs dans la surveillance *ante mortem* dans les conditions françaises. Le paragraphe suivant fait un état des lieux des contraintes de la surveillance *ante mortem* de la TB dans le contexte français.

2.4.3.1. Des contraintes matérielles pour les éleveurs

Les éleveurs sont au premier plan pour la surveillance par dépistage programmé en élevage, et prennent en charge (souvent *via* les Groupement de Défense Sanitaire (GDS)) le coût de ce dépistage. Ainsi, dans les départements où le dépistage est maintenu, les éleveurs doivent consacrer une somme non négligeable à ces ID. Cette somme a été estimée de 3,7 millions d'euros par an pour l'ensemble de la profession (Hénaux *et al.*, 2017). De plus, les éleveurs sont responsables de la contention de leurs bovins lors des interventions des VS et doivent donc également consacrer des moyens humains (dans l'idéal deux personnes pour aider le VS) à ce dépistage.

Par ailleurs, la déclaration d'une suspicion dans leur élevage (entraînant le blocage de l'exploitation) ainsi que la détection de l'infection dans leur cheptel (entraînant l'abattage total ou partiel du cheptel) ont pour eux des conséquences économiques et psychologiques qui peuvent être difficiles à accepter pour une infection si discrète cliniquement. Par exemple, les blocages suite à une suspicion génèrent des coûts indirects pour l'éleveur (perte du prix de vente des animaux mais aussi coût de leur entretien sur la période de blocage qui peut être très longue (Buczinski et Reuillon, 2015), une surcharge de travail (plus d'animaux à entretenir) et ont un impact psychologique pour l'éleveur qui ne peut pas gérer son cheptel comme il l'avait prévu, en subit les conséquences économiques et voit certains de ses animaux abattus. Ces conséquences d'une suspicion sont d'autant plus difficiles à accepter pour les éleveurs que la « fiabilité » d'un résultat non-négatif à l'ID n'est pas très satisfaisante. En effet, à cause de la spécificité imparfaite des ID et de la faible prévalence de la maladie, la valeur prédictive positive de l'ID de dépistage n'est pas bonne. De fait, on observe de très faibles taux de confirmation des suspicions entraînées par l'ID (environ 5 % en 2018) (Dufour et Durand, 2020), qui peuvent entraîner une perte de confiance dans le dispositif comme cela a été mis en évidence en Espagne

(Ciaravino *et al.*, 2017), et l'impression de subir des contraintes et d'abattre des animaux (abattages diagnostiques) « pour rien ».

2.4.3.2. Un double rôle délicat et des difficultés opérationnelles pour les VS

La particularité du système de surveillance français est qu'il repose en très grande partie sur les VS qui sont des VS praticiens privés. Ainsi, la réalisation des ID de dépistage et la déclaration des résultats non-négatifs sont confiées aux VS des élevages, qui endossent alors un double rôle face à l'éleveur. Connaissant les conséquences importantes que peut avoir une suspicion pour un éleveur et ayant conscience de la faible valeur prédictive positive des résultats, certains VS peuvent adapter leur pratiques d'ID et/ou de déclaration afin de ne pas pénaliser l'éleveur mais s'éloignent alors des recommandations de pratiques choisies pour optimiser la sensibilité du dispositif (Meskell *et al.*, 2013 ; Calba *et al.*, 2016 ; Gully, 2018).

Par ailleurs, l'ID est techniquement difficile à réaliser d'autant plus en cas de contention insuffisante. Or les systèmes de contention peuvent être très différents selon le département, le type de production et l'élevage (Crozet, 2018). Ainsi, le VS peut parfois se retrouver dans la délicate situation de devoir réaliser des ID sur des animaux insuffisamment contenus, mettant alors son intégrité physique en danger et diminuant les chances que l'ID soit réalisées conformément aux recommandations.

2.4.3.3. Un outil de gestion contraignant pour les DD(CS)PP

Les DD(CS)PP jouent un rôle central de gestion de la surveillance. Ils définissent les protocoles à adopter et les conduites à tenir. De plus, c'est par eux que passe le suivi des suspicions et des foyers. Ils sont confrontés à la difficulté de la prise de décision dans des situations complexes avec une incertitude sur la qualité des tests. De plus, l'outil de gestion permettant la centralisation nationale des données de surveillance (SIGAL) est si peu pratique qu'il ne permet ni la centralisation efficace de données, ni ne facilite la gestion des foyers et suspicions par les DD(CS)PP (Gorecki, 2012). Ainsi, il n'est pas rare que chaque DD(CS)PP utilise son propre système de gestion (souvent *via* des tableurs Excel) et renseigne à part les informations dans SIGAL, ce qui constitue alors plus une charge de travail supplémentaire plutôt qu'un réel outil d'aide à la gestion. Il en résulte des informations centralisées incomplètes et souvent incohérentes.

Le système de surveillance de la TB entraîne des contraintes non négligeables pour les principaux acteurs de la surveillance. Un des enjeux de la surveillance est alors de conserver la motivation de ses acteurs. Pour cela, les efforts doivent faire sens pour les acteurs, ce qui n'est pas forcément toujours le cas d'après les études réalisées dans certains pays européens (Ciaravino *et al.*, 2017). La réduction de certaines contraintes de blocage et d'abattage pourrait augmenter l'acceptabilité du dispositif, comme cela a été le cas en Côte d'Or avec la mise en place de l'investigation des suspicions faibles par la voie lente (protocole « triage IFN ») et de l'abattage sélectif dans les foyers (Delavenne *et al.*, 2019). Des dispositions ont déjà été prises pour tenter de répondre à ces problèmes : organisation de formations sur la TB, aide financière de l'État pour le dépistage périodique par IDC, présence de coordinateurs régionaux, etc. Ces efforts doivent se poursuivre et d'autres pistes devront être explorées pour tenter d'améliorer l'acceptabilité du système de surveillance *ante mortem* de la TB.

2.5. Conclusion du deuxième chapitre

La TB est une maladie infectieuse chronique qui représente un enjeu économique majeur en France. L'infection ne causant généralement pas de signes cliniques, des tests de dépistage et tests diagnostiques ont été développés. L'ID, actuellement le pilier de la surveillance *ante mortem*, est difficile à mettre en œuvre, fortement opérateur-dépendant et pose des problèmes de spécificité. Le test IFN γ est plus facile à réaliser et à standardiser mais il n'est pas reconnu par l'UE comme une alternative complète à l'ID. Seule l'identification de *M. bovis*, *M. tuberculosis* ou *M. caprae* permet le diagnostic de certitude ; toutefois des définitions sanitaires réglementaires prenant en compte des combinaisons d'analyses de laboratoire permettent également de définir le statut d'un animal et à fortiori d'un troupeau. Le système de surveillance de la TB est un système complexe comprenant deux approches complémentaires *ante* et *post mortem*. La surveillance *ante mortem*, qui nous intéresse dans ce travail, est l'élément clef de la surveillance car elle vise une détection précoce des foyers de TB afin d'éviter la diffusion de l'infection et donc d'assurer la conservation du statut officiellement indemne de la France.

La surveillance *ante mortem* de la TB se heurte toutefois à une difficulté d'optimisation. En effet, l'objectif d'éradication de la TB nécessite un système de surveillance le plus sensible possible, permettant de détecter les foyers de TB le plus précocement possible. Mais cette maximisation de la sensibilité ne doit pas se faire au détriment de la spécificité du dispositif, car les erreurs par excès du système (suspicion dans des élevages en réalité non infectés) entraînent des pertes économiques pour l'État (coût des analyses complémentaires et de la compensation des abattages) et pour l'éleveur (blocage de l'élevage) et discrédite le système auprès de ses acteurs, aggravant les difficultés d'acceptabilité des mesures déjà dégradées par des contraintes pratiques de réalisation du dépistage. La réalisation de l'ID conformément aux prescriptions réglementaires et les conséquences du blocage prolongé d'un élevage semblent être des leviers majeurs d'optimisation de cette surveillance.

2ème partie : Contribution personnelle

Chapitre 1. Problématique et objectifs de la thèse

La surveillance de la TB en France se justifie actuellement par des enjeux socio-économiques importants. Le maintien du statut indemne de la France, facilitant l'exportation d'animaux vivants qui est une composante clé des débouchés économiques de la filière bovine française, nécessite un système de surveillance efficace et fiable afin de détecter aussi précocement que possible les élevages infectés pour éviter la diffusion de l'infection. À terme, l'objectif reste l'éradication de cette infection. De plus, la justification de l'efficacité de ce système de surveillance est nécessaire afin de conserver la confiance des instances internationales, en particulier de l'Union Européenne.

Dans ce contexte, il semblait important de mener une évaluation du dispositif de surveillance afin d'estimer son efficacité et sa fiabilité, d'identifier ses points faibles et de proposer des améliorations opérationnelles. Toutefois, ce dispositif est complexe puisqu'il est constitué de deux sous dispositifs : la surveillance *ante mortem* et la surveillance *post mortem*. La surveillance *ante mortem* est elle-même composée de trois composantes (dépistage périodique dans les élevages, enquêtes épidémiologiques, dépistage aux mouvements des animaux) pour lesquelles il existe plusieurs protocoles réglementaires possibles. Face à l'ampleur du travail d'évaluation de ces deux sous-dispositifs, celui-ci a été divisé en deux projets de recherche distincts. Cette thèse est l'un d'entre eux et avait pour objectif **l'évaluation de la surveillance *ante mortem* de la TB dans les élevages bovins français.**

Le dispositif de surveillance *ante mortem* de la TB s'applique dans un contexte socio-économique complexe et difficile. En effet, dans le contexte économique actuel, l'État fait face à une diminution des ressources financières et humaines disponibles, justifiant un besoin d'optimisation des dispositifs de surveillance. Par ailleurs, ce dispositif implique de nombreux acteurs (DDPP, VS, éleveurs, laboratoires d'analyse) dont l'adhésion est primordiale au fonctionnement du système. Or, les éleveurs subissent des conséquences économiques non négligeables, induites notamment par le coût du dépistage périodique et par le blocage des élevages suspects, alors que l'impact de l'infection sur la productivité de l'élevage est négligeable dans le contexte épidémiologique actuel. Les VS quant à eux doivent assurer un double rôle auprès des éleveurs (vétérinaire privé et VS) qui peut certaines fois s'avérer contradictoire surtout connaissant le manque de spécificité des tests de dépistage utilisés, la faible valeur prédictive positive d'un résultat non-négatif au dépistage dans le contexte actuel de faible prévalence, et les conséquences économiques d'une suspicion de TB pour l'éleveur (Gully, 2018). Ainsi, la problématique d'évaluation de la surveillance *ante mortem* de la TB dans un but d'optimisation et d'aide à la décision des gestionnaires nécessitait la prise en compte de considérations techniques, économiques et humaines.

L'objectif d'évaluation de la surveillance *ante mortem* de la TB nécessitait toutefois le développement de méthodes particulières afin de résoudre les problématiques méthodologiques décrites dans la première partie de ce manuscrit : l'intégration de données prenant en compte les facteurs humains et les déterminants sociaux dans une évaluation quantitative, économique et technique, d'un système de surveillance ; et le développement d'un outil d'aide à la décision multicritère permettant aux gestionnaires de choisir les protocoles d'investigation les plus adaptés au contexte épidémiologique et socio-économique de leur département.

Tout d'abord, la méthode des arbres de scénario a été appliquée à l'évaluation coût-efficacité du dépistage périodique de la TB. Puis, une méthode pour prendre en compte les pratiques des VS a été développée et appliquée à l'évaluation du dépistage périodique. En s'appuyant sur cette méthode, des protocoles alternatifs de dépistage périodique ont été évalués afin de les comparer aux protocoles réglementaires. Ensuite, les protocoles d'investigation des liens épidémiologiques et de dépistage à l'introduction ont été évalués successivement. L'évaluation coût-efficacité globale de la surveillance *ante mortem* à l'échelle départementale a ensuite été réalisée. Finalement, un outil d'aide à la décision multicritère appliqué au choix d'un protocole de dépistage périodique a été élaboré et mis en œuvre.

Contribution personnelle – Chapitre 1. Problématique et objectifs de la thèse

Le dernier chapitre de cette seconde partie propose une discussion générale des résultats de la thèse ainsi que de ses perspectives

Chapitre 2. Évaluation coût-efficacité du dépistage périodique de la tuberculose en élevage

Ce travail a donné lieu à une publication :

V. Poirier, J. Rivière, A. Bouveret, S. Gardon, and B. Dufour. 2019. Cost-effectiveness assessment of three components of the bovine tuberculosis surveillance system by intradermotuberculination in French cattle farms by a scenario tree approach. *Prev. Vet. Med.* **166**, 93-109.

2.1. Objectifs spécifiques de l'évaluation

La première étape consistait à conduire une évaluation coût-efficacité du système de surveillance de la TB en élevage *via* le dépistage périodique et l'investigation des suspicions ainsi mises en évidence. L'objectif de cette première partie de notre travail était de fournir des données quantitatives d'aide à la décision concernant le dépistage périodique en élevage, en particulier pour le choix des protocoles d'investigation des suspicions en fonction du type d'élevage. Nous avons donc évalué les trois protocoles réglementaires de dépistage périodique en élevage (comprenant le dépistage et l'investigation des éventuelles suspicions) présentés dans le paragraphe 2.3.2.1.1 de la première partie du manuscrit : les protocoles « abattage et recontrôle IDC » (abattage des animaux suspects et recontrôle par IDC du reste du troupeau), « abattage seul » (abattage des animaux suspects seul) et « triage IFN γ » (test IFN γ en série puis abattage ou recontrôle IDC des animaux suspects selon le résultat de l'IFN γ). L'orientation française actuelle des programmes de dépistage périodique en élevage visant à la généralisation de l'utilisation de l'IDC, ces protocoles ont été évalués en posant l'hypothèse que le premier test de dépistage (ID1) était une IDC.

Pour éviter la multiplication des résultats et bien que la construction de nos modèles nous permette d'estimer le ratio coût/efficacité de chaque protocole (dans chaque type de troupeau pour chaque département de France métropolitaine), nous avons fait le choix de ne présenter dans ce manuscrit que les résultats pour un département pour lequel les caractéristiques en terme de type de troupeau étaient proches de celles de la moyenne nationale : le Cantal (département 15).

2.2. Matériel et méthode

2.2.1. Construction et paramétrage des arbres de scénario

Pour chaque protocole, un arbre de scénario a été construit, suivant la méthode décrite dans le paragraphe 1.3.2.2 de la première partie. Dans un premier temps, une revue de la littérature ainsi qu'une analyse des données disponibles ont permis d'identifier les paramètres influents (soit sur la probabilité d'infection soit sur la probabilité de détection) à inclure dans les arbres de scénario en tant que nœud de catégorie. Les arbres obtenus pour chacun des protocoles sont présentés dans les figures 13 à 15. Les nœuds inclus dans les arbres ainsi que la modélisation des probabilités d'occurrence de chacune des branches qui en sont issues sont présentés dans cette partie.

2.2.1.1. Le type de troupeau

2.2.1.1.1. Le type de production

Dans de nombreuses études, le type de production (allaitant, laitier, mixte) est statistiquement associé à la probabilité d'infection d'un élevage (Ramírez-Villaescusa *et al.*, 2010 ; Bessell *et al.*, 2012 ; Lahuerta-Marin *et al.*, 2016). Une étude française (Bekara, 2014) portant sur l'analyse des foyers de TB entre 1965 et 2000 a également mis en évidence que la proportion de vaches laitières dans un

troupeau était significativement associée à l'incidence de TB à l'échelle départementale. De plus, selon le type de production, le VS est confronté à des animaux de races différentes (qui sont par exemple plus ou moins faciles à manipuler et à contenir), des moyens de contentions et des conduites d'élevages variables, etc. Tous ces facteurs peuvent avoir un impact à la fois sur la probabilité pour un élevage ou pour un bovin d'être infecté, mais aussi sur la probabilité de détecter l'infection (à travers les contraintes pratiques pouvant être variables dans chaque type d'élevage). Enfin, chaque type de production a une distribution des âges des animaux différente, la proportion d'animaux testés est donc différente en fonction des types de troupeau, ce qui influence la probabilité de détecter l'infection dans le troupeau.

Le type de production a donc été retenu en tant que nœud de catégorie dans nos arbres de scénario, en suivant la classification OMAR (Observatoire de la Mortalité des Animaux de Rente) (Perrin *et al.*, 2011). La proportion de chaque type de troupeau dans un département d'intérêt a été extraite de la Base de Données Nationale d'Identification (BDNI) dans laquelle les catégories de production du projet OMAR étaient directement disponibles. Trois types de production ont ainsi été pris en compte : laitier, allaitant ou mixte (à la fois laitier et allaitant). Pour les élevages allaitants, les élevages pratiquant uniquement l'engraissement ont été exclus car ils bénéficient, pour la plupart d'entre eux, d'une dérogation au dépistage périodique de TB (article 15 de l'arrêté du 15 Septembre 2003).

Figure 13. Arbre de scénario utilisé pour modéliser le protocole de dépistage "abattage seul"

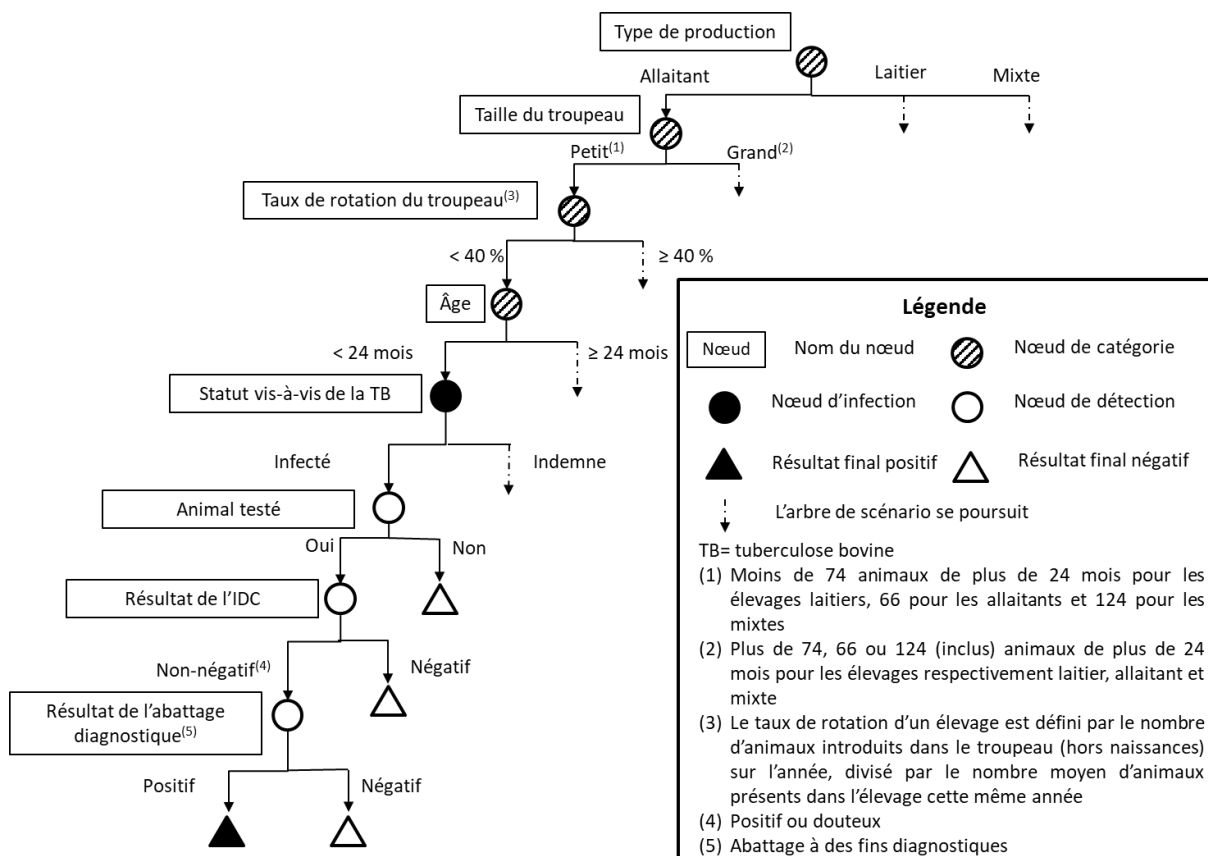


Figure 14. Arbre de scénario utilisé pour modéliser le protocole "abattage-recontrôle IDC"

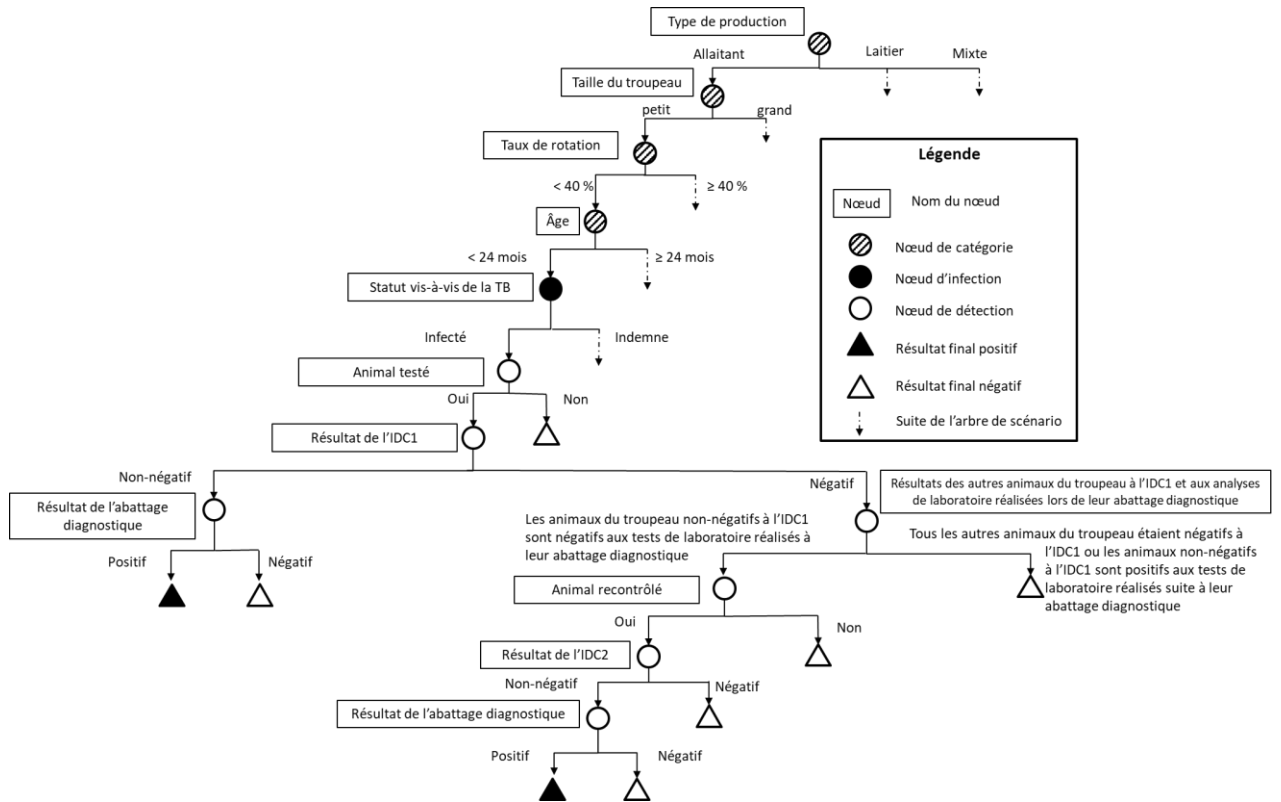
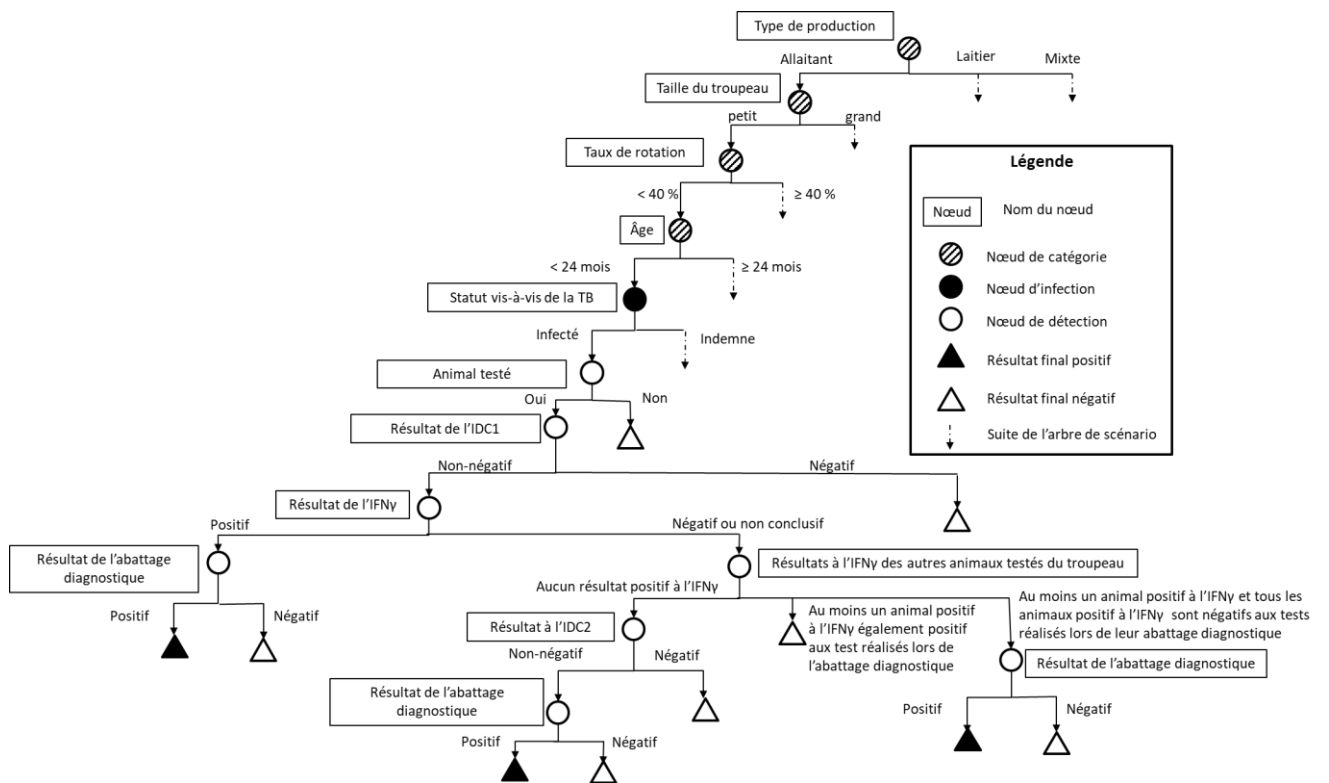


Figure 15. Arbre de scénario utilisé pour modéliser le protocole de dépistage « triage IFN »



2.2.1.1.2. La taille de l'élevage

Dès les années 1990, la taille du troupeau a été identifiée comme un potentiel facteur de risque d'infection par la TB (Griffin *et al.*, 1996). Depuis, plusieurs études au Royaume Uni (Bessell *et al.*, 2012 ; Ramírez-Villaescusa *et al.*, 2010 ; Winkler et Mathews, 2015), au Canada (Munroe *et al.*, 1999) et en Nouvelle Zélande (Porphyre *et al.* 2008) l'ont confirmé. En France, une association statistiquement significative entre la taille et la densité des troupeaux et l'incidence de TB à l'échelle départementale a été mise en évidence (Bekara, 2014).

De plus, la taille du troupeau a une influence évidente sur le nombre d'animaux testés et donc sur la probabilité de détecter une éventuelle infection dans un élevage et sur le coût du dépistage.

Pour chaque type de production, un « petit » troupeau a été défini comme un troupeau dans lequel le nombre de bovins de plus de 24 mois était inférieur à la moyenne nationale pour ce type d'élevage (74 adultes pour les élevages laitiers, 66 pour les allaitants et 124 pour les mixtes). Un troupeau a été considéré comme « grand » si le nombre de bovins adultes était supérieur ou égal à cette moyenne nationale. La proportion de chaque taille de troupeau (petit ou grand) a été estimée pour chaque type de production dans les départements étudiés grâce à une extraction de la BDNI pour l'année 2016.

2.2.1.1.3. Le taux de rotation dans le troupeau

Dans la réglementation française, le taux de rotation d'un troupeau est défini par le nombre d'animaux qui sont introduits dans le troupeau (hors naissances) au cours d'une année, divisé par le nombre moyen d'animaux présents dans l'élevage cette même année. Un taux de rotation supérieur ou égal à 40 % est considéré comme facteur de risque de TB (Note de service DGAL/SDSPA/N2005-8076). En effet, les mouvements de bovins ont été mis en évidence comme étant un bon facteur prédictif de l'apparition de foyer de tuberculose bovine en Grande Bretagne (Gilbert *et al.*, 2005). De plus, l'achat d'animaux est considéré comme une des causes possible d'infection d'un élevage (Gopal *et al.*, 2006 ; Bénét *et al.*, 2016) et l'achat d'un animal provenant d'un élevage infecté a été identifié par Palisson *et al.* en 2016 comme un facteur de risque d'infection pour un élevage français.

Par ailleurs, le taux de rotation d'un élevage peut avoir un impact sur le coût du protocole d'investigation puisqu'un élevage avec un fort taux de rotation subit généralement plus de pertes économiques indirectes dues à l'interdiction de vente des bovins.

Dans nos arbres de scénario, nous avons utilisé le seuil réglementaire de 40 % pour distinguer les troupeaux à fort taux de rotation de ceux à faible taux de rotation. La proportion d'élevages à faible et à fort taux de rotation dans chaque type de production, pour chaque taille d'élevage, et dans chaque département a été calculé sous R à partir d'extractions de la BDNI pour l'année 2016.

Douze type de troupeaux ont été ainsi définis pour nos modèles en fonction du type de production (laitier/allaitant/mixte), de la taille (petit/grand) et du taux de rotation du troupeau (< ou \geq 40 %) afin de prendre en compte leur probabilité différentielle d'infection et/ou de détection. Pour chaque département, la proportion de chaque type d'élevage a été modélisée par département à partir des données réelles de 2016 extraites de la BDNI.

2.2.1.2. L'âge des animaux

L'influence de l'âge sur la probabilité d'infection par la TB est peu renseignée dans la littérature. Son influence sur la probabilité de réagir à l'ID ne fait pas consensus : pour certains, un âge avancé serait un facteur de risque de réaction à l'ID (Munroe *et al.* 2000 ; Brooks-Pollock *et al.* 2013), et inversement pour d'autres (Lahuerta-Marin *et al.*, 2016). Nous avons donc décidé de ne pas prendre en compte ces éventuelles influences dans nos arbres de probabilité.

Toutefois, dans la plupart des départements, seuls les animaux de plus de 24 mois sont testés lors du dépistage périodique de la TB, principalement car ce sont les animaux les plus facilement accessibles

et manipulables (en production). L'âge de l'animal est donc un facteur ayant une influence sur la probabilité pour un animal d'être testé et donc sur la probabilité que son éventuelle infection soit détectée. Pour représenter la proportion d'animaux adultes dans chaque type de troupeau, nous avons utilisé des lois de distribution normales, dont les paramètres ont été définis afin de correspondre au mieux à leur distribution dans les données de la BDNI grâce à la fonction R « fitdistrib » (annexe 3).

2.2.1.3. Prévalence à l'échelle individuelle et à l'échelle du troupeau

La probabilité pour l'élevage d'être infecté a été fixée à 1 pour estimer la sensibilité troupeau des protocoles et leur coût dans un élevage infecté, et à 0 pour estimer les coûts des protocoles dans un élevage non infecté. La probabilité pour un élevage d'être infecté étant fixée par nos soins, l'influence d'éventuels paramètres sur cette probabilité n'a pas été prise en compte dans cette première étape.

La prévalence intra-troupeau de la TB n'a été estimée qu'une fois en France en 2005 dans un élevage allaitant de Côte-d'Or, par abattage et tests PCR sur tous les animaux du foyer. Lors de cette étude non publiée, seuls deux animaux du troupeau ont été détectés comme infectés (communication personnelle, M-L Boschioli, directrice du LNR TB), ce qui correspondait à une prévalence intra-troupeau de 0,94 %. Mais dans cette étude, des PCR conventionnelles sur les organes mixés ont été réalisées au lieu de la PCR en temps réel qui est la technique utilisée actuellement et qui possède une meilleure sensibilité (Mackay, 2004). De plus, un à trois animaux sont généralement confirmés infectés dans un élevage foyer (Poirier, 2017). En 2017, Bouveret fait état d'une prévalence intra-troupeau comprise entre 0,8 % et 3,1 % dans les élevages foyers français entre 1988 et 2008. En prenant en compte toutes ces données, nous avons choisi de représenter dans les arbres de scénarios la probabilité, pour un animal d'un troupeau infecté d'être infecté, par une loi de distribution de type PERT (: PERT(min=0,008 ; mode=0,0094 ; max=0,031), identique quelque soit le type de troupeau.

2.2.1.4. Proportion d'animaux testés

Principalement pour des raisons techniques, il arrive que quelques adultes échappent au dépistage (par exemple, des animaux difficiles à contenir). D'après la base de données SIGAL, nous avons estimé qu'entre 95 % et 99 % des animaux adultes d'un troupeau étaient testés lors du dépistage de première intention. Nous avons donc utilisé une loi uniforme comprise entre 0,95 et 0,99 pour décrire ce paramètre. Les données disponibles ne permettaient pas de différenciation par type de troupeau. Dans le protocole « abattage-recontrôle IDC », seul un échantillon d'animaux du troupeau suspect est généralement recontrôlé par IDC. L'analyse de la base SIGAL a mis en évidence que, dans ce cas, un minimum d'un adulte était testé une seconde fois et un maximum de 100 % des adultes. Cette base contenait des données limitées (207 élevages) et nous n'avons pas pu mettre en évidence de différence significative entre les types de troupeaux pour la moyenne des animaux recontrôlés. Néanmoins, tous les animaux de la plupart (55 %) des petits troupeaux semblaient avoir été recontrôlés en IDC, alors que le nombre moyen d'animaux recontrôlés dans les grands troupeaux était de 53 animaux. La proportion d'adultes recontrôlés en IDC dans le cadre du protocole « abattage-recontrôle IDC » a donc été modélisée par une loi de distribution PERT dont les paramètres ont été choisis conditionnellement à la taille du troupeau et selon les distributions suivantes: PERT(min = 1 / taille du troupeau, mode = 1, max = 1) pour les petits troupeaux et PERT(min = 1 / taille du troupeau, mode = 53 / taille du troupeau, max = 1) pour les grands troupeaux. La modélisation de la taille du troupeau (en nombre d'animaux et non en catégorie petit/grand) est décrite dans le paragraphe 2.2.1.7.

2.2.1.5. Résultats des tests *ante mortem*

2.2.1.5.1. L'IDC

Les estimations de sensibilité et de spécificité de l'IDC varient considérablement dans les études publiées. Nous avons choisi de combiner toutes ces estimations en lois de distribution normales

asymétriques (Sicard, 2013 ; annexe 4) pour représenter les caractéristiques de l'IDC et l'incertitude vis-à-vis de leur valeur (tableau 9).

Dans le protocole « abattage-recontrôle IDC », les animaux négatifs à l'IDC1 sont recontrôlés par IDC (IDC2) six semaines plus tard. Aucune donnée concernant les caractéristiques d'une seconde IDC après un premier résultat négatif à l'IDC n'était disponible dans la littérature scientifique et les bases de données à notre disposition ne nous permettaient pas de les estimer. Nous avons donc fait l'hypothèse que cette IDC2 avait les mêmes caractéristiques que l'IDC1. En effet, les animaux dépistés par IDC lors d'une année n sont généralement des animaux ayant déjà été testé par IDC l'année n-1 et ayant obtenu un résultat négatif à ce test.

Dans le protocole « Triage IFN », les animaux non-négatifs à l'IDC1 sont à nouveau testés par IDC six semaines plus tard. Les paramètres utilisés pour représenter la sensibilité et la spécificité de l'IDC2 conditionnellement à un premier résultat non-négatif en IDC1 sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9. Valeurs des paramètres des lois de distribution utilisées pour modéliser la sensibilité et la spécificité de l'IDC, estimées à partir d'études publiées

Test	Caractéristiques	Paramètres de la loi Normale asymétrique		Sources
		Limite basse de l'IC		
Première IDC (IDC1)	sensibilité	Limite basse de l'IC	43 %	Praud et Dufour, 2016
		Moyenne	74 %	Moyenne des estimations de : Clegg <i>et al.</i> , 2011 ; de la Rua-Domenech <i>et al.</i> , 2006 ; Nuñez-Garcia <i>et al.</i> , 2018 ; Praud et Dufour, 2016 ; Pucken <i>et al.</i> , 2017
		Limite haute de l'IC	95 %	Pucken <i>et al.</i> , 2017
	spécificité	Limite basse de l'IC	80 %	Praud et Dufour 2016 et Clegg <i>et al.</i> 2011
		Moyenne	99 %	Moyenne des estimations de Praud et Dufour 2016 et Clegg <i>et al.</i> 2011
IDC conditionnelle à l'obtention d'un premier résultat non-négatif à l'IDC (IDC2)	sensibilité	Limite haute de l'IC	100 %	Clegg <i>et al.</i> , 2011 ; Praud et Dufour, 2016
		Limite basse de l'IC	43 %	Praud et Dufour, 2016
		Moyenne	73 %	Moyenne des estimations de de la Rua-Domenech <i>et al.</i> , 2006 ; Praud Anne <i>et al.</i> , 2015 ; Pucken <i>et al.</i> , 2017
	spécificité	Limite haute de l'IC	95 %	Pucken <i>et al.</i> , 2017
		Limite basse de l'IC	87 %	Praud et Dufour, 2016
	Moyenne	89 %		
		Limite haute de l'IC	90 %	

Légende= IC: intervalle de confiance à 95%

2.2.1.5.2. Le test de dosage de l'IFN gamma (IFN γ)

Les caractéristiques des tests IFN γ avaient déjà été étudiées dans des conditions de terrain françaises (Praud et Dufour, 2016). Cette étude a été utilisée pour définir les paramètres des lois de distribution normales décrivant la sensibilité et la spécificité des tests IFN γ et présentés dans le tableau 10.

Tableau 10. Lois de distribution utilisées pour modéliser la probabilité d'occurrence de chaque résultat possible (positif, négatif ou non conclusif) du test de dosage de l'interféron gamma (IFN γ), estimées à partir des résultats de l'étude de Praud et Dufour, 2016 réalisée dans les conditions de terrain françaises

Résultats de l'IFN γ	Statut de l'animal vis-à-vis de la TB	
	Infecté	Indemne
Négatif	N(0,035 ; 0,020)	Neg=N(0,458 ; 0,00969)*
Non conclusif	Complémentaire à un	N(0,818 ; 0,00765)***- Neg
Positif	N(0,93 ; 0,0255)**	Complémentaire à un

Légende: N(,)=Normal(moyenne, écart type)

* Spécificité selon les normes européennes (seuls les animaux avec un résultat négatif sont considérés comme négatifs (exclusion des animaux avec des résultats non conclusifs))

** Sensibilité brute (seuls les animaux avec un résultat positif sont considérés comme positifs (exclusion des animaux aux résultats non conclusifs))

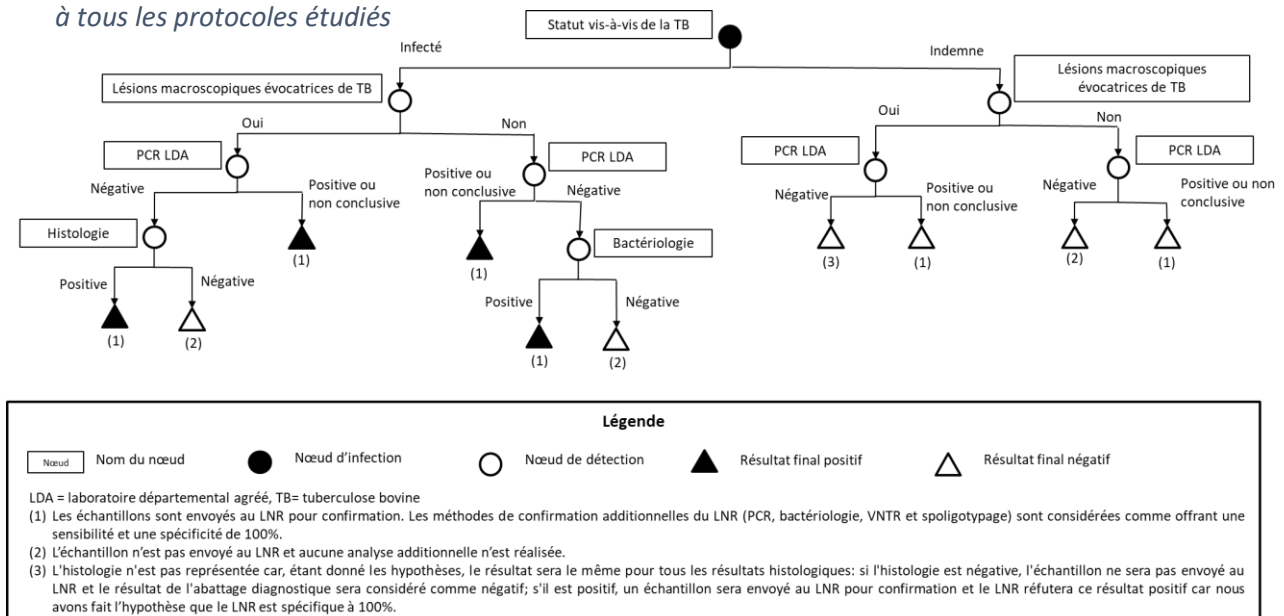
*** Spécificité brute (les animaux avec des résultats négatifs ou non conclusifs sont considérés comme négatifs)

2.2.1.6. Résultats des tests *post mortem*

Les résultats des analyses de laboratoire faisant suite aux abattages diagnostiques sont représentés sur la figure 16, car le scénario est le même quel que soit le protocole de dépistage étudié. La sensibilité et la spécificité des tests *post-mortem* (PCR, bactériologie et histologie) avaient déjà été estimées en fonction de la présence de lésions évocatrices de TB (Courcoul et Boschioli, 2013). Les intervalles de confiance de ces estimations étant asymétriques, nous avons utilisé des lois de distribution normales asymétriques pour modéliser les caractéristiques de ces tests (tableau 11). La proportion d'animaux présentant des lésions détectables a été calculée en fonction du statut infectieux, en utilisant les données d'abattage en France entre 2008 et 2012 décrites par Courcoul *et al.*, 2014 (annexe 5).

Nous avons posé l'hypothèse que l'histologie était indépendante de la PCR et de la bactériologie, en nous appuyant sur les résultats de modélisation de Courcoul *et al.* (2014), mais avons modélisé l'interdépendance de la PCR avec la bactériologie. Pour cela, la covariance de la sensibilité et de la spécificité entre PCR et bactériologie a été modélisée en fonction de la présence de lésions détectables macroscopiquement par des lois de distribution PERT. Les modes des distributions de PERT correspondent aux résultats de Courcoul *et al.* (2014) (40 % de la covariance maximale en présence de lésions détectables et une covariance égale à zéro en l'absence de lésions détectables). Nous avons défini les minimums et les maximums de ces lois comme étant les valeurs minimum et maximum possibles pour la covariance entre les deux tests utilisés en parallèle (Gardner *et al.*, 2000 ; annexe 6). Nous avons supposé que les tests (PCR, bactériologie et génotypage) effectués par le LNR étaient parfaitement sensibles et spécifiques (communication personnelle, M-L. Boschioli, directrice du LNR).

Figure 16. Arbre de scénario représentant l'abattage diagnostique d'un animal, composante commune à tous les protocoles étudiés



2.2.1.7. Taille du troupeau

Dans les protocoles « abattage-recontrôle IDC » et « triage IFN », le devenir d'un animal dépend des résultats des tests de l'ensemble du troupeau (figure 14 et figure 15). En effet, la probabilité pour les animaux négatifs à l'IDC1 d'être testés 42 jours plus tard dans le protocole « abattage-recontrôle IDC » (figure 14) correspond à la probabilité qu'au moins un animal du troupeau soit non-négatif à l'IDC1 et que les analyses de laboratoire effectuées sur les animaux abattus soient négatives. La probabilité pour que les animaux non positifs à l'IDC1 et non positifs à l'IFN γ soient recontrôlés par IDC2 dans le protocole « triage IFN » (figure 15) correspond à la probabilité qu'aucun animal du troupeau ne soit positif à l'IFN. La taille du troupeau était essentielle pour calculer ces probabilités. Nous avons donc modélisé la taille du troupeau à partir des données réelles de 2016, issues de la BDNI (tableau 12).

Contribution personnelle – Chapitre 2. Évaluation coût-efficacité du dépistage périodique de la tuberculose en élevage

Tableau 11. Loïs de distribution normales asymétriques $N(m,s,t)$ utilisées pour représenter, en fonction de la présence de lésions évocatrices de TB, la probabilité d'occurrence de chaque résultat possible pour les tests réalisés au LNR et dont les paramètres ont été estimés d'après Courcoul et Boschioli (2013)

Test	Résultats	Animal infecté		Animal indemne		
		Présence de lésions		Absence de lésions		
PCR	Positif	$x-y$	$x=N(0,887 ; 0,825 ; 0,923)$	$p_1=N(0,909 ; 0,873 ; 0,943)$	0	$1-p_3$
	Douteux ⁽¹⁾	$y=U(0 ; 0,5)*x$		0	$1-p_2$	0
	Négatif		$1-x$	$1-p_1$	$p_2=N(0,970 ; 0,943 ; 0,990)$	$p_3=N(0,998 ; 0,994 ; 1)$
Bacteriologie	Positif		$p_4=N(0,781 ; 0,729 ; 0,828)$	$p_5=N(0,792 ; 0,744 ; 0,843)$	$1-p_6$	$1-p_7$
	Négatif		$1-p_4$	$1-p_5$	$p_6=N(0,991 ; 0,971 ; 1)$	$p_7=N(0,999 ; 0,997 ; 1)$
Histologie	Positif		$p_8=N(0,936 ; 0,899 ; 0,969)$	/	$1-p_9$	/
	Négatif		$1-p_8$	/	$p_9=N(0,833 ; 0,787 ; 0,876)$	/

Légende: $N(m,s,t)$ = loi de distribution normale asymétrique (m = moyenne, s = borne basse de l'IC_{95%}, t = borne haute de l'IC_{95%}); $U(\min, \max)$ = loi de distribution uniforme.

⁽¹⁾ La proportion de résultats de PCR douteux a été estimée pour chaque type d'animal (infecté ou indemne, présentant ou non des lésions évocatrices de TB) d'après les données SIGAL de 2016. Dans ces données, aucun des animaux ne présentant pas de lésions évocatrices de TB n'avait obtenu de résultats douteux à la PCR (que les animaux soient infectés (74 animaux) ou indemnes (3 438 animaux)). Sur les 888 animaux indemnes présentant des lésions évocatrices, seul un animal avait obtenu un résultat douteux (correspondant à 100 % de l'ensemble des résultats positifs ou douteux constaté chez ces animaux). En 2016, 50 % des résultats non-négatifs à la PCR des 18 animaux infectés présentant des lésions évocatrices étaient douteux, tandis qu'en 2015, 0 % des résultats non-négatifs à la PCR des 18 animaux infectés présentant des lésions évocatrices étaient douteux.

Tableau 12. Loïs de distributions utilisées pour modéliser la taille des troupeaux (en nombre d'animaux présents) par type de troupeau (type de production, taille et taux de rotation du troupeau) ; paramètres estimés d'après les données de 2016 de la BDNI

Type de production	Catégorie de taille	Taux de rotation	Taille du troupeau	Commentaires
Laitier	petit	< 40 %	$N(44,24 ; 15,04)$ ⁽¹⁾	Restreinte entre 1 et 74 ⁽²⁾
		≥ 40 %	$N(28,88 ; 16,25)$ ⁽¹⁾	
	grand	< 40 %	$N(98,86 ; 26,13)$ ⁽¹⁾	Restreinte pour être supérieure à 74 ⁽³⁾
		≥ 40 %	$N(80,50 ; 5,50)$ ⁽¹⁾	
Allaitant naisseur	petit	< 40 %	$N(39,27 ; 15,55)$ ⁽¹⁾	Restreinte entre 1 et 66 ⁽²⁾
		≥ 40 %	$N(34,38 ; 17,92)$ ⁽¹⁾	
	grand	< 40 %	$N(106,28 ; 38,26)$ ⁽¹⁾	Restreinte pour être supérieure à 66 ⁽³⁾
		≥ 40 %	$N(106,70 ; 43,70)$ ⁽¹⁾	
Mixte	petit	< 40 %	$N(79,01 ; 22,60)$ ⁽¹⁾	Restreinte entre 1 et 124 ⁽²⁾
		≥ 40 %	$N(66,67 ; 23,51)$ ⁽¹⁾	
	grand	< 40 %	$N(164,32 ; 38,60)$ ⁽¹⁾	Restreinte pour être supérieure à 124 ⁽³⁾
		≥ 40 %	$N(156,75 ; 38,71)$ ⁽¹⁾	

Légende: Normal(moyenne, écart type)

⁽¹⁾ Le nombre est arrondi à l'entier supérieur ; les paramètres ont été définis afin que la loi de distribution soit la plus proche possible de la distribution réelle observée dans les données de la BDNI.

⁽²⁾ Pour les petits élevages, les lois de distribution normales ont été tronquées de telle sorte que toutes leurs valeurs soient comprises entre 1 (un troupeau contenant au minimum un animal) et la taille moyenne du type de troupeau correspondant (74 animaux pour les laitiers, 66 pour les allaitants et 124 pour les mixtes) qui a été utilisée comme limite pour définir les catégories de taille d'élevage.

⁽³⁾ Pour les grands troupeaux, les lois de distributions normales ont été tronquées de telle sorte que toutes leurs valeurs soient supérieures à la taille moyenne du type de troupeau correspondant (74 animaux pour les laitiers, 66 pour les allaitants et 124 pour les mixtes) qui a été utilisée comme limite pour définir les catégories de taille.

2.2.2. Estimation de la sensibilité troupeau de chaque protocole

La sensibilité troupeau (probabilité de détection d'au moins un animal infecté dans un troupeau infecté) de chaque protocole de dépistage a été estimée par type de troupeau à l'aide de l'arbre de scénario correspondant. Tout d'abord, le modèle calculait la probabilité d'occurrence de chaque branche en multipliant les probabilités d'occurrence des sous-branches la constituant. Ensuite, pour chaque protocole, la sensibilité individuelle pour chaque type k de troupeau (Se_k) était estimée en ajoutant la probabilité d'occurrence de chaque branche menant à la détection de l'infection et commençant par les nœuds correspondant au type de troupeau k (sans prise en compte de la probabilité pour un élevage d'être un troupeau de type k). Par construction, la spécificité individuelle était égale à 100 %. Enfin, pour chaque protocole de dépistage, la sensibilité du troupeau pour chaque type de troupeau (CSe_k) a été obtenue par l'équation (10) :

$$(10) \quad CSe_k = 1 - (1 - Se_k)^{\text{taille du troupeau} * \text{prévalence intra-troupeau}}$$

2.2.3. Les coûts

Les coûts des protocoles de surveillance peuvent être directs (tests de dépistage, organisation des campagnes de dépistage, analyses de laboratoire, etc.) ou indirects (pertes dues à l'interdiction de la vente d'animaux (« coût de blocage ») ou de lait non pasteurisé). En France, l'État et les éleveurs partagent ces coûts. Les éleveurs doivent financer le dépistage programmé et subissent les pertes indirectes, tandis que l'État prend en charge les tests appliqués lors de l'investigation des cas suspects et indemnise les éleveurs pour les animaux abattus. Tous les prix et coûts qui suivent sont exprimés hors taxes.

2.2.3.1. Coûts directs

Chaque année, dans chaque département, un accord écrit entre VS et éleveurs (convention) fixe le prix des tests de dépistage de la tuberculose pour la prochaine campagne de dépistage. Nous avons collecté 40 conventions de ce type pour une période allant de 2015 à 2017. Lorsque les conventions étaient antérieures à 2017, nous avons corrigé les prix en fonction du taux d'inflation entre l'année à laquelle l'accord a été conclu et 2017 (0,2 %). La moyenne, le maximum et le minimum de ces données ont été utilisés comme paramètres des lois de distribution de type PERT utilisées pour décrire le coût d'une visite de dépistage en euros par visite (deux visites sont nécessaires pour effectuer l'injection de tuberculine et la lecture du résultats de l'IDC) et le coût d'une injection IDC en euros par animal. Le coût d'une injection IDC était donc décrit par la loi de distribution PERT (min = 5,01 €, mode = 7,36 €, max = 9,94 €), et le coût de la visite par la loi PERT (min = 30,06 €, mode = 53,58 €, max = 70,90 €). Pour les investigations des suspicions, l'État fixe les prix des tests *ante mortem*. En 2017, ils étaient de 28,36 € pour la visite du VS (injection et lecture), de 7,09 € par animal pour l'IDC2 et de 2,84 € par animal pour le prélèvement de sang pour le test IFNy (AM du 17 Juin 2009).

En France, le prix des analyses *post mortem* est différent pour chaque laboratoire. Nous avons donc réalisé une enquête en ligne auprès des 40 laboratoires départementaux agréés (LDA) en avril 2018 avec l'aide de l'Association française des directeurs et cadres de laboratoires vétérinaires publiques d'analyse (ADILVA). Les résultats de cette enquête ont permis d'estimer le prix de chaque analyse et des frais de transport des échantillons (tableau 13). À partir de la base de données SIGAL, le nombre moyen d'échantillons envoyés pour PCR par un LDA pour un animal en abattage diagnostique a été estimé, en fonction de la présence de lésions macroscopiques évocatrices de TB (3,59 échantillons pour les animaux avec des lésions et 3,77 pour les animaux sans lésions) ainsi que le nombre moyen d'échantillons envoyés pour l'histologie par un LDA (1,9 échantillons uniquement pour les animaux avec des lésions). Ces données, ainsi que la probabilité d'occurrence de chaque analyse de laboratoire, nous ont permis de calculer le coût moyen de l'abattage diagnostique d'un animal, en fonction de son statut infectieux.

Contribution personnelle – Chapitre 2. Évaluation coût-efficacité du dépistage périodique de la tuberculose en élevage

Tableau 13. Données sur les prix des tests de laboratoires réalisés dans le cadre de la surveillance de la TB obtenues grâce au questionnaire adressé aux LDA et lois de distribution utilisées dans les arbres de scénario pour modéliser le coût de chaque test

Analyses	Données sur les prix indiqués par les LDA interrogés (en €/échantillon)				N	Prix en compte dans le prix	Non pris en compte dans le prix	Lois de distribution utilisées dans les arbres de scénario
	Min	Médiane	Moyenne	Max				
IFNy	34,00	53,15	51,76	67,63	6	Analyse IFNy + frais administratifs	Collecte des échantillons	PERT(min=34, mode=53, max=68)
PCR	50,00	74,28	75,17	114,00	10	Analyses PCR + frais administratifs		PERT(min=50, mode=74, max=114)
Bactériologie (culture d'un mélange des trois échantillons s'il n'y a pas de lésions)	35,36	68,81	75,14	185,00	10	Réalisation du mélange + ensemencement + culture		PERT(min=35, mode=69, max=185)
Bactériologie individuelle (pour chaque échantillon si l'animal présente des lésions)	35,36	58,13	62,04	90,00	10	Ensemencement + culture		PERT(min=35, mode=58, max=90)
Frais de transport de la PCR + ADN vers le LNR	19,23	22,19	27,88	45,00	5			PERT(min=19, mode=28, max=45)
Frais de transport d'une souche bactérienne ou d'un échantillon PCR douteux vers le LNR	80	595	460	870	7			PERT(min=80, mode=460, max=870) ⁽¹⁾
Préparation de l'échantillon pour l'histologie	0	10,92	10,73	20,39	8	Préparation de l'échantillon		PERT(min=0, mode=11, max=20)
Frais de transport d'un échantillon pour histologie vers un LDA	10,00	15,53	18,9	31,70	6			PERT(min=10, mode=16, max=32)
Histologie	65,46	65,73	65,73	66,00	2	Analyse histologique	Préparation de l'échantillon	66

Légende : N = nombre de prix recueillis grâce au questionnaire (dépendant du nombre de LDA répondants et de leur agréments), Min = prix minimum déclaré, Max = prix maximum déclaré

⁽¹⁾ Multiplié par 0,25 si c'est une souche bactérienne car plusieurs souches bactériennes sont en général envoyées dans un même colis (4 souches en moyenne, communication personnelle Boschioli M.L., LNR).

L'État verse une indemnité de 2 200 € aux éleveurs pour l'abattage diagnostique d'un animal adulte si celui-ci est enregistré dans le livre généalogique et de 1 900 € pour les autres animaux adultes (AM du 17 juin 2009) ; la valeur bouchère de l'animal étant déduite de cette compensation. Nous avons représenté la valeur bouchère des animaux par des lois de distribution normales conçues pour correspondre aux mieux à la distribution des données SIGAL de valeur bouchère des animaux abattus lors d'investigation des cas suspects de TB effectuées en 2016 : N(moyenne = 972,15 €, écart type = 314,89 €) pour les élevages allaitants, N(moyenne = 633,04 €, écart type = 284,32 €) pour les élevages laitiers et N(moyenne = 628,07 €, écart type = 434,22 €) pour les élevages mixtes. Nous avons estimé le pourcentage de bovins inscrits au livre généalogique (taux d'inscription au livre généalogique) pour chaque type de production, à 20 % pour les vaches laitières, 10 % pour les vaches allaitantes et 15 % pour les vaches mixtes (source : <http://www.racesdefrance.fr>). Enfin, nous avons enfin estimé le coût final de l'indemnisation par l'État avec l'équation (11).

$$(11) \text{ indemnisation}_{\text{État}} (\text{€}) = (1 - \text{pourcentage d'inscription au livre généalogique}) * 1900 + \text{pourcentage d'inscription au livre généalogique} * 2200 - \text{valeur bouchère}$$

En distinguant les coûts à la charge de l'éleveur de ceux pris en charge par l'État, nous avons associé à chaque sous-branche de l'arbre un coût direct pondéré, égal au coût direct correspondant, multiplié par la probabilité d'occurrence de la sous-branche. Ensuite, le coût direct moyen de chaque protocole a été estimé par type de troupeau, en sommant tous les coûts pondérés des chemins correspondant au type de troupeau considéré.

2.2.3.2. Coûts indirects

Les coûts indirects dus à une interdiction de vente des animaux ont été modélisés en utilisant une évaluation française des coûts d'entretien pour un animal dont la vente est bloquée (alimentation, frais vétérinaires, travail supplémentaire pour l'éleveur, etc.) pour chaque type d'animal (âge, sexe et type de production) (Buczinski et Reuillon, 2015). Les valeurs de ces estimations ont permis d'estimer les coûts d'entretien pour les femelles de plus et de moins de 24 mois et les mâles de plus et de moins de six mois, ainsi que le total des coûts indirects pour des veaux de troupeaux laitiers, de troupeaux allaitants et de troupeaux mixtes, comme décrit dans l'annexe 7. Nous avons utilisé les estimations de cette étude pour définir le coût d'entretien (Ct, X) par type d'animal (t) et type de production (X) (tableau 14). Le coût indirect des veaux laitiers n'est pas quotidien, mais couvre toute la période d'interdiction des ventes, car il tient compte du fait que l'éleveur est obligé de garder l'animal pendant un certain temps avant de pouvoir le vendre comme veau gras.

Tableau 14. Lois de distribution utilisées pour modéliser les coûts indirects de blocage de l'élevage (en euros par jour par animal) pour chaque type d'animal de chaque type de production (paramètres fixés d'après les résultats de Buczinski et Reuillon en 2015, décrits en annexe 7)

Animal	Type de production		
	Laitier	Allaitant	Mixte
Femelle < 24 mois	PERT(min=2,87 ; mode=2,87 ; max=3,79)	U(1 ; min=2,04 ; max=2,09)	PERT(min=1,88 ; mode=2,47 ; max=3,79)
Femelle ≥ 24 mois	PERT(min=3,18 ; mode=3,18 ; max=4,18)	U(1 ; min=3,29 ; max=3,7)	PERT(min=3,18 ; mode=3,38 ; max=4,18)
Veau laitier mâle ⁽¹⁾	PERT(min=103,66 ; mode=103,66 ; max=122,06) ⁽¹⁾	/	PERT(min=103,66 ; mode=103,66 ; max=122,06) ⁽¹⁾
Mâle < 6 mois	/	U(1 ; min=1,30 ; max=1,42)	U(1 ; min=1,30 ; max=1,42)
Mâle ≥ 6 mois	/	U(1 ; min=3,14 ; max=3,32)	U(1 ; min=3,14 ; max=3,32)

PERT = loi de distribution de type PERT ; U=loi de distribution uniforme

⁽¹⁾ Le coût pour les veaux laitier mâle est exprimé en € par animal pour l'intégralité de la période d'interdiction des ventes. Cela correspond à l'impossibilité de vendre le veau mâle à l'âge requis qui oblige l'éleveur à vendre ensuite le veau en tant que veau gras élevé au lait.

Ce coût indirect ne concerne que les animaux qui n'ont pas pu être vendus à cause d'un blocage de l'élevage en raison de l'obtention d'un résultat non-négatif à un test de dépistage. Ainsi, le nombre de chaque type d'animal vendu chaque mois au cours de l'année 2016 a été extrait de la BDNI, pour chaque type de troupeau. Nous avons estimé les moyennes et les écarts type des lois de distribution normales qui correspondent le mieux à ces données en utilisant la fonction R «fitdistrib». Les moyennes résultantes et les écarts-types ont été utilisés comme paramètres des lois de distribution normales (restreintes entre 0 et 200 (nombre maximal d'animaux vendus d'après les données)) représentées par $n_{m,t,x}$, le nombre de chaque type d'animal (t) vendus chaque mois (m) dans chaque type de troupeau (X) (annexe 8). À partir de SIGAL, nous avons déterminé la proportion de cas suspects détectés chaque mois (m) de l'année 2016 ($APMS_m$). À partir de ces deux ensembles de valeurs et du nombre de jours de chaque mois (J_m), nous avons calculé, pour chaque itération du modèle et chaque type de troupeau, $C_{tot,x}$, le coût indirect moyen dû à une interdiction de vente pendant D jours, en euros, pour un troupeau de type X avec l'équation : (12) $C_{tot,x} = C_x * (\sum_{k=1}^D k) + C_{x, veaux lait} * D$

Dans l'équation (12), C_x est le coût indirect pour un troupeau de type X qui ne prend pas en compte les veaux laitiers et est calculé selon l'équation (13) ; et $C_{x, veaux lait}$ est le coût indirect, pour un troupeau de type X, concernant les veaux laitiers qui est calculé selon l'équation (14).

$$(13) \quad C_x = \sum_{m=1}^{12} (\sum_{t=1}^4 (APMS_m * (n_{m,t,x} / J_m) * C_{t,x}))$$

$$(14) \quad C_{x, veau lait} = \sum_{m=1}^{12} (APMS_m * C_{veaux lait,x} * (n_{m, veaux lait, x} / J_m))$$

Dans le protocole « triage IFN », le blocage des animaux dépend des résultats obtenus aux tests de dosage de l'IFN γ (figure 15). Nous avons tenu compte de cette particularité dans notre estimation des coûts indirects pour ce protocole.

Enfin, D, la durée moyenne d'interdiction de vente, a été calculée pour chaque protocole à chaque itération du modèle, en multipliant les délais entre chaque étape du protocole (représentés par les lois de distribution présentées dans le tableau 15) avec leur probabilité d'occurrence.

Tableau 15. Lois de distribution utilisées pour modéliser l'intervalle (en jour) entre chaque étape du protocole pour chaque protocole étudié (source : SIGAL)

Protocole	Intervalle entre deux étapes	Lois de distribution utilisées
« abattage-recontrôle IDC »	Résultat de la première IDC (IDC1) – abattage des animaux non-négatifs à l'IDC1	PERT(min=1, mode=21, max=150)
	Résultat de l'IDC1 – seconde IDC (IDC2)	PERT(min=40, mode=48, max=133)
	IDC2 – abattage des animaux non-négatifs à l'IDC2	PERT(min=3, mode=22, max=69)
« abattage seul »	Résultat de l'IDC1 - abattage des animaux non-négatifs à l'IDC1	PERT(min=4, mode=35, max=65)
« triage IFN »	Résultat de l'IDC1 – abattage des animaux avec des résultats positifs à l'IFN	PERT(min=3, mode=24, max=136)
	Abattage de animaux positifs à l'IFN γ – Abattage des animaux avec des résultats non-négatifs à l'IDC1 et non-positifs à l'IFN	
	Résultat de l'IDC1 – seconde IDC (IDC2)	PERT(min=33, mode=41, max=130)
	IDC2 – Abattage des animaux non-négatifs à l'IDC2	PERT(min=8, mode=22, max=154)

2.2.3.3. Estimation du coût total du dépistage de la TB en élevage

Pour l'estimation du coût total, la probabilité d'infection de l'élevage a été fixée alternativement à 1 et à 0 pour estimer respectivement les coûts des protocole de dépistage dans un élevage infecté et dans un élevage indemne. Le coût total pour chaque type de troupeau a été obtenu en sommant les coûts directs et indirects estimés pour les troupeaux de ce type. En sommant, pour chaque type de troupeau le coût total d'un élevage infecté et celui d'un élevage indemne, pondérés par leur probabilité d'occurrence (respectivement probabilité pour un élevage de ce type d'être infecté ou indemne), nous avons estimé le coût total moyen (et sa répartition entre l'État et l'éleveur) de chaque protocole, par type de troupeau.

2.2.4. Analyses

Toutes les analyses ont été réalisées sous R (Rstudio version 1.1.383.0). Les moyennes ont été comparées entre elles avec le test t de Student corrigé pour les comparaisons multiples à l'aide de la méthode de Bonferroni ; le risque d'erreur accepté α pour ces comparaisons a été fixé à 1 %.

2.2.4.1. Analyse coût-efficacité

Un ratio coût-efficacité a été calculé pour chaque protocole, à chaque itération et par type d'élevage, en divisant le coût total du protocole pour chaque type d'élevage par sa sensibilité troupeau ; ainsi que son intervalle de confiance à 95 %.

2.2.4.2. Analyse de sensibilité

Nous avons recherché les variables d'entrée du modèle qui avaient le plus d'influence sur l'incertitude ou la variabilité des variables de sortie « sensibilité troupeau » et « coût total » en réalisant une analyse de sensibilité pour chacun des arbres de scénario. Certaines variables d'entrée du modèle étant interdépendantes, nous ne pouvions pas utiliser la méthode « one at a time », nous avons donc utilisé la méthode de McKay (McKay, 1995), qui peut être utilisée dans ce contexte (Jacques *et al.*, 2006), avec vingt répétitions d'échantillonnage par Hypercube Latin.

2.3. Résultats

2.3.1. Sensibilité troupeau du dépistage périodique de la TB

Le tableau 16 présente les moyennes ainsi que les 5^{ème} et 95^{ème} percentiles des sensibilités troupeau, estimées par type de troupeau, pour chaque protocole de surveillance. Les sensibilités moyennes estimées allaient de 20 à 60 %. La sensibilité moyenne estimée était plus élevée pour les grands troupeaux, quel que soit le protocole, le type de production ou le taux de rotation. Elle était également plus élevée pour les troupeaux à faible taux de rotation que pour les troupeaux à fort taux de rotation, quel que soient le protocole et le type de troupeau. Les différences de sensibilité moyenne entre les types de troupeaux pour un même protocole étaient toutes significatives, à l'exception du protocole « triage IFN » entre les petits troupeaux mixtes à fort taux de rotation et les petits troupeaux allaitants à faible taux de rotation, et entre les petits troupeaux mixtes à faible taux de rotation et les petits troupeaux laitiers avec un faible taux de rotation.

Tableau 16. Sensibilité troupeau moyenne (en %) (moyenne [IC_{95%}]) des trois protocoles réglementaires étudiés (10 000 itérations) estimée pour chaque type de troupeau

Type de production	Catégorie de taille	Taux de rotation	Protocole « triage IFN »	Protocole « abattage seul »	Protocole « abattage-recontrôle IDC »
Élevage laitier	petit	< 40 %	42,7 [42,5-42,8]	44,2 [44,1-44,4]	47,4 [47,2-47,5]
		≥ 40 %	30,8 [30,7-30,9]	31,6 [31,5-31,7]	34,3 [34,2-34,4]
	grand	< 40 %	49,0 [48,7-49,2]	51,6 [51,3-51,8]	52,3 [52,1-52,6]
		≥ 40 %	40,4 [40,3-40,6]	42,4 [42,3-42,6]	43,7 [43,5-43,9]
Élevage allaitant	petit	< 40 %	37,5 [37,4-37,7]	38,7 [38,6-38,9]	41,8 [41,7-41,9]
		≥ 40 %	32,0 [31,9-32,1]	32,9 [32,7-33,0]	35,6 [35,5-35,7]
	grand	< 40 %	46,0 [45,7-46,2]	48,2 [48,0-48,5]	49,1 [48,8-49,3]
		≥ 40 %	20,2 [20,0-20,3]	20,8 [20,7-21,0]	21,7 [21,5-21,8]
Élevage mixte	petit	< 40 %	43,0 [42,8-43,2]	45,1 [44,9-45,3]	46,6 [46,5-46,8]
		≥ 40 %	37,7 [37,5-37,8]	39,3 [39,1-39,5]	41,2 [41,1-41,4]
	grand	< 40 %	61,0 [60,7-61,3]	63,9 [63,7-64,2]	64,2 [63,9-64,4]
		≥ 40 %	56,8 [56,6-57,1]	59,6 [59,4-59,9]	59,9 [59,7-60,2]

Le protocole « abattage-recontrôle IDC » avait la sensibilité troupeau la plus élevée pour tous les types de troupeaux. Le protocole « triage IFN » présentait la plus faible sensibilité troupeau moyenne, quel que soit le type de troupeau. Ces différences étaient significatives avec un risque d'erreur de 1 % pour tous les types de troupeaux, à l'exception de celles entre le protocole « triage IFN » et le protocole « abattage seul » pour les petits troupeaux mixtes, qui étaient toutefois significatives avec un risque d'erreur de 5 %.

2.3.2. Coût total des protocoles de dépistage périodique de la TB

Les moyennes ainsi que les 5^{ème} et 95^{ème} percentiles des coûts totaux moyens estimés par protocole et par type de troupeau sont présentés dans le tableau 17. Il s'agit des coûts moyens pour un troupeau effectivement soumis au dépistage périodique (les élevages sans IDC1 ont été exclus du calcul). Les coûts moyens variaient entre 1 211 et 32 688 euros pour le protocole « triage IFN », 1 355 et 15 990 euros pour le protocole « abattage seul », et 2 386 et 28 394 euros pour le protocole « abattage-recontrôle IDC ». Les protocoles étaient beaucoup plus coûteux dans les grands troupeaux mixtes que dans les autres types de troupeaux, en raison de la très grande taille de ce type de troupeaux (plus de 124 animaux). Le protocole « abattage-recontrôle IDC » était le plus coûteux, quel que soit le type de troupeau, sauf pour les grands troupeaux mixtes. Le protocole « triage IFN » était le moins coûteux pour tous les grands troupeaux et pour les petits troupeaux mixtes.

Tableau 17. Coût total moyen (moyenne [IC_{95%}]) de chaque protocole estimé par arbres de scénario pour chaque type de troupeau soumis au dépistage périodique (en €/troupeau)

Type de production	Taille	Taux de rotation	Protocole « triage IFN »	Protocole « abattage seul »	Protocole « abattage-recontrôle IDC »
Élevage laitier	petit	< 40 %	2 393 [2 354-2 432]	2 702 [2 670-2 735]	4 480 [4 426-4 533]
		≥ 40 %	2 459 [2 422-2 497]	3 208 [3 183-3 234]	5 591 [5 543-5 639]
	grand	< 40 %	6 988 [6 884-7 092]	5 905 [5 836-5 975]	8 949 [8 851-9 047]
		≥ 40 %	9 263 [9 120-9 405]	6 948 [6 892-7 005]	11 983 [11 889-12 077]
Élevage allaitant	petit	< 40 %	1 211 [1 190-1 232]	1 355 [1 340-1 370]	2 386 [2 359-2 412]
		≥ 40 %	2 351 [2 307-2 395]	2 933 [2 907-2 959]	5 875 [5 822-5 928]
	grand	< 40 %	5 370 [5 273-5 467]	3 569 [3 528-3 609]	6 021 [5 960-6 081]
		≥ 40 %	7 470 [7 314-7 625]	6 948 [6 886-7 011]	14 051 [13 922-14 180]
Élevage mixte	petit	< 40 %	4 950 [4 866-5 033]	4 303 [4 249-4 356]	7 048 [6 967-7 129]
		≥ 40 %	7 560 [7 426-7 694]	6 169 [6 115-6 223]	11 213 [11 119-11 307]
	grand	< 40 %	13 065 [12 864-13 266]	8 692 [8 584-8 800]	13 179 [13 033-13 324]
		≥ 40 %	32 688 [32 115-33 261]	15 990 [15 857-16 122]	28 619 [28 394-28 844]

2.3.3. Répartition des coûts entre les éleveurs et l'État

Les coûts moyens de chaque protocole de surveillance pour l'État (=coût des analyses de laboratoire et de l'indemnisation des bovins abattus) et pour l'éleveur (=coût du dépistage périodique et pertes économiques indirectes), ainsi que leur intervalle de confiance à 95 % sont détaillés en annexe 9. L'éleveur prend en charge entre 35 et 93 % du coût estimé, selon le protocole et le type de troupeau considéré. Quelque soit le type de troupeau, les protocoles peuvent être classés par prise en charge croissante du coût total (indépendamment de la valeur de ce coût total) par l'éleveur comme suit : protocole « abattage seul », protocole « abattage-recontrôle IDC » et protocole « triage IFN » (tableau 18). À type de production et taille fixés, les éleveurs des troupeaux à taux de rotation élevé prenaient en charge 30 % du coût total en plus par rapport aux troupeaux à faible taux de rotation. Pour la plupart des types d'élevage (sauf les élevages laitiers à faible taux de rotation et les petits élevages mixtes à faible taux de rotation), c'est l'éleveur qui prenait en charge la majorité du coût total estimé.

Tableau 18. Proportion du coût total moyen pris en charge par l'éleveur pour chaque type de troupeau et pour chaque protocole (en pourcentage du coût total moyen estimé)

Type de production	Catégorie de taille	Taux de rotation	Protocole « triage IFN »		Protocole « abattage seul »		Protocole « abattage-recontrôle IDC »	
			Pourcentage du coût total pris en charge par l'éleveur	Différence taux de rotation ⁽¹⁾	Pourcentage du coût total pris en charge par l'éleveur	Différence taux de rotation ⁽¹⁾	Pourcentage du coût total pris en charge par l'éleveur	Différence taux de rotation ⁽¹⁾
Élevage laitier	petit	< 40 %	48	37	35	31	36	40
		≥ 40 %	79		73		75	
	grand	< 40 %	48	27	31	26	35	29
		≥ 40 %	74		58		64	
Élevage allaitant	petit	< 40 %	62	28	57	24	59	29
		≥ 40 %	86		85		88	
	grand	< 40 %	69	37	53	24	60	33
		≥ 40 %	93		90		93	
Élevage mixte	petit	< 40 %	57	27	41	23	45	28
		≥ 40 %	80		68		73	
	grand	< 40 %	60	32	38	26	46	32
		≥ 40 %	86		70		77	

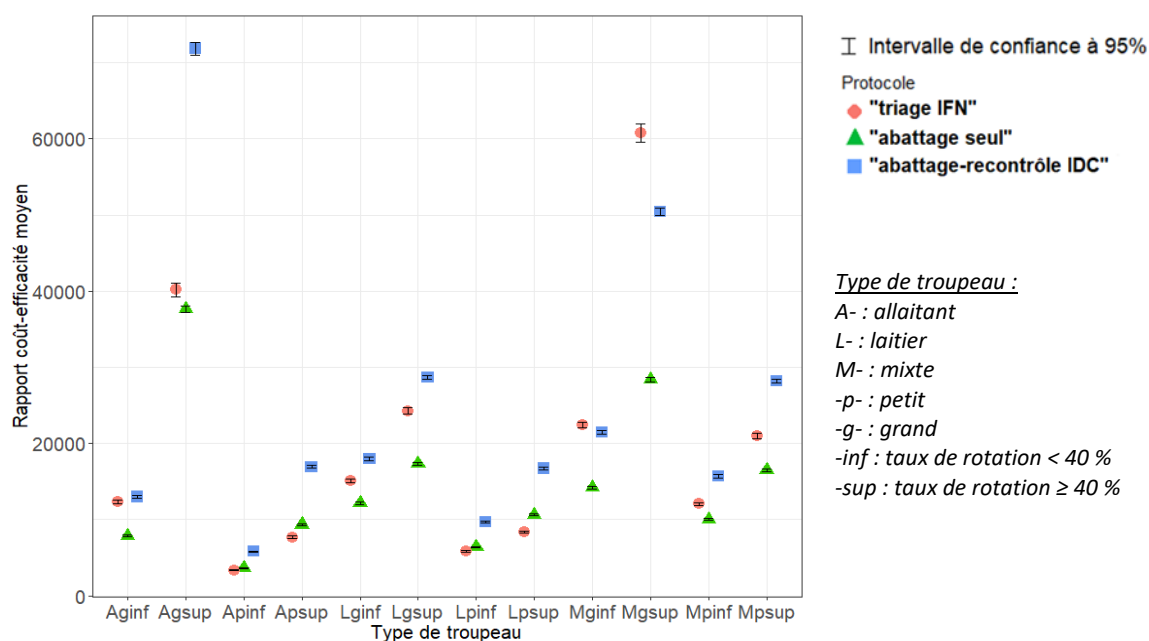
⁽¹⁾ Différence de pourcentage de coût total pris en charge par l'éleveur entre les troupeau à taux de rotation élevés et ceux à taux de rotation faible, à taille et type de production constant.

2.3.4. Rapport coût-efficacité des protocoles de dépistage

Les rapports coût-efficacité moyens ainsi que leurs intervalles de confiance à 95 % sont représentés sur la figure 17. Quel que soit le type de troupeau, le protocole « abattage-recontrôle IDC » n'était jamais le plus efficace malgré sa meilleure sensibilité. Pour les grands troupeaux et les petits troupeaux mixtes, le protocole « abattage seul » était le plus coût-efficace, alors que pour les petits élevages allaitants et laitiers, c'était le protocole « triage IFN ». Dans les petits élevages allaitants et laitiers à faible taux de rotation, les rapports coût-efficacité entre le protocole « abattage seul » et le protocole « triage IFN » étaient très proches, bien que significativement différents.

Figure 17. Rapport coût-efficacité des protocoles réglementaires de dépistage périodique en élevage de la TB, par type de troupeau

Un rapport coût-efficacité élevé correspond à une mauvaise efficacité du protocole.



2.3.5. Analyse de sensibilité

Quel que soit le protocole, la sensibilité de l'IDC était l'une des variables ayant le plus d'influence sur la variance de la variable de sortie « sensibilité troupeau » de nos arbres de scénario (figure 18). Dans les grands troupeaux, la taille de l'élevage et la prévalence intra-troupeau avaient également un impact sur les variations de cette sortie du modèle.

La variance de la variable de sortie « coût total » du protocole « triage IFN » était majoritairement due à l'incertitude sur la spécificité troupeau (figure 19). Pour les protocoles « abattage seul » et « abattage-recontrôle IDC », le délai entre les étapes du protocole avait une influence importante sur la sortie « coût total », en particulier dans les élevages à fort taux de rotation. La spécificité de l'IDC, la taille de l'élevage et le coût de l'indemnisation des bovins abattus étaient aussi des variables influentes (figure 19).

2.4. Discussion

2.4.1. Méthode utilisée

Dans ce travail, nous avons utilisé la modélisation stochastique par arbre de scénario pour estimer la sensibilité troupeau et le coût des trois protocoles réglementaires de dépistage et d'investigation des suspicions pour douze types de troupeaux (allaitant/laitier/mixte, petit/grand, fort/faible taux de rotation). Cette méthode nous a conduit à utiliser diverses sources de données (études publiées, bases de données nationales et avis d'experts) et à prendre en compte la variabilité et l'incertitude de ces données. Les variables d'entrée choisies pour ces modèles correspondaient aux facteurs ayant un impact documenté sur l'infection ou sur la détection de la TB. Ainsi certains facteurs, dont l'impact n'était pas suffisamment documenté pour permettre leur utilisation, n'ont pas été intégrés. Par exemple, l'état physiologique des animaux (autres maladies, gestation, âge, etc.) a probablement un impact sur leur réactivité à l'IDC (Buddle *et al.*, 2009 ; Brooks-Pollock *et al.*, 2013 ; Lahuerta-Marín *et al.*, 2016). L'absence d'estimations quantitatives de leur influence et / ou l'absence de consensus concernant leur influence sur la réactivité à l'IDC a conduit à leur exclusion. Néanmoins, les caractéristiques de l'IDC utilisées dans nos modèles provenaient d'estimations réalisées à partir de données de terrain, et l'impact de ces facteurs était donc partiellement et indirectement inclus dans l'estimation de la sensibilité et de la spécificité de l'IDC.

Le texte réglementaire européen recommande de dépister tous les bovins de plus de six semaines. Toutefois, il permet de réduire la fréquence de dépistage et d'augmenter l'âge de dépistage dans les zones à faible prévalence (cf. paragraphe 2.3.2.1.1). Ainsi, dans la plupart des départements, seuls les animaux âgés de plus de 24 mois sont effectivement dépistés, ce qui explique l'âge limite de test des animaux utilisé dans les arbres (24 mois).

Plus un animal séjourne longtemps dans un troupeau infecté, plus il risque d'être infecté par la TB. On peut donc s'attendre à ce qu'un animal d'un troupeau infecté à faible taux de renouvellement ait une probabilité plus élevée d'être infecté. Cela n'a pas été pris en compte dans les modèles car la méthode des arbres de scénario ne permet pas de prendre en compte les aspects temporels.

L'analyse de sensibilité a souligné l'influence de la prévalence intra-troupeau sur la sensibilité troupeau. Les troupeaux laitiers sont généralement considérés comme présentant un risque plus élevé de transmission au sein du troupeau, en raison des conditions de logement, mais le risque de transmission intra-troupeau de la TB est désormais considéré faible dans les élevages testés régulièrement, quel que soit le type de production (Phillips *et al.*, 2003) et, par conséquent, peu d'études ont exploré quantitativement les facteurs influençant la transmission de la TB au sein du troupeau dans les conditions actuelles. En outre, la prévalence intra-troupeau est très faible dans les

Figure 18. Analyse de sensibilité pour la sortie "sensibilité troupeau" par type de troupeau et par protocole (indice de Mc Klay supérieurs à 10 %)

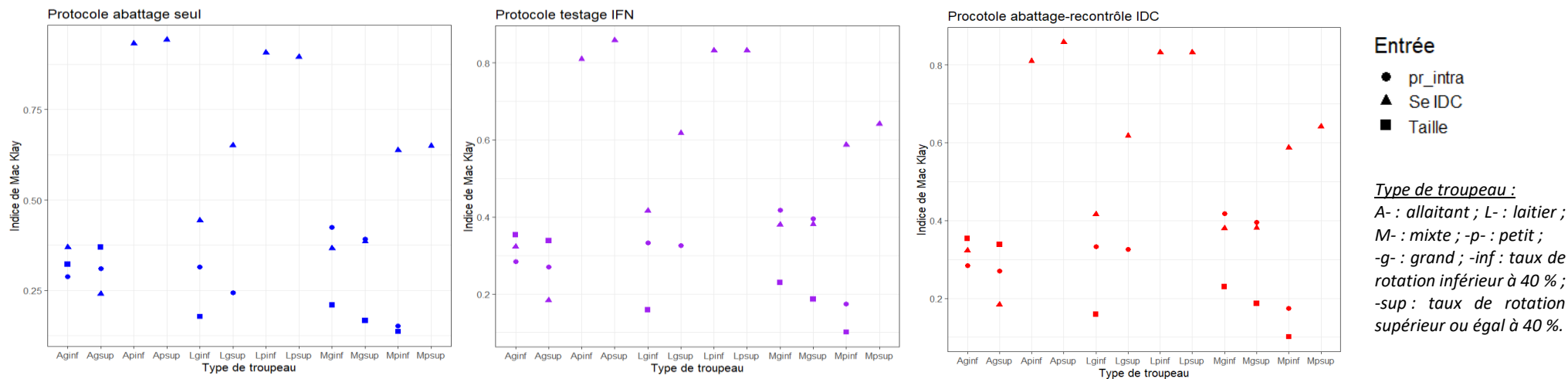
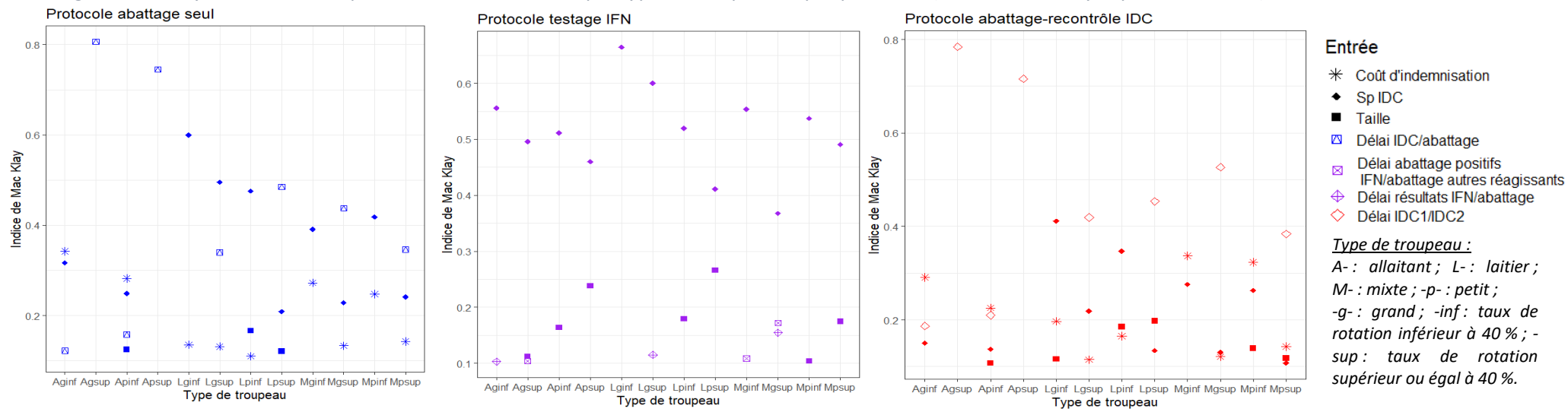


Figure 19. Analyse de sensibilité pour la sortie "coût total" par type de troupeau et par protocole (indice de Mc Klay supérieurs à 10 %)



élevages français, quel que soit leur type, dans la mesure où, dans la plupart des foyers, on ne met en évidence qu'au maximum trois animaux infectés (Poirier, 2017). Ainsi, l'utilisation de la même loi de distribution pour modéliser la prévalence intra-troupeau, quel que soit le type de troupeau, était probablement cohérente avec les conditions de terrain.

La sensibilité et la spécificité de l'IDC ont été modélisées par des lois distribuant les valeurs sur un large intervalle (du fait de l'incertitude sur ces paramètres) et, selon les analyses de sensibilité, ces paramètres avaient un impact significatif sur la variation des résultats du modèle (sensibilité troupeau et coûts totaux). Cela suggère que les arbres de scénario pourraient être améliorés par une évaluation plus précise de ces paramètres, mais une évaluation de l'IDC sur le terrain est difficile à réaliser et produit souvent des estimations biaisées. Par exemple, l'estimation des caractéristiques de l'IDC dans les conditions de terrain françaises (Praud et Dufour, 2016) a été réalisée à l'aide de données initialement collectées pour évaluer les caractéristiques du test IFN γ . Les animaux positifs à l'IDC ont donc été directement éliminés et exclus de l'étude, causant un biais de sélection, qui a probablement entraîné une sous-estimation de la sensibilité de l'IDC. De plus, il existe un biais de recrutement possible dans cette étude car les élevages avec de nombreux résultats non-négatifs au premier test, ou ceux avec au moins une IDC positive, n'avaient pas d'intérêt particulier à participer à ce programme, car ils ne pouvaient pas bénéficier des dérogations à l'interdiction de vente des animaux accordées en cas de résultats négatifs au test IFN γ . Ces biais ont certainement conduit à une sous-estimation de la sensibilité de l'IDC et éventuellement à une surestimation de sa spécificité (Praud et Dufour, 2016), ce qui explique pourquoi nous ne nous sommes pas appuyés uniquement sur les résultats de cette étude pour modéliser la sensibilité et la spécificité de l'IDC. Nous avons ainsi combiné les résultats de plusieurs études pour estimer la valeur la plus probable et les extrêmes des caractéristiques de l'IDC, et ainsi pris en compte l'incertitude liée aux estimations des caractéristiques de l'IDC.

Nous n'avons pas pris en compte le coût de la collecte des échantillons sanguins dans le coût total du protocole « triage IFN », car nous n'avons pas pu collecter suffisamment de données pour en obtenir une estimation réaliste. Par conséquent, le coût de ce protocole a été sous-estimé, ce qui a surestimé son efficacité. La prise en compte de ce coût de collecte des échantillons aurait pu entraîner une augmentation du rapport coût-efficacité de ce protocole (et donc une diminution de son efficacité). Dans ce cas, le protocole « abattage seul » aurait pu devenir le protocole le plus efficace, quel que soit le type de troupeau. De plus, dans plusieurs départements, la stimulation des échantillons sanguins pour le test IFN γ et la lecture des résultats sont réalisés dans des laboratoires distincts. Cela n'a pas été inclus dans nos modèles et ajouterait des coûts (frais de transport supplémentaires) au protocole « triage IFN », diminuant encore son efficacité.

Les coûts liés à l'abattage des veaux nés de vaches ayant obtenu un résultat non-négatif à l'IDC n'ont pas non plus été pris en compte, ce qui a pu conduire à une légère sous-estimation des coûts pour tous les protocoles, sans modifier leur classement les uns par rapport aux autres.

Les élevages produisant du lait cru ont été exclus de cette étude. En cas de suspicion de TB, ce type d'exploitation ne peut pas vendre son lait cru, ce qui ajoute environ 2 € par jour et par vache au coût total (Bouveret, 2017). Néanmoins, le même coût serait ajouté par jour de suspicion pour un type de troupeau donné quel que soit le protocole, ce qui ne devrait donc pas modifier le classement coût-efficacité des protocoles entre eux.

La plupart des différences de coût et de sensibilité étaient significatives, ce qui est probablement dû au très grand nombre d'itérations (10 000) utilisées pour les simulations.

2.4.2. Résultats de l'évaluation

Les valeurs de sensibilité troupeau estimées dans cette étude étaient comprises entre 20 et 60 %. Néanmoins, ces estimations ne doivent pas être interprétées seules pour évaluer la sensibilité globale du système de surveillance français. En effet, le système de surveillance de la TB comporte d'autres

composantes complémentaires majeures (inspection systématique des carcasses dans les abattoirs, enquêtes épidémiologiques dans les exploitations en lien avec des foyers) qui améliorent la sensibilité globale de la surveillance. L'objectif de cette estimation de la sensibilité troupeau était de comparer les protocoles réglementaires de détection des troupeaux infectés. De plus, ces estimations ont été réalisées à l'échelle de l'élevage, à partir de données sur les caractéristiques moyennes d'un seul département. Une évaluation plus réaliste de l'efficacité globale de la surveillance de la TB en France a été réalisée dans la suite de ce travail (cf. Chapitre 7).

La sensibilité troupeau moyenne était plus élevée dans les troupeaux à faible taux de rotation que dans les troupeaux à fort taux de rotation, quel que soit le protocole. La proportion d'adultes dans chaque type de troupeau pourrait expliquer cette différence : en effet, celle-ci est plus élevée dans les troupeaux à faible taux de rotation (annexe 3), ce qui augmente le nombre d'animaux testés et donc la sensibilité troupeau du dépistage.

Les coûts étaient plus élevés dans les troupeaux mixtes, quel que soit le protocole, car ils sont en moyenne de plus grande taille que les élevages laitiers et allaitants. Le protocole « abattage-recontrôle IDC » était toujours le plus coûteux, sauf pour les grands troupeaux mixtes avec un taux de rotation élevé. Cette exception peut être expliquée par les coûts indirects (coûts dus aux interdictions de vente), plus élevés pour le protocole « triage IFN », que pour le protocole « abattage-recontrôle IDC ». Pour la plupart des types de troupeaux, les coûts directs importants de ce dernier protocole comblaient cette différence entre protocoles ; mais elle était trois fois plus grande pour les grands troupeaux mixtes avec un taux de rotation élevé (en raison du nombre élevé d'animaux vendus habituellement) et les coûts directs ne la compensaient donc plus.

Dans la plupart des cas, l'éleveur semble avoir à sa charge plus de coûts que l'État, d'autant plus pour le protocole « testage IFN ». Cela est néanmoins à nuancer. En effet, le coût de collecte des échantillons sanguins pour la réalisation de l'IFNγ n'a pas été pris en compte. Or celle-ci est organisée différemment selon les départements et dans certains ces coûts peuvent incomber en partie ou totalement à l'État (communications personnelles : F. Chevalier (coordinateur TB), M-L. Boschirolli (directrice du LNR TB), P. Jabert (coordinateur régional TB)). De plus, les délais entre les étapes des protocoles ont été modélisés avec beaucoup d'incertitude et de variabilité, et pouvaient donc prendre des valeurs très élevées, ce qui a pu augmenter le temps de blocage estimé, et donc les coûts pour l'éleveur, d'autant plus pour les élevages à fort taux de rotation.

Le protocole « abattage-recontrôle IDC » n'était jamais le plus efficace, quel que soit le type de troupeau. Sa sensibilité troupeau a peut-être été légèrement sous-estimée car nous n'avons pas pris en compte, en cas de recontrôle IDC partiel, le choix des animaux recontrôlés fait par les autorités sanitaires. Or, ce choix cible généralement les animaux les plus susceptibles d'être infectés, comme les animaux appartenant au même lot que les animaux réactifs à l'ID1. Néanmoins, selon les analyses de sensibilité, la proportion d'animaux recontrôlés en IDC2 n'était pas le facteur le plus influent sur la sensibilité troupeau. De plus, la probabilité que ces animaux soient infectés reste très faible, compte tenu de la très faible prévalence intra-troupeau. Ainsi, recontrôler 100 % des animaux peut sembler être un bon moyen d'améliorer la sensibilité du protocole « abattage-recontrôle IDC ». Pourtant, notre modèle estimait qu'en recontrôlant 100 % des animaux du troupeau, il faudrait investir entre 242 et 8 206 euros en plus, pour un gain de sensibilité entre 0,4 % et 0,9 %, selon le type de troupeau. Recommander le recontrôle systématique de l'ensemble du troupeau est donc discutable en termes de rapport coût-efficacité, en particulier dans les grands troupeaux où le coût supplémentaire serait compris entre 1 000 et 8 000 euros par pourcentage de sensibilité acquise et par troupeau.

Cette étude suggère que les protocoles « abattage seul » et « testage IFN » sont plus efficaces que le protocole « abattage-recontrôle IDC », recommandé par l'Union Européenne, ce qui plaiderait en faveur de leur autorisation. Néanmoins, le protocole « abattage-recontrôle IDC » est le plus sensible. Son rapport coût-efficacité moindre est dû à ses coûts considérablement plus élevés causés par un blocage de l'élevage plus long que celui du protocole « abattage seul », et à l'abattage de tous les animaux non-négatifs à l'IDC1 ainsi qu'à un recontrôle par IDC sur plus d'animaux pour le protocole

« triage IFN ». En fonction de la probabilité d'infection et de l'importance accordée à l'objectif d'éradication par rapport aux dépenses, on pourrait donc, dans certains cas, préférer le protocole « abattage-recontrôle IDC » aux autres protocoles en raison de sa meilleure sensibilité troupeau.

Les résultats de l'analyse de sensibilité de la sortie « sensibilité troupeau » étaient très similaires entre les protocoles. La sensibilité de l'IDC était la variable la plus influente, ce qui est cohérent avec la forte incertitude que nous avons sur sa valeur.

L'analyse de sensibilité de la sortie « coûts » a mis en évidence l'impact du délai entre les étapes dans les protocoles « abattage seul » et « abattage-recontrôle IDC ». Ce résultat s'explique par une forte variabilité de ces intervalles (tableau 15) et par l'impact de ce délai sur les coûts indirects. Il souligne la nécessité de réduire, autant que possible, ce délai afin de réduire les pertes indirectes dues aux interdictions de vente. Néanmoins, cette réduction peut être limitée par la réglementation. Par exemple, en raison du phénomène d'accoutumance à l'injection de tuberculine (Coad *et al.*, 2010), responsable d'une anergie suite à la première ID, la réglementation impose un minimum de 42 jours entre deux ID. Dans les protocoles « abattage seul » et « triage IFN », la spécificité de l'IDC était l'une des variables les plus influentes sur les variations des coûts, en raison de l'incertitude importante sur sa valeur et de son impact sur le nombre d'animaux abattus.

Enfin, ce volet de la thèse a mis en évidence une différence significative entre les coûts totaux et entre les sensibilités troupeau des trois protocoles réglementaires. Ces protocoles ne sont donc pas équivalents, ce qui justifie la recherche du plus efficient en fonction du contexte. Le rapport coût-efficacité, calculé pour chaque protocole et pour chaque type de troupeau, fournit des informations supplémentaires permettant aux autorités sanitaires de choisir le meilleur protocole pour un type de troupeau donné. Néanmoins, le rapport coût-efficacité n'est pas le seul indicateur à prendre en compte. En effet, notre estimation n'incluait pas les facteurs humains, tels que l'acceptabilité des mesures qui peuvent affecter l'efficacité d'un système de surveillance (Broughan *et al.*, 2016 ; Calba *et al.*, 2016). Par exemple, certains VS peuvent ne pas déclarer aux autorités des résultats non-négatifs à l'ID1, afin d'éviter que l'élevage de leur client ne soit considéré comme suspect de TB. Les problèmes d'acceptabilité proviennent principalement de l'interdiction de vente des animaux pour un troupeau suspect (période de blocage). En effet, celle-ci peut être difficile à tolérer pour l'éleveur et induire des pertes économiques non négligeables. La non-déclaration par le VS des ID non négatives peut *a priori* avoir diverses causes qu'il serait utile de rechercher, comme par exemple la fréquence des résultats faussement positifs à l'ID, les lourdes répercussions économiques de la déclaration d'un résultat non-négatif (Calba *et al.*, 2016), ou la relation étroite existant entre VS et éleveurs, le VS responsable du dépistage obligatoire étant le vétérinaire habituel de l'élevage. De plus, les caractéristiques de l'IDC dépendent de la manière dont le test est réalisé (Tefka, 1986 ; Monaghan *et al.*, 1994 ; Schiller *et al.*, 2010), qui peuvent varier d'un VS à l'autre (Humblet *et al.*, 2011). L'inclusion de ces facteurs dans les arbres de scénario pourrait permettre d'obtenir une estimation plus exacte du rapport coût-efficacité de ces protocoles, en fonction du contexte sociologique.

Bilan

La modélisation par arbre de scénario a permis d'estimer la sensibilité troupeau et le coût total (ainsi que la répartition de ce coût entre l'État et les éleveurs) des protocoles de surveillance de la TB par dépistage périodique en élevage, en fonction du type de troupeau, lui-même défini par son type de production et sa catégorie de taille et de taux de rotation. Grâce à ces estimations, un rapport coût-efficacité a pu être calculé pour chaque protocole, permettant d'identifier, pour chaque type de troupeau, le protocole le plus efficient. Le protocole « abattage-recontrôle IDC » n'était jamais le plus efficient, malgré une sensibilité troupeau la plus élevée. Ces rapports coût-efficacité fournissent aux autorités sanitaires des informations complémentaires pour les aider à choisir le protocole à appliquer. Néanmoins, il est nécessaire de prendre en compte des facteurs sociologiques, tels que l'acceptabilité des mesures pour les VS, qui peuvent modifier l'estimation de l'efficacité de ces protocoles et leur classement d'efficience.

Chapitre 3. Intégration de données sur les pratiques des VS à l'évaluation du dépistage périodique de la TB en élevage

Ce travail a donné lieu à une publication :

V. Guétin-Poirier, G. Crozet, S. Gardon, B. Dufour and J. Rivière. 2019. Integrating data of veterinarians' practices in assessing the cost effectiveness of three components of the bovine tuberculosis surveillance system by intradermal tuberculin testing in French cattle farms through a scenario-tree approach. Res. Vet. Sc. **128**, 242-260.

3.1. Objectif spécifique de l'intégration de données sur les pratiques des VS

Les arbres ainsi construits ont permis de réaliser une première évaluation coût-efficacité des protocoles réglementaires. Toutefois, certains paramètres primordiaux n'étaient pas pris en compte. En effet, l'efficacité d'un système de surveillance repose principalement sur la volonté de ses principaux acteurs à participer et à suivre les pratiques prescrites (Pfeiffer, 2006). La surveillance de la TB en élevage ne fait pas exception : l'efficacité des protocoles de surveillance repose notamment sur les pratiques d'ID des VS et sur leur volonté à déclarer les résultats d'ID non-négatifs. Or, la situation particulière du VS français, VS privé mandaté par l'État pour des missions de santé publique dans les élevages de leurs clients, pourrait inciter certains VS à ne pas déclarer tous les résultats non-négatifs afin d'éviter à leur client les désagréments d'une suspicion (interdiction des ventes pour une durée qui peut être longue (plus de six semaines en suspicion forte) ; d'autant plus que la faible prévalence de la TB en France diminue la valeur prédictive positive du dépistage. Nous avons donc souhaité intégrer à notre évaluation ces paramètres, ainsi que d'éventuels facteurs les influençant. Aucune méthode spécifique pour l'intégration de facteurs relevant de pratiques sociales (souvent estimés qualitativement) à des méthodes d'évaluations quantitatives, telles que la méthode des arbres de scénario, n'était disponible. Nous avons donc développé une méthode *ad hoc*, présentée dans ce chapitre et appliquée à l'évaluation coût-efficacité des protocoles réglementaires de dépistage périodique de la TB en France.

3.2. Matériel et méthode

La méthode développée pour intégrer les données de pratiques terrain dans la modélisation d'arbres de scénario se déclinait en trois grandes étapes : une étude qualitative (3.2.1), une enquête quantitative (3.2.2, 3.2.3 et 3.2.4) et l'intégration des facteurs influençant les pratiques dans l'arbre de scénario (3.2.5). Dans le paragraphe correspondant, l'objectif et la méthode générale de chacune de ces étapes sont décrites suivi des explications sur sa mise en œuvre dans le cadre de notre étude.

3.2.1. Une première étude qualitative pour identifier les facteurs ayant une influence potentielle sur les pratiques des VS

La première étape de la méthode consiste à identifier -par une approche qualitative- les pratiques des acteurs à prendre en compte dans l'évaluation quantitative du système, ainsi que le contexte sociologique global dans lequel elles s'insèrent. Cette enquête qualitative a plusieurs objectifs :

- 1- mieux connaître les variations de pratiques existantes sur le terrain, afin de pouvoir les estimer quantitativement par la suite ;
- 2- identifier les facteurs susceptibles d'influencer ces pratiques, afin de soulever des hypothèses sur les facteurs à étudier dans l'enquête quantitative et sur lesquels concentrer la collecte de données ;

3- mieux comprendre le contexte sociologique dans lequel ces pratiques se sont développées ainsi que les problèmes et préoccupations des acteurs concernés. Cela permet de formuler des questions appropriées pour l'enquête quantitative et fournit des informations précieuses pour la discussion globale des résultats quantitatifs ainsi que pour la suggestion d'améliorations.

Cette enquête qualitative peut être réalisée par le biais d'entretiens semi-directifs. Les acteurs sont choisis pour représenter, autant que possible, la diversité des pratiques et des contextes. L'objectif n'est pas d'assurer une représentation fidèle de tous les acteurs concernés, mais d'avoir une vision de toutes les situations possibles et de leur diversité. En théorie, la seule règle déterminant la taille de l'échantillon dans ce cadre est « le principe de saturation »: les entretiens sont interrompus lorsque les acteurs interrogés n'expriment plus de nouvelles idées (par rapport aux entretiens précédents).

Ainsi, dans notre étude, l'étude qualitative a d'abord été menée dans des zones présentant différents niveaux d'infection par la TB. En effet, nous avons supposé que le niveau d'infection pouvait influencer les pratiques des VS en raison de son potentiel impact sur leur perception de l'importance de la TB et sur le nombre d'ID pratiquées par le VS (puisque le niveau d'infection influence la fréquence du dépistage périodique). Ainsi, 58 VS pratiquant une activité rurale issus de sept départements ont été interrogés (entretiens semi-directifs) (Guillon *et al.*, 2018 ; Gully *et al.*, 2018). Ces sept départements ont été sélectionnés pour représenter la variabilité des départements de France métropolitaine pour trois facteurs. Ces facteurs étaient : (i) le niveau d'infection de TB (estimé d'après la prévalence de la TB entre 2012 et 2016 et l'existence de foyers de TB après 2015) ; (ii) la race de bovin majoritaire en élevage allaitant (qui peut avoir une influence sur la facilité de manipulation des animaux et donc de réalisation de l'ID) ; et (iii) la fréquence de dépistage (annexe 10). Les VS de ces départements ont été contactés par téléphone à partir des listes des VS fournies par les DDPPs afin de solliciter des entretiens en face à face.

Au cours de ces entretiens semi-directifs, les VS ont été interrogés sur l'organisation du dépistage périodique de la TB dans leur clinique, sur la manière et les conditions dans lesquelles ils effectuent les ID sur le terrain, sur leurs interactions avec les autres acteurs de la surveillance (éleveurs, DDPP, bovins) et sur leur avis sur le programme de surveillance et de contrôle de la TB, son utilité, ses difficultés. Des données sur leur formation, leur carrière et leurs caractéristiques démographiques ont également été collectées.

Les résultats de cette étude qualitative (présentés dans le paragraphe 3.3) nous ont guidés dans l'élaboration d'une enquête quantitative auprès des VS sur leurs pratiques de l'ID, permettant de collecter des données sur les facteurs potentiellement influents sur ces pratiques. En outre, les données qualitatives sur la perception des VS à l'égard du programme de surveillance et de contrôle de la TB ont permis de formuler les questions selon des termes appropriés.

3.2.2. Une deuxième étude quantitative pour quantifier les pratiques d'ID et les facteurs les influençant

La deuxième étape de la méthode consiste à réaliser une étude quantitative sous la forme d'une enquête (en ligne, par exemple) auprès des acteurs concernés. Comme expliqué dans la section ci-dessus, la conception de cette enquête doit être guidée par les résultats de l'enquête qualitative, complétés par les informations de la littérature scientifique. Son objectif est de quantifier l'occurrence de chaque type de pratiques et les facteurs identifiés comme pouvant influencer sur les pratiques.

Dans le cas de notre étude, l'enquête quantitative a été réalisée par Crozet *et al.* (Crozet *et al.*, 2019). Ils ont réalisé une enquête en ligne et interrogé les VS sur leurs pratiques d'ID, leurs habitudes de déclaration des résultats non-négatifs, leur perception du programme de surveillance et de contrôle de la TB et les caractéristiques des élevages de leur clientèle (taille, type de production, systèmes de contention, etc.). Des données sur l'âge, le sexe, la formation, le nombre d'ID réalisées l'année précédente et le pourcentage d'activité rurale du VS répondant ont également été collectées. Pour les besoins de cette étude, nous avons utilisé uniquement les réponses des VS ayant effectué au moins une IDC dans le cadre d'un dépistage programmé en élevage (115 réponses).

3.2.3. Transformation des résultats bruts de l'enquête quantitative en des variables quantitatives utilisables

En fonction des pratiques d'intérêt du système de surveillance à évaluer, il peut être nécessaire de transformer les résultats bruts de l'enquête quantitative en variables plus faciles à analyser. C'était le cas dans notre étude. En effet, la pratique de l'IDC comporte de nombreuses étapes et la variabilité exprimée pour chacune de ces étapes conduisait à un grand nombre de modalités de variables difficiles à analyser. En outre, la perception du programme de surveillance et de contrôle de la TB semblait avoir une influence sur les pratiques mais correspond à un concept difficile à évaluer quantitativement. Par conséquent, nous avons construit trois scores à partir des résultats bruts de l'enquête quantitative : un pour représenter la pratique de l'IDC ; un pour évaluer la perception du VS sur le programme de surveillance et de contrôle de la TB ; et un pour représenter ses habitudes de déclaration des résultats non-négatifs à l'IDC.

3.2.3.1. Score de réalisation de l'IDC

L'enquête quantitative en ligne contenait des questions pour renseigner chaque étape de la pratique de l'IDC. Ces questions étaient à choix multiples, dans lesquels les réponses possibles avaient été déterminées en fonction des différentes pratiques d'IDC, observées et décrites dans l'enquête qualitative pour chaque étape du test. Pour chacune de ces étapes, aucun point n'était attribué au VS s'il suivait les recommandations réglementaires ou si sa pratique était acceptable, c'est-à-dire si les variations par rapport à la norme réglementaire étaient considérées comme ayant peu d'impact sur la sensibilité des ID et étaient donc tolérées par les autorités sanitaires. Un point était attribué si la pratique du VS était inacceptable en raison de son influence néfaste sur la sensibilité du test (tableau 19). Par exemple, pour le site d'injection, un VS effectuant l'injection sur le cou de tous les animaux ou de tous les animaux calmes n'obtenait aucun point. Un point lui était attribué s'il n'injectait rien ou s'il injectait sur d'autres zones (ce qui diminue la sensibilité d'une ID réalisée avec la dose d'antigène PPD bovin utilisée en France (Casal *et al.*, 2015)).

Tableau 19. Points attribués aux VS pour calculer le score de réalisation de l'acte d'intradermo-tuberculination en fonction de leurs réponses au questionnaire en ligne (Crozet *et al.*, 2019)

Légende : 0 = référence ou acceptable, 1 = non acceptable

	Score	Part relative dans le risque d'obtenir un faux négatif (Humblet <i>et al.</i> , 2011)*	Coefficient de pondération*
Site d'injection			
Encolure systématiquement	0		
Encolure uniquement si non-nerveuses, pas d'ID pour les autres	0		
Encolure si non-nerveuse, autre site pour les bovins nerveux	0	7,0 %	1
Pas de réalisation d'IDT si bovins trop nerveux dans l'élevage	1		
Autre site d'injection pour tous les bovins si certains sont nerveux	1		
Préparation du site d'injection			
Ciseaux	0		
Marquage sans coupe de poils	0		
Rasoir	0		
Tondeuse	0	6,0 %	0,5
Variable	1		
Aucune préparation	1		
Matériel d'injection			
Seringues et aiguilles	0		
McLintock	0		
Muto	0	3,0 %	0,5
Synthéna	0		
Dermojet	1		

(suite du tableau sur la page suivante)

	Score	Part relative dans le risque d'obtenir un faux négatif (Humblet <i>et al.</i> , 2011)*	Coefficient de pondération*
Vérification de la qualité de l'injection			
Vérification systématique de la présence d'un rejet et réinjection ajustée à l'échappement objectivé si tel est le cas	0		
Vérification systématique de la présence d'un rejet et réinjection d'une dose complète si échappement de tuberculine	0		
Vérification systématique de la présence d'un rejet mais pas de réinjection si c'est le cas car difficultés de contention	1	10,2 %	1
Pas de vérification de l'absence de rejet, notamment si difficultés de contention	1		
Vérification systématique de la présence d'un rejet mais pas de réinjection si c'est le cas car peur de générer un faux-positif	1		
Personne effectuant la lecture			
Toujours le même que celui ayant injecté	0		
Parfois un autre VS que celui ayant injecté	1	7,9 %	1
Délai de lecture			
Reportée au lendemain si impossibilité à J3	0		
Avancée si impossibilité à J3	1	7,9 %	1
Outils de lecture			
Au cutimètre systématiquement	0		
Au cutimètre si un doute uniquement et comparé à un pli mesuré à J3 sur une zone non-injectée	0		
Au cutimètre si un doute uniquement et comparé à au pli mesuré à J0 avant l'injection	0	19,4 %	2
Lecture uniquement par palpation	1		
Lecture dans le cas de difficultés de contention importantes			
Selon la réglementation	0	19.4%	2
À distance	1		
Méthode de lecture			
Mesures des plis de peau sur les 2 sites à J0 avant injection et comparaison aux 2 mesures réalisées à J3	0		
Mesure d'un pli de peau à J0 et comparaison aux plis des 2 sites d'injections à J3	0		
Mesures des plis de peau sur les 2 sites à J0 avant injection et mesures des plis de peau à J3 uniquement si une réaction est palpable	0	19,4 %	2
Aucune mesure de pli de peau à J0, 3 mesures à J3 : 2 au niveau des sites d'injection comparée à une mesure d'un pli à coté en zone non-injectée	1		

*Catégories de part prise par cette étape de réalisation de l'acte dans le risque d'obtenir un résultat faussement négatif (estimé par avis d'experts (Humblet *et al.*, 2011)) (en %) et coefficient de pondération associé :]0%-7%[⇒ coefficient de 0,5, [7%-15%[⇒ coefficient de 1, [15%-22%[⇒ coefficient de 2.

3.2.3.2. Score de perception

Pour représenter la perception globale du programme de surveillance et de contrôle de la TB par les VS, nous avons utilisé le même indice de perception que celui construit par Crozet *et al.* (2019), calculé à partir des réponses des VS à quatre thèmes : leur principale préoccupation lorsqu'ils obtiennent un résultat non-négatif à l'ID, leur perception de l'ID, les difficultés d'éradication de la TB selon eux, et leur perception de l'utilité du programme de surveillance et de contrôle de la TB. Les différentes réponses possibles et le score leur étant attribué sont présentés dans le tableau 20. Pour chaque réponse, aucun point n'était attribué au VS s'il avait une perception positive, et un point était attribué pour une perception négative.

L'indice final a été calculé en faisant la somme des points obtenus pour chaque thème, divisée par la somme maximale possible, ce qui a permis d'obtenir un indice compris entre zéro et un. Un score élevé correspondait à une perception négative du programme de surveillance et de contrôle de la TB par le VS.

Tableau 20. Points attribués aux VS, d'après leurs réponses au questionnaire en ligne, pour calculer leur score de perception du programme de surveillance et de lutte contre la TB

Légende : 0 = réponse reflétant une perception positive, 1 = réponse reflétant une perception négative
Les points ont ensuite été sommés et la somme a été recodée pour que le score final soit compris entre 0 et 1.

	Score
Préoccupation principale lors d'un résultat non-négatif	
Foyer zoonose grave	0
Déclaration d'un foyer qui va impacter économiquement l'éleveur	0
Blocage transitoire associé à un faux-positif	1
Pas préoccupé	1
Concernant l'acte d'IDT	
Possède des informations de la part des autorités sanitaires	oui = 0 / non = 1
Est en mesure de réaliser une IDT de façon satisfaisante	oui = 0 / non = 1
Actualisation des connaissances sur l'IDT nécessaire	oui = 1 / non = 0
Meilleur test actuellement disponible	oui = 0 / non = 1
Interprétation trop subjective	oui = 1 / non = 0
Nécessité de réévaluation de la partie administrative associée	oui = 1 / non = 0
Nécessité d'adapter les recommandations à la réalité de terrain	oui = 1 / non = 0
Nécessité d'arrêter de bloquer les élevages pendant 6 semaines lors de non-négatifs	oui = 1 / non = 0
Freins à l'éradication de la TB	
Imperfections de l'IDS	oui = 1 / non = 0
Imperfections de l'IDC	oui = 1 / non = 0
Faune sauvage en tant que potentiel réservoir	oui = 1 / non = 0
Manque de reconnaissance de la part des autorités sanitaires	oui = 1 / non = 0
Rémunération insuffisante des IDT	oui = 1 / non = 0
Danger lié à la réalisation de l'IDT	oui = 1 / non = 0
Double casquette VS "praticien" et "sanitaire"	oui = 1 / non = 0
Au sujet de la lutte contre la TB	
Essentiellement car c'est une zoonose grave	oui = 0 / non = 1
Essentielle pour garder le statut indemne	oui = 0 / non = 1
Essentielle pour garder un cheptel exempt de maladies transmissibles	oui = 0 / non = 1
Essentiellement pour finir un travail initié depuis des décennies	oui = 0 / non = 1
Inutile car la situation de la TB est favorable	oui = 1 / non = 0
Inutile car les résultats ne seront jamais au rendez-vous	oui = 1 / non = 0

3.2.3.1. Score de déclaration des résultats non-négatifs

Les habitudes des VS concernant la déclaration des résultats non-négatifs à l'IDC ont été évaluées à travers l'enquête quantitative. Une note de 0 était attribué à un VS s'il répondait qu'il ne déclarait pas systématiquement aux autorités tous les résultats non-négatifs obtenus à l'IDC. Un point était attribué s'il répondait qu'il déclarait toujours les résultats non-négatifs à l'IDC.

3.2.4. Identification des facteurs influents à intégrer dans l'arbre de scénario

Après la transformation des variables des résultats bruts de l'enquête quantitative en score quand cela est nécessaire, des régressions linéaires et / ou logistiques (en fonction du type de variable à expliquer) à partir des données de l'enquête quantitative doivent être effectuées pour identifier les variables ayant une influence significative sur les pratiques d'intérêt (dans notre exemple, le score de réalisation de l'IDC et le score de déclaration). Pour chaque variable à expliquer, des modèles de régression linéaire simples sont d'abord utilisés pour sélectionner les variables prédictives à inclure dans un modèle multivarié (variables avec une valeur $p \leq 0,25$). Les variables sélectionnées sont ensuite utilisées dans un modèle multivarié initial. L'estimation du facteur d'inflation de la variance (VIF), pour chaque variable prédictive de ce modèle, permet d'identifier les variables colinéaires. La colinéarité de deux variables est étudiée et la suppression éventuelle de l'une d'elles est discutée pour les variables dont le VIF est supérieur à trois. Ensuite, une procédure de sélection automatisée utilisant le critère bayésien d'information (BIC) peut être utilisée pour simplifier et optimiser le modèle multivarié (fonction R «stepAIC» du package MASS). Les conditions d'application du

modèle utilisé (régressions linéaires ou logistiques) doivent être vérifiées. Enfin, les variables ayant un impact significatif sur les pratiques d'intérêts sont ajoutées à l'arbre de scénario.

Dans notre travail, nous avons vérifié que les résidus de chacun des modèles de régression linéaire construits avaient effectivement une distribution normale. L'homoscédasticité des résidus a été vérifiée graphiquement. De plus, toutes les régressions logistiques comportaient au moins cinq à dix événements par variable explicative et une analyse des caractéristiques de performance (ROC) a été réalisée pour évaluer leur capacité de classification qui semblait satisfaisante. Nous avons donc considéré les modèles comme valides. Nous avons ajouté aux arbres de scénario uniquement des variables ayant un impact significatif sur les pratiques d'intérêt et pour lesquelles la sélection dans le modèle multivarié avait moins de chances d'être due au hasard ($p < 0,01$), afin de conserver une sélectivité élevée et d'éviter une sur-complexification des arbres de scénario.

3.2.5. Intégration des facteurs influençant les pratiques dans l'arbre de scénario

Après avoir identifié les variables ayant une influence significative sur les pratiques, au moyen d'analyses de régression multivariées, leur incorporation effective dans les arbres de scénario peut commencer. Dans un premier temps, l'influence des pratiques sur l'efficacité de la surveillance doit être modélisée. Dans le cadre de la réalisation d'un test de dépistage, l'influence des pratiques sur sa sensibilité et sa spécificité doit par exemple être modélisée. Dans notre étude, nous avons réalisé ce travail pour les pratiques de l'IDC : nous avons ainsi modélisé le lien entre le score de réalisation de l'IDC et ses caractéristiques (sensibilité et spécificité). Le score de réalisation de l'IDC tenait compte de l'influence de chaque étape de l'IDC sur la probabilité d'obtenir des résultats faussement négatifs, c'est-à-dire sur la sensibilité. Si le score de réalisation de l'IDC était nul, le VS suivait les recommandations de pratiques de l'IDC ou avait des pratiques acceptables. Dans la littérature, en particulier pour la littérature française, les estimations des caractéristiques de l'IDC étaient fondées sur les résultats de protocoles contrôlés par les autorités et dans lesquels le VS s'était engagé à respecter la réglementation sur les pratiques de l'IDC. Nous avons donc fait l'hypothèse que ces estimations se référaient à des pratiques d'IDC considérées comme acceptables. Dans nos arbres de scénario, nous avons donc utilisé, lorsque le score de réalisation de l'IDC était nul, les valeurs de sensibilité et de spécificité publiées dans la littérature. Si le score de réalisation était maximal (égal à 11), cela signifiait que toutes les étapes de l'IDC étaient incompatibles avec les recommandations réglementaires : nous avons donc fait l'hypothèse que, dans ce cas, la sensibilité de l'IDC était nulle et, par conséquent, sa spécificité parfaite. Entre ces deux extrêmes, il existait un large éventail de combinaisons de pratiques possibles pour chaque étape du test ; chaque combinaison pouvant avoir un effet différent sur les caractéristiques de l'IDC. Malheureusement, l'influence réelle de chacune de ces combinaisons de pratiques sur les caractéristiques du test était inconnue et les experts se sont déclarés incapables de l'estimer. Pour modéliser cet impact dans les arbres de scénario, nous avons donc choisi de créer trois catégories de valeurs pour le score de réalisation de l'IDC, de taille égale, afin de distinguer les valeurs basses des valeurs moyennes, et élevées. Ensuite, nous avons supposé, pour le passage d'une catégorie (avec la valeur la plus basse) à une autre, c'est-à-dire pour des pratiques devenant moins acceptables, une sensibilité décroissante et une spécificité croissante de l'IDC, comme décrit dans le tableau 21.

Tableau 21. Méthode utilisée dans les arbres de scénario pour calculer la sensibilité (Se) et la spécificité (Sp) de l'IDC, utilisées en fonction de la valeur du score de réalisation de l'IDC

	Score de réalisation pondéré				
	0	]0-3]	]3-6]	]6-10]	>10
Sensibilité	Publications scientifiques : Se	$0,75 * Se$	$0,5 * Se$	$0,25 * Se$	0
Spécificité	Publications scientifiques : Sp	$Sp + (1 - Sp) * 0,25$	$Sp + (1 - Sp) * 0,5$	$Sp + (1 - Sp) * 0,75$	1

Si les pratiques d'intérêt concernent la déclaration de cas, un nœud « déclaration » avec au moins deux branches (« oui » et « non ») doit être ajouté dans les arborescences. La probabilité d'occurrence de chaque branche est modélisée en fonction des résultats de l'enquête quantitative. Il est bien sur tout à fait possible d'envisager l'inclusion d'autres types de pratiques. La manière de modéliser leur influence sur l'efficacité du système de surveillance devra être élaborée au cas par cas en fonction du contexte.

Ensuite, les nœuds correspondant aux facteurs pour lesquels une influence significative sur les pratiques a été identifiée à l'étape précédente de la méthode sont ajoutés à l'arbre de scénario. La probabilité d'occurrence de chaque nouvelle branche générée par cette addition de nœud est modélisée en fonction des résultats obtenus dans l'enquête quantitative, soit par une probabilité fixe (s'il n'y a ni incertitude ni variation dans la probabilité d'occurrence), soit par une loi de distribution. Le détail de cette intégration dans les arbres de scénario de notre étude est décrit au paragraphe 3.3.3.

3.2.6. Calculs et analyses

Grâce aux arbres de scénario ainsi construits, la sensibilité moyenne du troupeau et le coût de chaque protocole de surveillance ainsi que leur intervalle de confiance (IC) à 95 % ont été estimés, pour chaque type de troupeau et pour une période d'un an (la TB étant une maladie chronique et le dépistage dans les exploitations ayant lieu tous les ans), à partir de 10 000 valeurs simulées et selon la méthode décrite dans le chapitre précédent (paragraphe 2.2.2 et 2.2.3.3.). Puis, une analyse coût-efficacité ainsi que des analyses de sensibilité ont été réalisées pour chaque arbre suivant les méthodes présentées respectivement dans les paragraphes 2.2.4.1 et 2.2.4.2.

Toutes les analyses ont été réalisées avec RStudio (version 1.1.383.0). Les moyennes ont été comparées à l'aide du test t de Student, corrigé pour de multiples comparaisons par la méthode de correction de Bonferroni avec un risque d'erreur accepté α de 1 %.

3.3. Résultats

3.3.1. Résultats de l'enquête qualitative

L'étude qualitative a mis en évidence des variations de pratiques de l'IDC par rapport à la réglementation (Guillon *et al.*, 2018 ; Gully, 2018). Les écarts constatés (non vérification de la qualité de l'injection, non respect du délai de 72 heures pour la lecture du résultat, etc.) pouvaient avoir une influence importante sur la sensibilité et la spécificité du test. De plus, certains VS ont indiqué ne pas déclarer systématiquement les résultats non-négatifs aux autorités sanitaires. Ces informations ont confirmé l'intérêt de prendre en compte les pratiques des VS dans l'évaluation quantitative du système de surveillance de la TB. Cette étude a donné l'occasion aux VS d'exprimer les difficultés qu'ils rencontrent pour l'application de la surveillance de la TB sur le terrain, ce qui a notamment permis de formuler des hypothèses sur les facteurs influençant leurs pratiques. Dans cette enquête, les pratiques de l'IDC semblaient davantage conforme avec la réglementation dans les départements où la prévalence de la TB était plus élevée, peut-être parce que les VS de ces départements sont bien informés des recommandations et mieux formés à leur mise en œuvre. Les contraintes et les motivations pour le dépistage par IDC exprimées par les VS étaient différentes selon le type de troupeau, la fréquence de dépistage et la prévalence de la TB. Pour justifier les écarts à la réglementation concernant leurs pratiques de l'IDC, les VS ont souvent mentionné le problème de la contention des bovins, associé au danger de réalisation de l'IDC et à sa nature fastidieuse (Gully *et al.*, 2018). Ils ont justifié la non-déclaration de certains résultats d'IDC non-négatifs par leur manque de confiance en ces résultats (faible valeur prédictive positive et impact négatif et injustifié pour l'éleveur qui est aussi leur client). Enfin, les VS semblaient avoir une perception différente du système de surveillance de la TB (fiabilité de l'ID, justification de la surveillance, faisabilité de l'éradication, etc.) en fonction de la prévalence de la TB dans le département (par exemple, dans les zone à forte prévalence, les VS s'inquiétaient plus de l'aspect zoonotique de la TB) et

de la fréquence du dépistage périodique (par exemple, dans les zones où le dépistage est peu fréquent, les VS remettaient plus en question la fiabilité de l'ID).

3.3.2. Identification des facteurs influençant les pratiques des VS à partir des résultats de l'enquête quantitative

Tout d'abord, nous avons cherché à expliquer le score de réalisation de l'IDC à travers l'analyse des résultats de l'enquête quantitative réalisée par Crozet *et al.* (2019). Les résultats de la régression linéaire simple sont détaillés dans l'annexe 11. Les variables avec une valeur $p < 0,25$ ont été incluses dans le modèle multivarié, ainsi que l'aide à la contention et le rythme de dépistage dans le département où le VS exerce, qui ont été forcées dans le modèle multivarié initial car, dans l'étude qualitative préliminaire, ces paramètres semblaient influencer les pratiques de l'IDC. Tous les VIF étaient inférieurs ou égaux à deux, aucune variable colinéaire pouvant introduire des biais dans l'estimation des paramètres du modèle n'a donc été identifiée. Les résultats du modèle final obtenu après le processus de sélection automatique sont décrits dans tableau 22. La seule variable significativement associée ($p < 0,01$) au score de réalisation de l'IDC était le score de perception : les VS ayant une meilleure perception du programme de surveillance et de contrôle de la TB avaient un meilleur score de réalisation de l'IDC. Nous avons donc utilisé une régression linéaire expliquant le score de réalisation de l'IDC par le score de perception dont les résultats sont présentés dans le tableau 23.

Tableau 22. Résultats de la régression linéaire multivariée expliquant le score de réalisation de l'IDC

R^2 ajusté = 0,2187 Valeur p du modèle < 0,001
Statistique F = 5,806 Écart type résiduel = 1,426 (degrés de liberté = 97)

	Coefficient estimé	Écart type	Valeur p	Catégorie de référence	
Constante	0,97	0,490	0,05	/	
Score de perception	4,47	1,188	$2,85 \cdot 10^{-4**}$	/	
Âge du VS (< 50, ≥ 50 ans)	0,573	0,293	0,054	< 50 ans	
Type de production	Laitier	-0,1467	0,398	0,0766	Allaitant
	Mixte	-0,805	0,351		
Fréquence des couloirs de contention dans les élevages des clients du VS (fréquent/moins fréquent)	0,698	0,283	0,0155	Moins fréquent	
Proportion d'IDS parmi les ID réalisées par le VS	0,0082	0,004354	0,0626	/	

** $p < 0,01$, association significative

Tableau 23. Résultats de la régression linéaire multivariée expliquant le score de réalisation de l'IDC par le score de perception

R^2 ajusté = 0,1063 Valeur p du modèle < 0,001
Statistique F = 13,25 Écart type résiduel = 1,526 (degrés de liberté = 102)

	Coefficient estimé	Écart type	Valeur p	Catégorie de référence
Constante	1,7963	0,3933	$1,38 \cdot 10^{-5**}$	/
Score de perception	4,3708	1,208	$4,3 \cdot 10^{-4**}$	/

** $p < 0,01$, association significative

Le score de perception étant la seule variable significativement associée au score de réalisation de l'IDC, nous avons souhaité identifier les variables influençant ce score de perception. Nous avons utilisé la même méthode que pour le score de réalisation de l'IDC : les résultats des régressions linéaires simples sont présentés dans l'annexe 12 et les résultats de la régression multivariée finale dans le tableau 24. L'âge du VS, le nombre de personnes généralement présentes pour aider à la contention lors des dépistages et la fréquence des cornadis étaient associées au score de perception. Les VS de plus de 50 ans avaient une meilleure perception moyenne de la lutte contre la TB, probablement parce qu'ils étaient déjà VS avant que la France n'obtienne son statut de pays indemne de TB, alors que la prévalence de l'infection était beaucoup plus élevée dans le pays. Les VS recevant généralement une aide appropriée pour la contention des animaux (au moins deux personnes de l'élevage) pour la mise en œuvre de l'IDC et dont la majorité de la clientèle possède des cornadis avaient une perception plus positive du programme de surveillance et de contrôle de la TB, probablement parce qu'il leur est plus facile de pratiquer l'IDC dans ces conditions. Un modèle de

Contribution personnelle – Chapitre 3. Intégration de données sur les pratiques des VS à l'évaluation du dépistage périodique en élevage

régression expliquant l'indice de perception par ces trois variables principales a été ajusté et est présenté en annexe 13.

Tableau 24. Résultats de la régression linéaire multivariée expliquant le score de perception

R² ajusté= 0,2142

Valeur p du modèle = 1,34*10⁻⁵

Statistique F =6,181

Écart type résiduel = 0,1068 (degrés de liberté= 108)

	Coefficients estimés	Écart type	p-value	Catégorie de référence
Constante	0,4086	0,0214	< 2.10 ^{-16**}	/
Âge du VS (<50, ≥50)	-0,07047	0,0223	0,00206**	< 50 ans
Statut du VS (employé/libéral)	-0,05977	0,0288	0,0406	Libéral
Fréquence des cornadis (fréquent/moins fréquent)	-0,06543	0,0212	0,00252**	Moins fréquent
Aide à la contention (<2 personnes / ≥2 personnes)	-0,06583	0,0203	0,00156**	< 2 personnes
Type de production	Laitier	-0,05730	0,0566	Allaitant
	Mixte	0,01928		

**p<0,01, association significative

Des analyses similaires ont été réalisées pour expliquer le nombre de personnes qui aident généralement à la contention des animaux et la fréquence des cornadis dans la clientèle (*via* des régressions logistiques). Les résultats de ces analyses sont présentés dans l'annexe 14, l'annexe 15 et l'annexe 16. Aucune des variables étudiées n'était associée de manière significative ni au nombre de personnes habituellement présentes dans l'élevage afin d'aider le VS lors de ses interventions, ni à la fréquence des cornadis dans les élevages de la clientèle.

Enfin, en utilisant la même méthode, nous avons identifié les variables significativement associées aux pratiques de déclaration des résultats non-négatifs (tableau 25). Le score de perception était la seule variable associée à la déclaration de résultats non-négatifs avec une valeur p proche de 0,01 (valeur p = 0,03) et avait une influence importante sur cette variable dans la régression logistique (coefficient estimé élevé). En outre, une influence réelle de la perception de la TB par le VS sur la déclaration des résultats non-négatifs semblait logique et cohérente avec les résultats de l'étude qualitative. Nous avons donc choisi d'en tenir compte dans nos arbres de scénario.

Tableau 25. Résultats de la régression logistique multivariée expliquant la déclaration des résultats d'IDC non-négatifs

Analyse ROC : Aire sous la courbe ROC (AUC) = 0,849 [0,77-0,92]IC95%

	Coefficients estimés	Écart type	Valeur p	Catégorie de référence
Constante	5,03	1,7	1,8.10 ^{-5*}	/
Score de perception	-9,03	-1,94	0,03*	/
Incidence cumulative de TB pour 1 000 troupeaux entre 2012 et 2016 dans le département du VS	≤ 0,1	18,08	0,1	]0,1 ; 1]
	]1-10]	0,76		
	>10	1,769		

*p<0,05, association significative.

3.3.3. Intégration des pratiques des VS dans les arbres de scénario

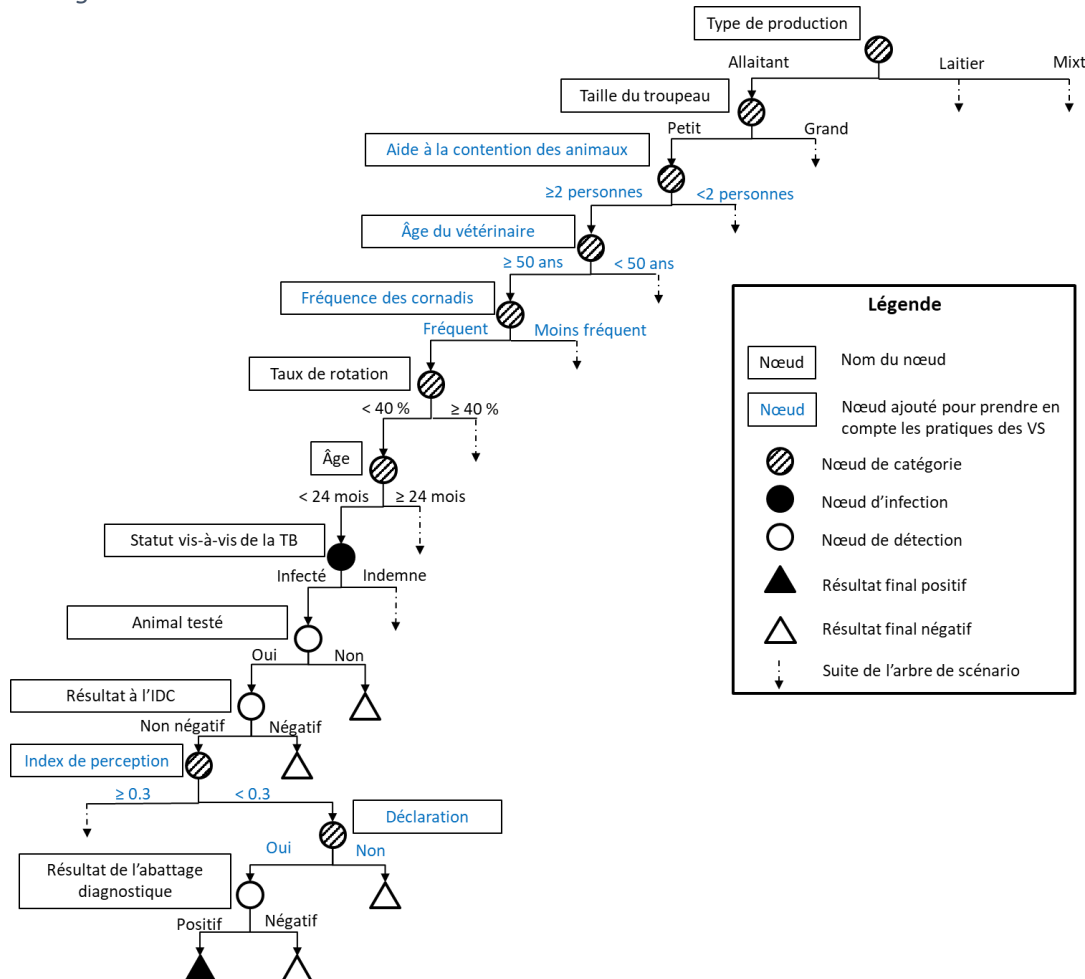
Nous avons ainsi ajouté, dans les arbres de scénario présentés dans le chapitre 2, des nœuds correspondant aux variables significativement influentes, identifiées grâce aux analyses multivariées précédentes. Nous avons donc ajouté les nœuds « aide à la contention » (< deux personnes ou ≥ deux personnes), « âge du VS » (plus ou moins de 50 ans), « fréquence des cornadis » (fréquent ou moins fréquent) et le nœud « déclaration des résultats d'IDC non-négatifs ». Les arbres de scénario finaux obtenus pour chaque protocole sont présentés dans la figure 20, dans l'annexe 17 et dans l'annexe 18.

La probabilité pour le VS de disposer, pour la contention, de l'aide d'au moins deux personnes et la probabilité que les cornadis soient fréquents dans sa clientèle ont été modélisées par des lois de distribution bêta, dont les paramètres ont été définis pour correspondre au mieux à la répartition observée dans les résultats quantitatifs de l'enquête : respectivement Bêta(49 ; 64,9) et Bêta(39,9 ; 74,1). La probabilité pour le VS

Contribution personnelle – Chapitre 3. Intégration de données sur les pratiques des VS à l'évaluation du dépistage périodique en élevage

d'avoir moins de 50 ans a été fixée selon les données nationales françaises (Observatoire national démographique de la profession VS, 2017). Les VS avaient donc une probabilité fixe de 33 % d'avoir plus de 50 ans, ce qui correspond à la répartition de l'âge parmi les VS ruraux français en 2017.

Figure 20. Arbre de scénario représentant le protocole réglementaire de dépistage de la TB en élevage « abattage seul »



L'âge du VS et le nombre de personnes généralement présentes pour aider à la contention avaient une influence sur la valeur du score de perception à utiliser dans les arbres de scénario. Ainsi, dans les modèles, un score de perception a été simulé pour chaque itération grâce à une loi de distribution bêta, dont les paramètres étaient définis en fonction des résultats de l'enquête quantitative et conditionnellement à l'âge du VS et aux nombres de personnes présentes pour aider à la contention (tableau 26).

Tableau 26. Moyenne et écart type du score de perception des VS dans les données en fonction de l'âge du VS, du nombre de personnes généralement présentes pour l'aider à la contention et de la fréquence des cornadis dans les élevages de sa clientèle ; et paramètres des lois bêtas utilisées pour modéliser ce score

Âge du VS	Aide à la contention	Fréquence des cornadis	Moyenne	Écart type	Paramètres des lois bêta	
					a	b
< 50 ans	< 2 personnes	Moins fréquent	0,37	0,14	4,03	6,86
		Fréquent	0,32	0,13	3,80	8,07
	≥ 2 personnes	Moins fréquent	0,31	0,14	3,07	6,84
		Fréquent	0,25	0,09	5,54	16,61
≥ 50 ans	< 2 personnes	Moins fréquent	0,33	0,10	6,97	14,14
		Fréquent	0,27	0,08	8,05	21,75
	≥ 2 personnes	Moins fréquent	0,26	0,08	7,56	21,51
		Fréquent	0,22	0,12	2,40	8,52

Enfin, à chaque itération du modèle, la valeur du score de perception déterminait : 1) le score de réalisation de l'IDC, qui influençait, comme décrit en 3.2.5, la sensibilité et la spécificité de l'IDC ; et 2) la probabilité qu'un résultat d'IDC non-négatif soit déclaré aux autorités sanitaires par le VS.

Les résultats du modèle multivarié expliquant le score de réalisation de l'IDC ayant montré que le score de perception était la seule variable ayant une influence notable sur la pratique de l'IDC, nous avons choisi de modéliser le score de réalisation de l'IDC en fonction de ce score de perception, en utilisant les résultats du modèle multivarié (tableau 23). Dans les arbres de scénario, le score de réalisation de l'IDC a donc été calculé selon la formule (15) :

$$(15) \text{ Score de réalisation de l'IDC} = c * \text{score de perception} + \varepsilon$$

Où c suivait une loi de distribution normale $N(\text{moyenne} = 4,37, \text{écart type} = 1,20)$, dont les paramètres ont été définis en fonction du résultat de l'analyse multivariée expliquant le score de réalisation de l'IDC (tableau 22) ; et ε , le résidu de la régression multivariée, suivait une loi de distribution normale $N(\text{moyenne} = 1,80, \text{écart type} = 0,39)$ bornée entre $(-c * \text{score de perception})$ et $(11-c * \text{score de perception})$.

La probabilité qu'un résultat non-négatif soit déclaré a été modélisée par des lois de distribution bêta avec des paramètres définis en fonction de l'enquête quantitative (annexe 19).

Dans les protocoles comprenant une seconde IDC (IDC2) (protocoles « abattage-recontrôle IDC » et « Triage IFN »), nous avons émis l'hypothèse que le VS déclarait systématiquement les résultats non-négatifs de l'IDC2 car il effectue ces tests dans un troupeau déjà suspect, suivi attentivement par les autorités sanitaires et pour lequel une mauvaise évaluation du statut infectieux d'un animal pourrait avoir des conséquences importantes.

3.3.4. Sensibilité troupeau prenant en compte les pratiques du VS

Le tableau 27 présente les moyennes et les 5^{ème} et 95^{ème} percentiles de la sensibilité troupeau estimée pour chaque protocole par type de troupeau à partir des arbres de scénario, en tenant compte des pratiques de terrain des VS. La sensibilité troupeau moyenne variait de 11,93 % pour le protocole « triage IFN » (dans les grands troupeaux à taux de rotation élevé) à 42,61 % pour le protocole « abattage-recontrôle IDC » (dans les grands troupeaux mixtes à faible taux de rotation). La sensibilité troupeau moyenne était plus faible dans les troupeaux à fort taux de rotation, quel que soit le type de production et la taille du troupeau et quel que soit le protocole, en raison du nombre moins élevé d'animaux âgés de plus de 24 mois soumis au dépistage dans ce type de troupeau. Les différences de sensibilité troupeau moyenne entre les types de troupeaux pour un même protocole étaient toutes significatives, à l'exception de la différence entre les petits troupeaux mixtes à fort taux de rotation et les petits troupeaux à faible taux de rotation pour le protocole « triage IFN ». Le protocole « abattage-recontrôle IDC » avait la sensibilité troupeau moyenne la plus élevée pour tous les types de troupeau et le protocole « triage IFN » la plus basse.

Tableau 27. Sensibilité troupeau moyenne (en %) (moyenne [IC_{95%}]) des trois protocoles réglementaires étudiés, estimée pour chaque type de troupeau en prenant en compte les pratiques des VS

Type de production	Taille	Taux de rotation	Protocole « triage IFN »	Protocole « abattage seul »	Protocole « abattage-recontrôle IDC »
Élevage laitier	petit (< 74)	< 40 %	24,67 [24,56-24,78]	25,60 [25,49-25,72]	30,01 [29,89-30,13]
		≥ 40 %	17,66 [17,58-17,74]	18,29 [18,21-18,38]	21,10 [21,02-21,19]
	grand (≥ 74)	< 40 %	29,86 [29,68-30,04]	31,30 [31,11-31,49]	33,28 [33,1-33,46]
		≥ 40 %	23,81 [23,69-23,94]	24,89 [24,76-25,02]	27,38 [27,25-27,51]
Élevage allaitant	petit (< 66)	< 40 %	21,56 [21,46-21,65]	22,34 [22,25-22,44]	26,25 [26,14-26,35]
		≥ 40 %	18,33 [18,25-18,41]	18,98 [18,89-19,06]	22,06 [21,97-22,15]
	grand (≥ 66)	< 40 %	28,06 [27,87-28,25]	29,41 [29,21-29,61]	31,21 [31,03-31,4]
		≥ 40 %	11,93 [11,83-12,02]	12,38 [12,28-12,48]	13,50 [13,4-13,6]
Élevage mixte	Petit (< 124)	< 40 %	25,48 [25,34-25,62]	26,58 [26,43-26,72]	29,42 [29,29-29,56]
		≥ 40 %	22,01 [21,9-22,13]	22,90 [22,78-23,02]	25,51 [25,39-25,62]
	Grand (≥ 124)	< 40 %	39,58 [39,35-39,81]	41,58 [41,34-41,82]	42,61 [42,39-42,84]
		≥ 40 %	36,42 [36,2-36,63]	38,20 [37,97-38,42]	39,34 [39,12-39,56]

Quels que soient le type de troupeau et le protocole considéré, l'intégration de données sur les pratiques d'IDC et de déclaration des résultats non-négatifs entraînait une diminution importante de 24 à 43 % des estimations initiales de la sensibilité du troupeau (sans prise en compte des pratiques) (tableau 28). Pour un protocole donné, la diminution de la sensibilité troupeau estimée était significativement plus faible dans les grands troupeaux par rapport aux petits troupeaux (à type de production et à taux de rotation du troupeau constants) et dans les grands troupeaux mixtes par rapport aux autres grands troupeaux. Pour un type de troupeau donné, la différence de diminution de la sensibilité troupeau estimée n'était pas significative entre le protocole « triage IFN » et le protocole « abattage seul », alors que cette diminution était significativement inférieure dans le protocole « abattage-recontrôle IDC » par rapport aux deux autres protocoles.

Tableau 28. Impact de la prise en compte des pratiques d'IDC et des habitudes de déclaration des résultats non-négatifs sur l'estimation de la sensibilité troupeau des protocoles

Type de production	Taille	Taux de rotation	Protocole « triage IFN »			Protocole « abattage seul »			Protocole « abattage-recontrôle IDC »		
			P -	P +	Impact (%) ⁽¹⁾	P -	P +	Impact (%) ⁽¹⁾	P -	P +	Impact (%) ⁽¹⁾
Élevage laitier	petit	< 40 %	42,7	24,7	42	44,2	25,6	42	47,4	30,0	37
		≥ 40 %	30,8	17,7	43	31,6	18,3	42	34,3	21,1	38
	grand	< 40 %	49	29,9	39	51,6	31,3	35	52,3	33,3	36
		≥ 40 %	40,4	23,8	41	42,4	24,9	40	43,7	27,4	37
Élevage allaitant	petit	< 40 %	37,5	21,6	43	38,7	22,3	42	41,8	26,2	37
		≥ 40 %	32	18,3	43	32,9	19,0	42	35,6	22,1	38
	grand	< 40 %	46	28,1	39	48,2	29,4	35	49,1	31,2	36
		≥ 40 %	20,2	11,9	41	20,8	12,4	39	21,7	13,5	38
Élevage mixte	petit	< 40 %	43	25,5	41	45,1	26,6	40	46,6	29,4	37
		≥ 40 %	37,7	22,0	42	39,3	22,9	41	41,2	25,5	38
	grand	< 40 %	61	39,6	35	63,9	41,6	24	64,2	42,6	34
		≥ 40 %	56,8	36,4	36	59,6	38,2	27	59,9	39,3	34

Légende: P - : estimation de la sensibilité troupeau moyenne (en %) par la méthode des arbres de scénario sans prendre les pratiques des VS (réalisation de l'IDC et déclaration des résultats non-négatifs) en compte ; P + : estimation de la sensibilité troupeau moyenne (en %) par la méthode des arbres de scénario en prenant en compte les pratiques des VS (réalisation de l'IDC et déclaration des résultats non-négatifs).

⁽¹⁾ Proportion de diminution de l'estimation de la sensibilité troupeau induite par la prise en compte des pratiques d'IDC et des habitudes de déclaration des résultats non-négatifs (en %).

3.3.5. Coût total des protocoles prenant en compte les pratiques des VS

Les moyennes et les 5^{ème} et 95^{ème} percentiles des coûts totaux moyens par protocole et par type de troupeau estimés en prenant en compte les pratiques des VS sont présentés dans le tableau 29. Les coûts moyens variaient entre 773 et 22 126 €/troupeau pour le protocole « triage IFN », 1 106 et 13 979 €/troupeau pour le protocole « abattage seul », et 1 982 et 26 092 €/troupeau pour le protocole « abattage-recontrôle IDC ». Les protocoles étaient beaucoup plus coûteux dans les grands troupeaux mixtes que dans les autres types de troupeaux, en raison de la très grande taille de ces troupeaux (plus de 124 animaux dans un département moyen). Le protocole « abattage-recontrôle IDC » était le plus coûteux, quel que soit le type de troupeau, à l'exception des grands troupeaux mixtes à fort taux de rotation. Le protocole « abattage seul » était le moins coûteux pour tous les grands troupeaux et pour les petits troupeaux mixtes.

Tableau 29. Coût total moyen (moyenne [IC_{95%}]) de chaque protocole de dépistage estimé par type de troupeau, pour un troupeau soumis au dépistage périodique (en euros par troupeau), en prenant en compte les pratiques des VS

Type de production	Catégorie de taille	Taux de rotation	Protocole « triage IFN »	Protocole « abattage seul »	Protocole « abattage-recontrôle IDC »
Élevage laitier	petit (< 74)	< 40 %	1 451 [1 430-1 472]	1 963 [1 943-1 983]	3 286 [3 250-3 322]
		≥ 40 %	1 740 [1 719-1 761]	2 844 [2 823-2 865]	4 995 [4 954-5 036]
	grand (≥ 74)	< 40 %	4 299 [4 236-4 362]	4 207 [4 165-4 250]	6 646 [6 581-6 712]
		≥ 40 %	5 906 [5 820-5 992]	5 731 [5 690-5 772]	10 231 [10 154-10 309]
Élevage allaitant	petit (< 66)	< 40 %	773 [763-784]	1 106 [1 096-1 116]	1 982 [1 963-2 001]
		≥ 40 %	1 615 [1 592-1 638]	2 761 [2 737-2 785]	5 588 [5 537-5 638]
	grand (≥ 66)	< 40 %	3 324 [3 266-3 382]	2 854 [2 828-2 880]	5 078 [5 034-5 122]
		≥ 40 %	4 672 [4 592-4 751]	6 689 [6 628-6 750]	13 691 [13 564-13 819]
Élevage mixte	petit (< 124)	< 40 %	3 013 [2 964-3 062]	3 229 [3 196-3 262]	5 491 [5 436-5 545]
		≥ 40 %	4 733 [4 654-4 812]	5 342 [5 301-5 383]	9 793 [9 716-9 870]
	grand (≥ 124)	< 40 %	8 447 [8 312-8 582]	6 414 [6 348-6 480]	10 291 [10 195-10 387]
		≥ 40 %	22 126 [21 732-22 519]	13 979 [13 872-14 086]	26 092 [25 891-26 294]

La prise en compte des pratiques des VS entraînait une diminution des coûts estimés quel que soit le protocole (tableau 30).

Tableau 30. Impact de la prise en compte des pratiques d'IDC et des habitudes de déclaration des résultats non-négatifs sur l'estimation du coût moyen des protocoles

Type de production	Taille	Taux de rotation	Protocole « triage IFN »			Protocole « abattage seul »			Protocole « abattage-recontrôle IDC »		
			P -	P +	Impact (%) ⁽¹⁾	P -	P +	Impact (%) ⁽¹⁾	P -	P +	Impact (%) ⁽¹⁾
Élevage laitier	petit	< 40 %	2 393	1 451	39	2 702	1 963	27	4 480	3 286	27
		≥ 40 %	2 459	1 740	29	3 208	2 844	11	5 591	4 995	11
	grand	< 40 %	6 988	4 299	38	5 905	4 207	29	8 949	6 646	26
		≥ 40 %	9 263	5 906	36	6 948	5 731	18	11 983	10 231	15
Élevage allaitant	petit	< 40 %	1 211	773	36	1 355	1 106	18	2 386	1 982	17
		≥ 40 %	2 351	1 615	31	2 933	2 761	6	5 875	5 588	5
	grand	< 40 %	5 370	3 324	38	3 569	2 854	20	6 021	5 078	16
		≥ 40 %	7 470	4 672	37	6 948	6 689	4	14 051	13 691	3
Élevage mixte	petit	< 40 %	4 950	3 013	39	4 303	3 229	25	7 048	5 491	22
		≥ 40 %	7 560	4 733	37	6 169	5 342	13	11 213	9 793	13
	grand	< 40 %	13 065	8 447	35	8 692	6 414	26	13 179	10 291	22
		≥ 40 %	32 688	22 126	32	15 990	13 979	13	28 619	26 092	9

Légende: P - : estimation du coût total moyen (en €/troupeau) par la méthode des arbres de scénario sans prendre les pratiques des VS (réalisation de l'IDC et déclaration des résultats non-négatifs) en compte ; P + : estimation du coût total moyen (en €/troupeau) par la méthode des arbres de scénario en prenant en compte les pratiques des VS.

⁽¹⁾ Proportion de diminution de l'estimation du coût total moyen induite par la prise en compte des pratiques d'IDC et des habitudes de déclaration des résultats non-négatifs (en %).

3.3.6. Répartitions des coûts entre les éleveurs et l'État

Le détail de la répartition du coût total moyen entre l'État et l'éleveur pour chaque type d'élevage et pour chacun des protocoles est présenté en annexe 20. Le coût moyen pour l'État était compris entre 165 et 2 681 €/troupeau pour le protocole « triage IFN », entre 254 et 3 076 €/troupeau pour le protocole « abattage seul » et entre 430 et 4 248 €/troupeau pour le protocole « abattage-recontrôle IDC ». Le coût moyen pour l'élevage (dépistage périodique + pertes indirectes dues au blocage de l'élevage) était compris entre 549 et 19 775 €/troupeau pour le protocole « triage IFN », entre 775 et 11 206 €/troupeau pour le

protocole « abattage seul » et entre 1 405 et 22 225 €/troupeau pour le protocole « abattage-recontrôle IDC ». À type de production et taille de troupeau fixe, et quel que soit le protocole considéré, l'augmentation du taux de rotation entraînait une diminution des coûts pour l'État et une augmentation importante des coûts pour l'élevage. Cette augmentation du coût pour l'élevage était plus importante pour le protocole « abattage-recontrôle IDC » que pour les deux autres protocoles pour les troupeaux laitiers et allaitants et plus importante pour le protocole « abattage seul » que pour le protocole « triage IFN » quelque soit le type de troupeau.

Le tableau 31 synthétise le pourcentage du coût moyen total qui est pris en charge par l'éleveur en fonction du protocole et du type de troupeau. Il met en évidence que, dans le contexte d'un faible taux de prévalence ($p=0,1\%$), dans la plupart des types de troupeau, c'est l'éleveur qui supporte la majorité des coûts du dépistage. La part du coût total pris en charge par l'éleveur variait entre 58 % et 94 % pour le protocole de « triage IFN », entre 44 % et 94 % pour le protocole « abattage seul » et entre 47 % et 96 % pour le protocole « abattage-recontrôle IDC ».

Tableau 31. Proportion du coût total moyen pris en charge par l'éleveur pour chaque type de troupeau et pour chaque protocole de dépistage (en pourcentage du coût total moyen estimé)

Type de production	Taille	Taux de rotation	Protocole « triage IFN »		Protocole « abattage seul »		Protocole « abattage-recontrôle IDC »	
			% éleveur ⁽¹⁾	Écart taux de rotation ⁽²⁾	% éleveur ⁽¹⁾	Écart taux de rotation ⁽²⁾	% éleveur ⁽¹⁾	Écart taux de rotation ⁽²⁾
Élevage laitier	petit	< 40 %	59	27	49	33	49	36
		≥ 40 %	86		82		84	
	grand	< 40 %	58	22	44	27	47	27
		≥ 40 %	81		71		74	
Élevage allaitant	petit	< 40 %	71	19	70	21	71	21
		≥ 40 %	90		91		92	
	grand	< 40 %	75	19	67	28	71	25
		≥ 40 %	94		94		96	
Élevage mixte	petit	< 40 %	65	19	55	25	58	25
		≥ 40 %	85		79		83	
	grand	< 40 %	68	21	52	28	59	26
		≥ 40 %	89		80		85	

⁽¹⁾ Pourcentage du coût total pris en charge par l'éleveur

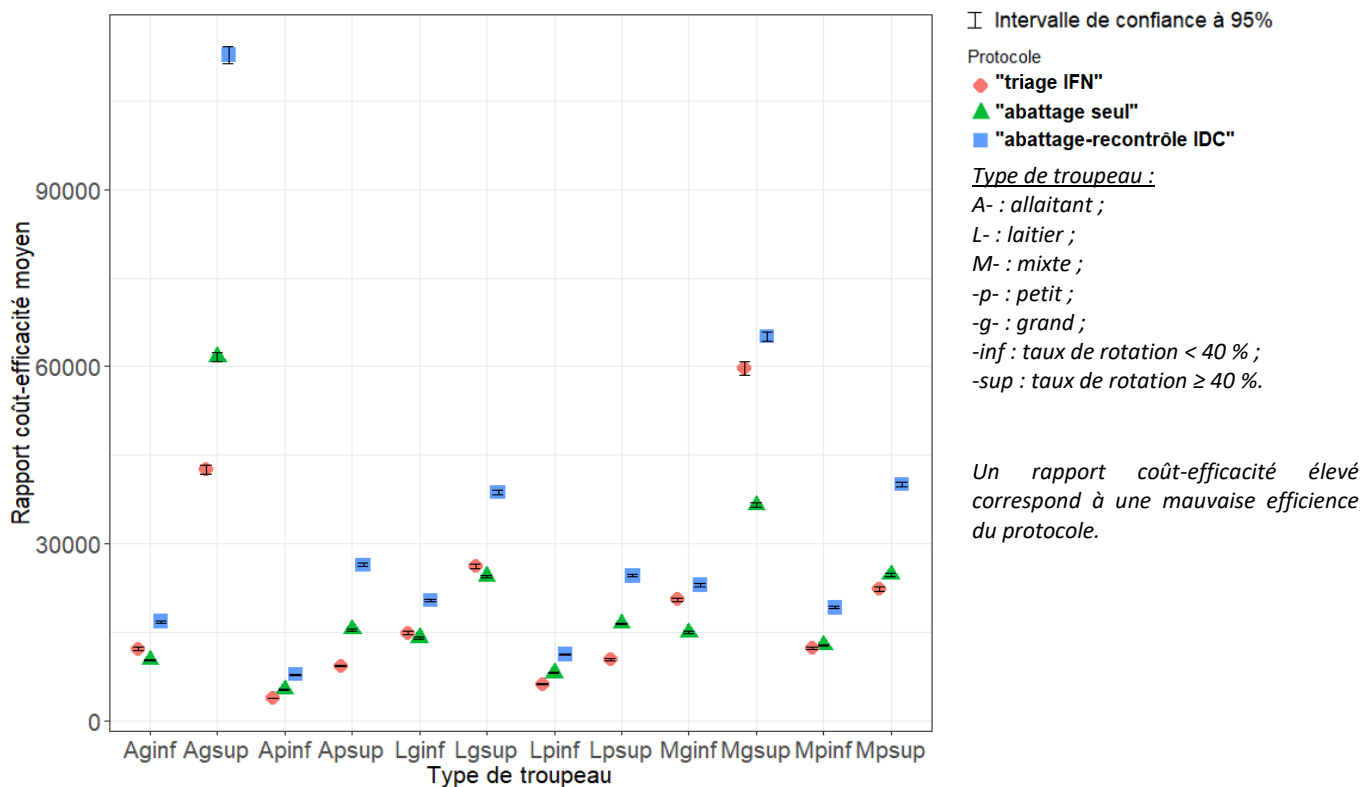
⁽²⁾ Différence de pourcentage de coût total pris en charge par l'éleveur entre les troupeaux à taux de rotation élevé et ceux à taux de rotation faible, à taille et type de production constante

3.3.7. Rapport coût-efficacité

La figure 21 illustre, par type de troupeau, le rapport coût-efficacité moyen estimé pour chaque protocole en prenant en compte les pratiques des VS. Quel que soit le type de troupeau, le protocole « abattage-recontrôle IDC » n'était jamais le plus efficace. Le protocole « abattage seul » était le plus coût-efficace pour les grands troupeaux allaitants à faible taux de rotation et pour les grands troupeaux laitiers et mixtes. Le protocole « triage IFN » était le plus efficace pour les petits troupeaux et pour les grands troupeaux allaitants à fort taux de rotation. Toutes les différences observées étaient significatives.

La prise en compte des pratiques des VS faisait varier le classement des protocoles en fonction de leur coût-efficacité pour les élevages mixtes et les grands élevages allaitants avec un fort taux de rotation, en intervertissant les protocoles « triage IFN » et « abattage seul », en faveur du protocole « abattage seul ». Toutefois, la différence de rapport coût-efficacité entre ces deux protocoles était très faible pour les élevages mixtes.

Figure 21. Rapport coût-efficacité moyen des trois protocoles de dépistage réglementaires en fonction du type d'élevage (10 000 itérations, pratiques des VS prises en compte)

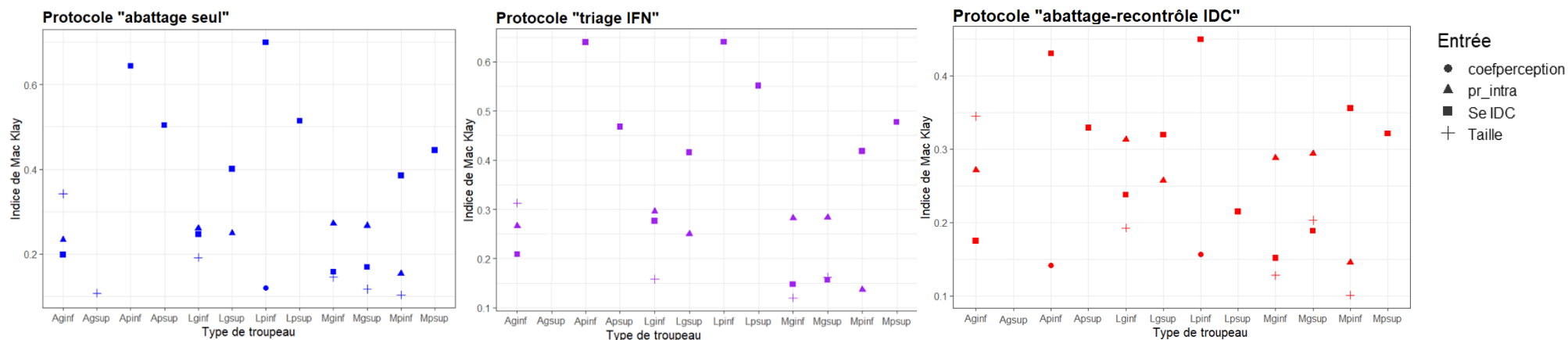


3.3.8. Analyses de sensibilité

Nous avons effectué une analyse de sensibilité pour la variance de la sortie « sensibilité troupeau » des modèles pour chaque protocole par type de troupeau. Les indices de Mc Klay des variables supérieurs à dix pour cent par type de troupeau pour chaque protocole sont présentés sur la figure 22. Quel que soit le protocole, la sensibilité de l'IDC avait la plus grande influence sur les variations de la sensibilité troupeau pour les petits troupeaux et les grands troupeaux laitiers à fort taux de rotation. Dans les autres grands troupeaux, la sensibilité de l'IDC, la prévalence au sein du troupeau et la taille du troupeau étaient les variables les plus influentes.

Les mêmes analyses ont été réalisées pour la variance de la sortie « coût » des modèles et leurs résultats sont présentés sur la figure 23. Pour le protocole « abattage seul », le délai entre l'IDC1 et l'abattage des animaux non-négatifs à cette IDC1 était la variable la plus influente sur la variation du coût total, excepté pour les troupeaux laitiers et mixtes à taux de faible rotation ; la spécificité de l'IDC était également un facteur influent pour cinq des douze types de troupeaux. Pour le protocole « triage IFN », pour 11 des 12 types de troupeau, l'entrée la plus influente sur les coûts totaux était la spécificité de l'IDC. La taille était également un facteur influent pour les petits troupeaux laitiers et allaitants et les grand élevages allaitants à faible taux de rotation. Le délai entre l'IFNy et le recontrôle par IDC des animaux réagissant à l'IDC1 et non positifs à l'IFNy avait également une influence pour certains types de troupeaux. Pour le protocole « abattage-recontrôle IDC », l'intervalle entre l'IDC1 et l'IDC2 était le facteur le plus influent sauf pour les troupeaux laitiers à taux de rotation faible.

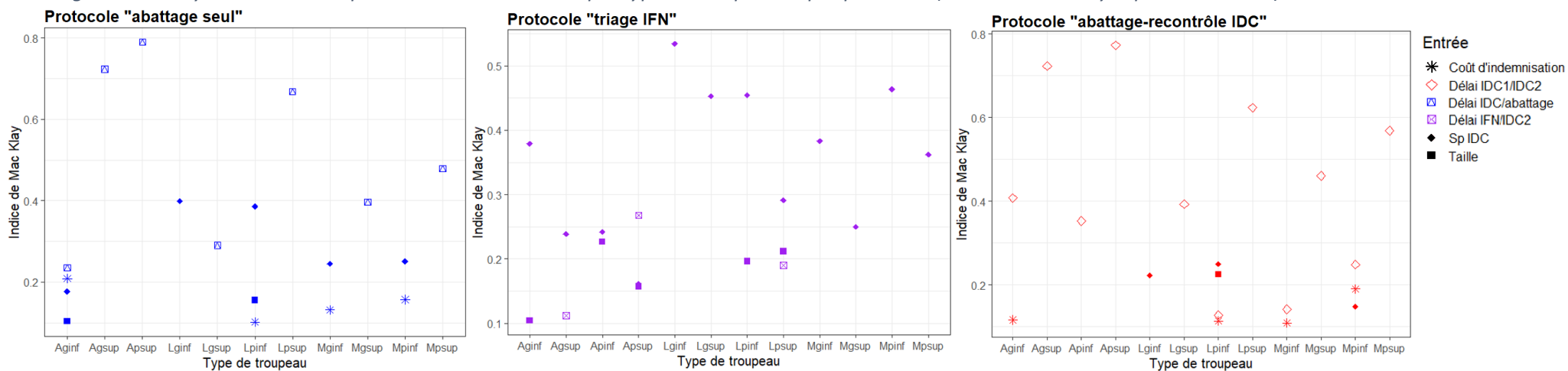
Figure 22. Analyse de sensibilité pour la sortie "sensibilité troupeau" par type de troupeau et par protocole (indices de Mc Klay supérieurs à 10 %)



Type de troupeau : A- : allaitant ; L- : laitier ; M- : mixte ; -p- : petit ; -g- : grand ; -inf : taux de rotation inférieur à 40 % ; -sup : taux de rotation supérieur ou égal à 40 %.

Légende : Taille= taille du troupeau (nombre de bovins), Se IDC=sensibilité de l'IDC, pr_intra=prévalence intra-troupeau, coefperception= coefficient c de l'équation (15) modélisant le score de réalisation de l'IDC en fonction du score de perception.

Figure 23. Analyse de sensibilité pour la sortie "coût total" par type de troupeau et par protocole (indices de Mc Klay supérieurs à 10 %)



Type de troupeau : A- : allaitant ; L- : laitier ; M- : mixte ; -p- : petit ; -g- : grand ; -inf : taux de rotation inférieur à 40 % ; -sup : taux de rotation supérieur ou égal à 40 %.

Légende : Taille= taille du troupeau (nombre de bovins), IDC1= IDC de première intention, IDC2= IDC de recontrôle, pr_intra=prévalence intra-troupeau.

3.4. Discussion

3.4.1. Méthode utilisée

3.4.1.1. Méthode d'évaluation par arbre de scénario

Les intérêts et limites de la modélisation par arbre de scénario ont déjà été discutés dans le chapitre précédent. Rappelons toutefois que cette approche ne prend pas en compte la dimension temporelle. Ainsi, nous avons estimé la sensibilité troupeau et le coût total moyen sur une année. Ce pas de temps a été choisi car la TB est une maladie chronique et car les campagnes de dépistage sont réalisées chaque année dans le cadre de la surveillance programmée. Cette dimension temporelle est importante à garder à l'esprit et à prendre en compte lors de l'interprétation des résultats de sensibilité. En effet, dans les zones à risque, les campagnes de dépistage se succèdent annuellement, augmentant ainsi la probabilité de détecter les élevages infectés.

3.4.1.2. Construction et paramétrage des arbres de scénario

La seule différence par rapport au chapitre précédent est l'ajout des nœuds correspondant à la prise en compte des pratiques des VS.

La méthode développée pour intégrer les pratiques d'acteurs clés de la surveillance (ici les VS) présente l'avantage de combiner des données provenant de sources très diverses, y compris des données de terrain qualitatives recueillies par une démarche d'enquête sociologique. Le revers de cet avantage réside dans le temps et les ressources nécessaires pour la mettre en œuvre. Les arbres de scénario sont habituellement longs à élaborer car il faut recueillir beaucoup d'informations pour paramétrer au mieux toutes les branches de l'arbre. Cette nouvelle méthode allonge encore la durée nécessaire à son application, en ajoutant des enquêtes et des analyses. En effet, l'enquête qualitative nécessite une somme de travail et de ressources importante car elle implique de se rendre sur le terrain pour rencontrer un grand nombre d'acteurs (suffisamment pour atteindre la saturation), de retranscrire tous les entretiens effectués et d'en analyser le contenu. De plus, l'enquête en ligne nécessite du temps et des compétences interdisciplinaires pour être correctement élaborée, testée et administrée. Enfin, l'analyse des résultats de cette enquête quantitative peut également être fastidieuse.

L'étude qualitative menée dans le cadre de ce travail n'a été réalisée que dans certains départements, choisis pour être représentatifs de la variabilité de tous les départements français vis-à-vis de la prévalence de la TB, de son historique et du rythme de dépistage. Néanmoins, dans chaque département, la combinaison des types de production existants et les interactions entre acteurs sont particulières : certaines difficultés ou spécificités locales liées à un contexte départemental particulier ont donc pu être négligées dans notre étude. Toutefois, l'objectif de l'intégration des données sur les pratiques des VS était d'évaluer globalement l'impact de celles-ci sur l'efficacité de la surveillance ; et les départements sélectionnés étaient représentatifs de la diversité des départements français selon les indicateurs de contexte globaux (prévalence et contexte de la TB et rythme de dépistage). L'enquête qualitative a donc probablement permis d'avoir une bonne idée des pratiques prédominantes et des facteurs influents au niveau national.

Toutes les enquêtes par entretiens semi-directifs induisent des biais plus ou moins importants, causés par l'interaction entre l'enquêteur et l'enquêté. Si ce biais ne peut pas être complètement évité, il peut être minimisé en adoptant un comportement approprié lors de l'entretien et par la pratique de l'entretien qui permet de gagner en expérience. Dans notre cas, l'un des risques était que l'enquêteur soit perçu comme un « inspecteur » chargé de signaler toute pratique déviante aux autorités. La présentation soignée de l'objectif de l'étude et du rôle de l'enquêteur semble avoir permis d'éviter ou au moins de minimiser ce biais, car toutes les personnes interrogées semblaient avoir parlé librement

et avoir exposé toutes leurs pratiques (même lorsqu'elles n'étaient pas conformes à la réglementation).

L'enquête quantitative est essentielle pour collecter des données permettant d'identifier les facteurs ayant une influence significative sur les pratiques et pour estimer la probabilité d'occurrence de chaque branche des arbres de scénario. Les biais de l'enquête quantitative que nous avons utilisée (y compris le biais de sélection) ont été décrits par Crozet *et al.* (2019). Un commentaire peut toutefois être ajouté sur le score élaboré pour estimer quantitativement la « qualité » de la perception du VS du système de surveillance de la TB. En effet, la « *perception du VS* » relève davantage de la lecture sociologique que d'une variable physique réelle (contrairement au score de réalisation de l'IDC, par exemple). En sociologie, l'analyse d'un concept à l'aide de plusieurs variables mesurables est habituelle, mais elle nécessite de développer un outil de mesure selon le paradigme de Churchill (Churchill, 1979), résumé dans le tableau 1 (cf. paragraphe I.1.5.2.2). Notre approche de la mesure de la perception était moins subtile et pourrait être améliorée en suivant cette approche, pour s'assurer de sa fiabilité et du fait qu'il « *mesure ce qu'il est censé mesurer* » (Bollen, 1989). Néanmoins, il pourrait s'agir d'un projet de recherche complet pour des sociologues (ce qui souligne à nouveau l'intérêt d'une collaboration multidisciplinaire dans cette méthode).

La modélisation de l'impact des pratiques d'IDC sur la sensibilité et la spécificité du test a été très simplifiée, en partie parce qu'il n'existait pas de données détaillées à ce sujet, mais aussi parce que les arbres de scénario étant eux-mêmes des simplifications de la réalité, nous n'aurions pas été en mesure de prendre en compte toute la diversité des combinaisons de pratiques possibles. Cette simplification a pu conduire à amplifier les effets négatifs de la modification des pratiques de l'IDC et donc à sous-estimer la sensibilité troupeau des protocoles évalués. En effet, un VS pouvait par exemple obtenir un score de réalisation de l'IDC de 1 car la personne qui lit le résultat du test est parfois un autre VS, entraînant dans le modèle une diminution de 25 % de la sensibilité de l'IDC pour un VS dont la lecture du test est parfois conforme aux recommandations. De plus, le pourcentage de diminution de la sensibilité est théorique et peut avoir été surévalué. Néanmoins, la direction de l'influence des adaptations des pratiques de l'IDC sur les caractéristiques du test que nous avons modélisée est logique et doit refléter globalement la réalité. Il semble donc légitime de considérer que la direction de l'influence estimée des pratiques des VS sur la sensibilité troupeau des protocoles réglementaire reflète la réalité. Cependant, il convient de garder à l'esprit la limite résultant de cette simplification lors de l'interprétation des estimations de l'influence des pratiques sur la sensibilité troupeau des protocoles. Nous avons estimé qu'avec un impact linéaire réduit de 50 %, l'impact des pratiques de l'IDC sur la sensibilité des protocoles resterait important, entraînant une diminution de la sensibilité des protocoles de 16 % à 21 % par rapport aux sensibilités estimées sans tenir compte des pratiques du VS. Pour préciser cette modélisation de l'impact des adaptations de pratiques sur les caractéristiques de l'IDC, des études supplémentaires sont nécessaires. Elles nécessiteraient de disposer des résultats de tous les tests de dépistage effectués, ainsi que du statut infectieux des animaux correspondants, obtenu par des analyses de laboratoire. Malheureusement, les données françaises centralisées sur les résultats de l'IDC et sur les investigations dans les élevages suspects ne sont pas encore suffisamment détaillées et, leur collecte à l'échelle locale aurait été très longue, nous n'avons donc pas pu réaliser cet approfondissement au cours de ce travail.

La tendance générale de l'influence des pratiques d'IDC modifiées sur les caractéristiques du test ont été faciles à estimer grâce à des études déjà existantes (Doherty *et al.*, 1995 ; Humblet *et al.*, 2011 ; Bénét *et al.*, 2012 ; Casal *et al.*, 2015). La modélisation de l'influence des pratiques sur la sensibilité et la spécificité d'un test pourrait néanmoins s'avérer plus difficile pour d'autres tests de dépistage auxquels on souhaiterait appliquer cette méthode.

3.4.2. Résultats obtenus

3.4.2.1. Sensibilité troupeau

Comme précisé dans le chapitre précédent, les sensibilités troupeau estimées ne doivent pas être interprétées seules pour évaluer la sensibilité globale du système de surveillance français. L'objectif de cette estimation de la sensibilité troupeau était de comparer entre eux les protocoles réglementaires de dépistage périodique. De plus, les estimations présentées ont été réalisées à l'échelle de l'élevage, à partir des données d'un seul département. Néanmoins, nous avons collecté ces données (la proportion de chaque type de troupeau, la prévalence de la TB, la proportion d'animaux testés, etc.) pour chaque département de France métropolitaine. Ainsi, nos modèles peuvent être utilisés pour estimer le coût et la sensibilité troupeau des protocoles de dépistage périodique en élevage dans n'importe quel département. Cela a notamment permis, dans un second temps, d'estimer l'efficacité et le coût de la surveillance *ante mortem* de la TB en France à l'échelle départementale comme présenté dans le chapitre 7.

Les biais (notamment le biais de sélection) de l'enquête quantitative (Crozet *et al.*, 2019), empêchent d'en inférer les résultats à l'ensemble du territoire français et par conséquent de réaliser des estimations de sensibilité troupeau générales. Cependant, l'intégration des données de cette enquête quantitative dans les arbres de scénario a permis de mettre en évidence l'impact des pratiques modifiées de l'IDC et des habitudes de déclaration des résultats non-négatifs sur l'efficacité des protocoles de dépistage périodique.

Dans les résultats quantitatifs de l'étude, il n'y avait pas de différence de pratiques entre les départements. Suite à l'enquête qualitative, nous avons pourtant supposé qu'il existait une certaine hétérogénéité entre ces zones, en particulier en fonction de la prévalence de la TB et du contexte historique. L'enquête quantitative n'a pas confirmé cette hypothèse, sans doute du fait d'un manque de puissance statistique car un nombre limité de VS ont répondu au questionnaire (115/1 084 VS contactés). Les paramètres utilisés dans les arbres de scénario ont donc été définis d'après les données agrégées de tous les départements ciblés par l'enquête. Nous avons ainsi obtenu une estimation de l'efficacité des protocoles dans le contexte sociologique global des départements étudiés. Toutefois, il est admis que certains départements ont de meilleures pratiques d'IDC (communication personnelle, F. Chevalier), notamment en raison de formations fréquentes par exemple. Dans ces zones particulières, les pratiques d'IDC et de déclaration ont la réputation d'être plus proches des recommandations, ce qui semble être confirmé par l'actuelle diminution de la prévalence de la TB dans ces zones (Delavenne *et al.*, 2019). Il est donc très probable que, dans ces départements, la sensibilité troupeau des protocoles soit supérieure à nos estimations et plus proche de celles présentées dans le chapitre 2.

L'élaboration d'un score représentant les pratiques de l'IDC était nécessaire pour permettre l'analyse des résultats, mais elle simplifiait la complexité des pratiques de l'IDC. En effet, pour chaque étape de la réalisation du test qui n'était pas réalisée selon la réglementation, le score de réalisation de l'IDC augmentait. Cependant, certaines étapes sont plus importantes que d'autres et certaines adaptations de pratiques peuvent ne pas conduire à une diminution de la sensibilité de l'IDC. Nous avons essayé de modéliser cette complexité, en attribuant un poids à chaque étape du test et en "tolérant" certaines adaptations de pratiques qui n'avaient probablement aucune conséquence sur les caractéristiques de l'IDC (par exemple, en cas de sortie de tuberculine objectivée immédiatement après l'injection, réinjection ajustée à l'échappement au lieu de réinjecter une dose complète). Néanmoins, cette simplification est imparfaite. Par conséquent, un score de réalisation de l'IDC élevé n'est pas strictement équivalent à une altération de l'efficacité des tests sur le terrain.

Dans leur étude, Crozet *et al.* (2019) ont également mis en évidence l'influence de la perception de la surveillance et du contrôle de la TB par les VS sur le score de réalisation de l'IDC. Toutefois, deux variables influentes supplémentaires (avec un effet plus faible que la perception des VS) y avaient

également été décelées : le nombre d'années de pratique en rurale et la proportion d'IDC effectuées au cours de l'année précédente. Toutefois, dans nos analyses des résultats de l'enquête quantitative, l'influence de ces deux variables n'était pas significative. Cela n'est pas surprenant car nous n'avons analysé que les réponses des VS pratiquant l'IDC dans un contexte de dépistage périodique (les VS pratiquant l'IDC uniquement sur des bovins à vendre ou au cours d'investigation de liens épidémiologiques ont été exclus), car elles étaient les seules à s'appliquer au cadre de notre travail. Nous avons donc réalisé nos analyses sur moins de données (115 réponses au lieu de 210), ce qui a probablement provoqué un manque de puissance statistique.

Les VS ayant une meilleure perception du programme de surveillance et de contrôle de la TB avaient un meilleur score de réalisation de l'IDC. Une meilleure compréhension de l'importance du contrôle de la TB pourrait probablement expliquer cela. En effet, il serait légitime de penser que les VS convaincus que le contrôle de la TB est utile et nécessaire suivent plus attentivement les recommandations réglementaires, en dépit des contraintes, que les VS pensant le contrôle inutile (Brennan *et al.*, 2016).

Dans nos modèles, nous avons fait l'hypothèse que les VS déclaraient systématiquement les résultats non-négatifs obtenus aux IDC de recontrôle (IDC2), car elles sont réalisées dans des troupeaux suspects suivis par les autorités et dans lesquels le VS a déjà déclaré des résultats non-négatifs à l'IDC1 (sinon l'élevage n'aurait pas été suspecté). Il est donc probable que la surveillance étroite de ces troupeaux par les autorités sanitaires incite les VS à suivre davantage la réglementation en matière de déclaration. Néanmoins, cette hypothèse était peut-être un peu optimiste et a pu induire une légère surestimation du nombre de déclarations et donc de la sensibilité troupeau. D'autre part, nous avons modélisé les caractéristiques de l'IDC2 de la même façon que pour l'IDC1. Pourtant, il est possible que certains VS ne respectant pas la réglementation pour l'IDC1 tiennent compte du contexte (élevage suspect) pour l'IDC2 et s'appliquent ainsi à suivre les pratiques réglementaires pour l'IDC2. Dans ce cas, la sensibilité troupeau des protocoles « abattage-recontrôle IDC » et « triage IFN » a pu être légèrement sous-estimée.

Tous les VS admettant ne pas déclarer systématiquement les résultats non-négatifs ont été pris en compte dans le modèle comme s'ils ne déclaraient jamais les résultats non-négatifs à l'IDC1. Cela peut être vrai pour certains d'entre eux, mais cette hypothèse risque de manquer de nuance pour d'autres qui font probablement leur propre analyse de risque pour décider s'ils déclarent. Ce comportement est préjudiciable à l'efficacité du protocole, mais il ne l'est pas autant qu'une non-déclaration systématique. Par conséquent, nous avons certainement surestimé les non-déclarations et, ainsi légèrement sous-estimé la sensibilité troupeau réelle des protocoles. Néanmoins, ce comportement est incompatible avec un contrôle efficace de la TB, c'est pourquoi nous avons choisi de le modéliser ainsi. De plus, même si les VS semblaient avoir répondu honnêtement aux enquêtes, ce type d'approche reposant sur des déclarations relatives aux pratiques réglementaires a pu conduire à une sous-déclaration de certaines adaptations de pratiques.

Les estimations de la sensibilité troupeau étaient donc imprécises, mais ont permis de mettre en évidence l'influence importante des pratiques des acteurs sur la sensibilité troupeau des protocoles étudiés. En effet, l'intégration des pratiques d'IDC et de déclaration des résultats non-négatifs dans les arbres de scénario a considérablement diminué la valeur estimée de la sensibilité troupeau pour chaque protocole. Ces résultats soulignent l'importance, pour la surveillance de la TB, de l'optimisation des pratiques d'IDC et des déclarations de résultats non-négatifs, et l'intérêt de la prise en compte des données relatives à ces pratiques dans les évaluations des systèmes de surveillance. Il est intéressant de noter que les adaptations des protocoles effectuées par les VS pour réduire les coûts pour les éleveurs produisent, à court terme, l'effet recherché (tableau 30), avec malheureusement comme dommage collatéral la diminution de la sensibilité troupeau du protocole. Ces adaptations des pratiques ont un effet négatif sur l'efficacité du protocole et sur le coût à long terme du système de

surveillance, car elles ralentissent et peut-être même empêchent l'éradication de la TB en France. D'après les résultats de l'enquête qualitative, ces adaptations de pratiques sont une réaction à la réglementation restrictive de l'UE et existent donc probablement dans d'autres pays européens. En effet, la réglementation impose une interdiction de vente pour tous les troupeaux suspects qui peut être pénalisante pour l'éleveur et la valeur prédictive positive de l'IDC1 est faible. En combinant ces deux constatations, certains VS effectuent leur propre analyse de risque et peuvent ainsi décider de négliger certains résultats non-négatifs. Ainsi, il semble probable que l'adaptation des pratiques puisse être différente en fonction de l'historique de la TB dans la région, de sa prévalence et du type de production du troupeau dans lequel le VS intervient (car une interdiction de vente des animaux peut avoir des conséquences économiques plus ou moins importante selon qu'il s'agisse par exemple d'un troupeau allaitant ou d'un élevage laitier).

Nos estimations de sensibilité troupeau semblent suggérer que le dépistage périodique par IDC n'est pas très efficace pour détecter les troupeaux infectés. Cependant elles ne reflètent que l'efficacité d'une seule campagne de dépistage, alors que de telles campagnes sont régulièrement effectuées en France (jusqu'à une par an), ce qui améliore la probabilité de détecter un troupeau infecté. Par exemple, pour un protocole avec une sensibilité troupeau très faible de 20 %, si un troupeau infecté est testé chaque année pendant cinq ans, la probabilité de détecter l'infection est alors de 67 %. De plus, le dépistage périodique n'est pas le seul composant de surveillance en place en France et son association avec le dépistage des animaux vendus, la surveillance en abattoir et les enquêtes dans les exploitations en lien avec les foyers vise à garantir une détection plus efficace des troupeaux infectés.

Les résultats de l'analyse de sensibilité pour la sortie « sensibilité troupeau » des modèles étaient similaires entre les protocoles. La sensibilité des IDC et la prévalence au sein du troupeau étaient les principales variables d'influence. Cela n'est pas surprenant, compte tenu de l'incertitude existante sur ces paramètres d'entrée et de leur rôle majeur dans la détection de l'infection. Les variables d'entrée liées aux pratiques des VS ne constituaient pas les variables les plus influentes sur la variabilité des résultats, mais y participaient d'environ 1 % à 10 %, en fonction du type de troupeau considéré. L'amélioration des pratiques IDC, du pourcentage de déclaration et / ou de la perception du contrôle de la TB par les VS pourrait donc avoir un impact sur la sensibilité troupeau des protocoles.

Le pourcentage de diminution de la sensibilité troupeau estimée, causée par la prise en compte des pratiques d'IDC et de déclaration des résultats non-négatifs, était plus faible pour le protocole « abattage-recontrôle IDC » (quel que soit le type de troupeau), et, quel que soit le protocole, dans les grands troupeaux et dans les troupeaux mixtes. Pour le protocole « abattage-recontrôle IDC », cette différence peut s'expliquer par l'utilisation de l'IDC deux fois en parallèle, ce qui entraîne un plus faible pourcentage de diminution par rapport à un protocole dans lequel le test n'est utilisé qu'une seule fois ou en série (comme le montre un exemple en annexe 21). Pour les grands troupeaux et les troupeaux mixtes, cette différence est due au plus grand nombre d'animaux infectés testés (annexe 21). En effet, comme ils sont constitués d'un grand nombre d'animaux et ont, dans les arbres de scénario, la même prévalence au sein du troupeau ; un plus grand nombre d'animaux infectés sont donc testés dans ce type de troupeau d'après nos modèles, ce qui réduit le pourcentage de diminution de la sensibilité troupeau par rapport aux autres types de troupeaux. L'importance de cette différence entre les types de troupeau décroît lorsque l'impact modélisé des pratiques d'IDC sur ses caractéristiques diminue. De plus, le nombre important d'itérations a affiné mécaniquement les intervalles de confiance et si l'on diminue le nombre d'itérations, la plupart des différences constatées ne sont plus significatives.

3.4.2.2. Coûts

En prenant en compte des pratiques d'IDC modifiées, la part du coût total pris en charge par les éleveurs était plus élevée que sans leur prise en compte (bien que le coût en euros/troupeau soit plus faible) et cela quel que soit le type de production et le protocole (tableau 18 et tableau 31). Cela peut avoir plusieurs explications. Tout d'abord, si les résultats non-négatifs ne sont pas déclarés par les VS,

l'élevage n'est pas considéré comme suspect et aucune investigation complémentaire (à la charge de l'État) n'est réalisée. La totalité du coût du protocole (qui se résume alors au dépistage par IDC dans l'élevage) est alors à la charge de l'éleveur. De plus, la diminution de la sensibilité du protocole et l'augmentation de spécificité causées par des pratiques d'IDC modifiées a le même effet, en diminuant la probabilité pour un élevage d'être suspecté et donc la probabilité pour l'État d'avoir des coûts d'investigation à prendre en charge.

L'analyse de sensibilité pour la sortie « coûts » a mis en évidence l'effet du délai entre l'IDC1 et le recontrôle et entre l'IDC1 et l'abattage, respectivement pour les protocoles « abattage-recontrôle IDC » et « abattage seul ». Ce résultat s'explique par la grande variabilité de ces délais (tableau 15) couplée à leur forte probabilité d'occurrence (pour ces protocoles, en cas de suspicion, 100 % des élevages sont soumis à ces délais). Il souligne ainsi la nécessité de réduire autant que possible les intervalles de temps entre les étapes des protocoles afin de réduire les pertes indirectes dues aux interdictions de vente. Cependant, cette réduction des délais est, dans certains cas, limitée par la réglementation.

Dans le protocole « triage IFN », la spécificité de l'IDC était l'une des variables les plus influentes sur les variations des coûts, en raison de l'incertitude importante sur sa valeur d'entrée et de son influence sur le nombre d'animaux abattus.

3.4.2.3. Rapport coût-efficacité

Les résultats de l'analyse coût-efficacité sont semblables à ceux obtenus sans prise en compte des pratiques des VS. Ils suggèrent une meilleure rentabilité des protocoles « abattage seul » et « triage IFN », par rapport au protocole « abattage-recontrôle IDC » qui est le protocole recommandé par l'Union Européenne et plaideraient donc en faveur de l'autorisation de ces protocoles. Néanmoins, le protocole « abattage-recontrôle IDC » restait le plus efficace.

La prise en compte des pratiques des VS a fait varier le classement des protocoles en fonction de leur rapport coût-efficacité, uniquement pour les élevages mixtes et les grands élevages allaitants avec un fort taux de rotation, en rendant le protocole « abattage seul » plus efficace que le protocole « triage IFN ». Toutefois, la différence de rapport coût-efficacité entre ces deux protocoles est très faible pour les élevages mixtes. Ainsi, pour ces types de troupeau en particulier, le protocole le plus efficace peut varier en fonction des pratiques des VS et donc du département.

3.4.3. Propositions opérationnelles

Cette étude a mis en évidence l'impact des pratiques d'IDC sur la sensibilité de la surveillance, elles-mêmes influencées par la perception du contrôle de la TB qu'ont les VS. Il semble donc que l'amélioration de la perception des VS à l'égard du programme de surveillance et de contrôle de la TB pourrait améliorer l'efficacité du système de surveillance. Cela concorde avec les résultats de plusieurs études qualitatives (Pfeiffer, 2006 ; Brennan *et al.*, 2016). L'amélioration de cette perception pourrait être obtenue de plusieurs manières. Tout d'abord, les enquêtes qualitatives et quantitatives ont mis en évidence l'importance d'une contention efficace des animaux. Celle-ci pourrait être améliorée par (1) une aide technique et financière aux éleveurs pour la mise en place de dispositifs de contention adaptés tels que des cornadis (Crozet *et al.*, 2019) et (2) des formations à l'intention des éleveurs pour les sensibiliser à la nécessité et à l'importance de prévoir plusieurs personnes pour aider à la contention lors des opérations de dépistage. Ensuite, la perception des VS à propos du programme de surveillance et de contrôle de la TB pourrait être améliorée par des formations afin de les convaincre de l'utilité du contrôle et de les rassurer sur sa faisabilité. Il est probable que le besoin de formation soit hétérogène en fonction, par exemple, de la prévalence de la TB dans le département (Crozet *et al.*, 2019). Cette hétérogénéité doit être prise en compte pour cibler les départements dans lesquels les VS et les éleveurs ont le plus besoin de ces formations.

Enfin, l'amélioration de la perception des VS et des éleveurs à l'égard du programme de surveillance et de contrôle de la TB pourrait passer par une amélioration des protocoles de dépistage périodique utilisés. Par exemple, le recontrôle par IDC pourrait être remplacé par un test IFNy, ce qui pourrait peut-être améliorer le rapport coût-efficacité des protocoles et réduire les délais, comme l'intervalle entre la première et la deuxième IDC, pendant lesquels les éleveurs ne peuvent vendre aucun animal. De tels protocoles, dans la mesure où ils seraient moins pénalisants pour les éleveurs, pourraient influencer de manière positive la perception des VS du contrôle de la TB et ainsi réduire leur réticence à déclarer les résultats non-négatifs, ce qui améliorerait l'efficacité globale du dispositif de surveillance. Néanmoins, pour adopter ces protocoles, une modification des protocoles réglementaires européens serait nécessaire.

Bilan

Une méthode pour intégrer les données de pratiques terrain dans la modélisation d'arbres de scénario pour l'estimation de l'efficacité d'une composante de surveillance a été développée. Elle repose sur : 1) des entretiens semi-directifs avec les acteurs pour identifier la variabilité des pratiques, les facteurs potentiellement influents sur celles-ci et pour comprendre les contextes d'action locaux ; 2) une enquête quantitative, fondée sur des questions à choix multiples, permettant de quantifier les diverses pratiques préalablement identifiées et d'identifier des facteurs significativement influents par des analyses de régression multivariées ; 3) l'addition à l'arbre de scénario de nœuds correspondants aux pratiques et à leurs facteurs d'influence, ainsi que le paramétrage des nouvelles branches, d'après les données de l'enquête quantitative.

Nous avons appliqué cette méthode à l'évaluation de l'impact des pratiques d'IDC sur le dépistage périodique de la TB, et avons ainsi montré que leur prise en compte conduisait à une diminution de la sensibilité troupeau estimée pour tous les protocoles, ainsi qu'une diminution de leur coût total.

D'autres études doivent encore être réalisées pour améliorer cette modélisation de l'influence des pratiques de réalisation d'IDC sur sa sensibilité et son coût. Cependant, notre étude a souligné l'importance de l'implication des VS et la nécessité de les convaincre de l'utilité du contrôle de la TB et de la nécessité de réaliser les tests conformément aux recommandations réglementaires. Les autorités sanitaires pourraient ainsi fournir un soutien technique et financier pour les aider à pratiquer l'IDC, en particulier pour la contention des animaux, et mettre en place des formations plus régulières, afin de les convaincre de l'utilité du contrôle de la TB.

Chapitre 4. Évaluation coût-efficacité de protocoles alternatifs

Ce travail est en cours de valorisation :

V. Guétin-Poirier, J. Rivière, G. Crozet et B. Dufour. 2020. Assessment of the cost-effectiveness of alternative bovine tuberculosis surveillance protocols in French cattle farms using the mixed interferon gamma test. Res. Vet. Sc. (soumis)

4.1. Objectifs spécifiques

Plusieurs limites en relation avec la réalisation de l'IDC ont été mises en évidence dans les chapitres précédents. D'abord, celle-ci est techniquement difficile et elle nécessite une bonne contention des bovins ainsi que deux interventions (injection puis lecture). Elle est donc coûteuse en temps et en énergie pour les VS. De plus, lorsqu'elle est utilisée comme test de recontrôle (protocole « abattage-recontrôle IDC » ou « triage IFN »), un délai de six semaines est nécessaire pour éviter les anergies dues à la première IDC. Ce délai augmente considérablement la durée des protocoles d'investigation, les rendant moins acceptables à la fois pour les VS (qui hésitent donc pour certains à déclarer des résultats non-négatifs) et pour l'éleveur qui doit subir un blocage plus long et donc des pertes économiques indirectes plus élevées. Au contraire, le test IFN γ est plus facile et plus rapide à mettre en œuvre pour le VS, car il ne nécessite qu'une prise de sang et peut être fait directement après la première IDC. De plus, s'il est réalisé par stimulation des lymphocytes par les antigènes spécifiques antigen MIX (Peptide Cocktail Prionics, ThermoFisher) (test IFNMIX), sa sensibilité est supérieure à celle d'une IDC de recontrôle sans trop diminuer la spécificité (Praud *et al.*, 2019). Le remplacement de l'IDC de recontrôle par l'IFNMIX pourrait ainsi permettre de faciliter la réalisation des tests et de diminuer le temps de blocage des élevages, ce qui améliorerait probablement l'acceptabilité des protocoles et donc les déclarations des résultats non-négatifs. L'objectif de cette partie de notre travail était donc d'évaluer le potentiel intérêt, en terme de rapport coût-efficacité, de protocoles alternatifs au protocole « abattage-recontrôle IDC » et « triage IFN », dans lesquels l'IDC de recontrôle serait remplacée par un test IFNMIX.

4.2. Matériel et méthode

Pour cela, nous avons utilisé la méthode des arbres de scénario. Les arbres précédemment construits (chapitre 3) ont été repris à l'identique en remplaçant, pour le protocole « abattage-recontrôle IDC » l'IDC de recontrôle par un test IFNMIX (protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX ») (annexe 22), et, pour le protocole « triage IFN », l'ensemble des tests de recontrôle (IFN γ et IDC) par un test IFNMIX (protocole alternatif « confirmation IFNMIX ») (annexe 23). Les caractéristiques du test IFNMIX utilisées dans les arbres ont été modélisées d'après les résultats de Praud *et al.* (2019), par des lois de distribution normales $N(0,83 ; 0,06)$ et $N(0,861 ; 0,0081)$ respectivement pour la sensibilité et pour la spécificité. De la même manière que dans les chapitres précédents, ces nouveaux arbres de scénario ont permis d'évaluer pour chacun des protocoles alternatifs la sensibilité troupeau moyenne, les coûts totaux et ainsi le rapport coût-efficacité pour chaque type de troupeau. Nous avons ensuite comparé ces résultats à l'évaluation coût-efficacité des protocoles réglementaires.

4.3. Résultats

4.3.1. Sensibilité troupeau des protocoles alternatifs

Les moyennes ainsi que les 5^{ème} et 95^{ème} percentiles de la sortie « sensibilité du troupeau » sont présentés dans le tableau 32. La sensibilité troupeau moyenne du protocole « confirmation IFNMIX »

variait de 10,31 % à 35,55% selon le type de troupeau. Pour le protocole « abattage-recontrôle IFNMIX », la sensibilité troupeau moyenne estimée variait de 17,63 % à 48,21 %.

Parmi les protocoles réglementaires et alternatifs, le protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX » présentait la meilleure sensibilité troupeau moyenne pour tous les types de troupeaux. Le protocole alternatif « confirmation IFNMIX » avait la sensibilité troupeau la plus faible indépendamment du type de troupeau.

Pour tous les protocoles, la sensibilité troupeau moyenne était plus faible dans les troupeaux à fort taux de rotation, indépendamment du type de production et de la taille du troupeau, en raison du nombre moins élevé d'animaux âgés de plus de 24 mois (et donc soumis aux protocoles de surveillance) par rapport aux autres troupeaux. Les différences de sensibilité troupeau moyenne entre les types de troupeaux pour un même protocole étaient toutes significatives.

Tableau 32. Estimation de sensibilité troupeau (en %) (moyenne [IC_{95%}]) pour chaque protocole alternatif par type de troupeau

Type de production	Taille	Taux de rotation	Protocole « confirmation IFNMIX » ⁽¹⁾	Protocole « abattage-recontrôle IFNMIX » ⁽¹⁾
Élevage laitier	petit	< 40 %	21,24 [21,14-21,34]	36,96 [36,85-37,07]
		≥ 40 %	15,16 [15,09-15,23]	25,28 [25,19-25,38]
	grand	< 40 %	26,30 [26,13-26,47]	40,03 [39,9-40,17]
		≥ 40 %	20,72 [20,61-20,84]	34,31 [34,21-34,41]
Élevage allaitant	petit	< 40 %	18,54 [18,46-18,63]	32,14 [32,03-32,24]
		≥ 40 %	15,74 [15,67-15,81]	26,67 [26,58-26,77]
	grand	< 40 %	24,71 [24,54-24,89]	37,78 [37,62-37,93]
		≥ 40 %	10,31 [10,23-10,4]	17,63 [17,52-17,74]
Élevage mixte	petit	< 40 %	22,17 [22,04-22,3]	36,38 [36,27-36,49]
		≥ 40 %	19,05 [18,94-19,15]	32,31 [32,21-32,42]
	grand	< 40 %	35,55 [35,33-35,77]	48,21 [48,04-48,38]
		≥ 40 %	32,54 [32,33-32,75]	45,28 [45,12-45,45]

⁽¹⁾ Protocoles alternatifs théoriques modélisés dans lesquels l'IDC2 est remplacée par un test IFNMIX

Les protocoles alternatifs ont été comparés à leurs équivalents réglementaires (tableau 33). La substitution de l'IDC2 par un test IFNMIX dans le protocole « abattage-recontrôle IDC » induisait une augmentation de la sensibilité troupeau moyenne entre 4,13 % et 9,95 %, en fonction du type de troupeau. Pour le protocole « triage IFN », ce remplacement a induit une diminution de la sensibilité troupeau moyenne entre 1,62 % et 4,03 % selon le type de troupeau.

Tableau 33. Différence (en %), par type de troupeau, entre les sensibilités troupeau moyennes estimées pour les protocoles alternatifs et les sensibilités troupeau moyennes estimées pour les protocoles réglementaires correspondants

Type de production	Taille	Taux de rotation	Différences de sensibilité entre les protocoles réglementaires et leur alternative	
			« Abattage-recontrôle » ⁽¹⁾	« Triage IFN » ⁽²⁾
Élevage laitier	petit	< 40 %	6,95	-3,43
		≥ 40 %	4,18	-2,50
	grand	< 40 %	6,75	-3,56
		≥ 40 %	6,93	-3,09
Élevage allaitant	petit	< 40 %	5,89	-3,01
		≥ 40 %	4,62	-2,59
	grand	< 40 %	6,56	-3,35
		≥ 40 %	4,13	-1,62
Élevage mixte	petit	< 40 %	6,96	-3,31
		≥ 40 %	6,81	-2,97
	grand	< 40 %	5,59	-4,03
		≥ 40 %	5,94	-3,88

⁽¹⁾ Sensibilité troupeau moyenne du protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX » - Sensibilité troupeau moyenne du protocole réglementaire « abattage-recontrôle IDC »

⁽²⁾ Sensibilité troupeau moyenne du protocole alternatif « confirmation IFNMIX » - Sensibilité troupeau moyenne du protocole réglementaire « triage IFN »

4.3.2. Coût total des protocoles alternatifs

Le tableau 34 présente la moyenne et les 5^{ème} et 95^{ème} percentiles de la distribution des coûts totaux estimés pour chaque protocole par type de troupeau. Les deux protocoles alternatifs étaient beaucoup plus coûteux dans les grands troupeaux mixtes que dans les autres types de troupeaux.

Le coût moyen des protocoles alternatifs variait entre 4 001 et 52 461 euros par troupeau pour le protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX », et entre 292 et 5 226 euros par troupeau pour le protocole alternatif « confirmation IFNMIX ». Le protocole « abattage-recontrôle IFNMIX » était le plus coûteux de tous les protocoles (réglementaires et alternatifs), quel que soit le type de troupeau, et le protocole « confirmation IFNMIX » le moins coûteux (de 8 à 38 fois moins coûteux que le protocole réglementaire « triage IFN » selon les types de troupeau).

Tableau 34. Coût total (moyenne [IC_{95%}]) des protocoles alternatifs par type de troupeau (en €/troupeau)

Type de production	Taille	Taux de rotation	Protocole « confirmation IFNMIX »	Protocole « abattage-recontrôle IFNMIX »
Élevage laitier	petit	< 40 %	516 [510-522]	6 319 [6 261-6 377]
		≥ 40 %	388 [383-394]	8 279 [8 195-8 363]
	grand	< 40 %	1 377 [1 362-1 392]	15 565 [15 452-15 677]
		≥ 40 %	1 515 [1 495-1 536]	19 975 [19 824-20 127]
Élevage allaitant	petit	< 40 %	292 [289-296]	4 001 [3 962-4 040]
		≥ 40 %	295 [290-300]	10 267 [10 149-10 385]
	grand	< 40 %	1 055 [1 042-1 069]	12 247 [12 149-12 345]
		≥ 40 %	714 [699-728]	27 677 [27 363-27 991]
Élevage mixte	petit	< 40 %	954 [942-966]	11 795 [11 695-11 895]
		≥ 40 %	1 153 [1 134-1 171]	18 836 [18 668-19 003]
	grand	< 40 %	2 464 [2 433-2 496]	25 282 [25 096-25 468]
		≥ 40 %	5 226 [5 134-5 319]	52 461 [52 020-52 903]

4.3.3. Répartition des coûts entre l'État et l'éleveur

Comme pour les coûts des protocoles réglementaires, ces coûts sont à répartir entre l'éleveur (qui prend en charge les coûts de l'IDC1 et les coûts indirects induits par le blocage de l'élevage) et l'État (qui prend en charge les coûts de l'IFNMIX, des éventuels abattages diagnostiques et indemniserait l'éleveur pour les animaux abattus). La répartition des coûts estimés par les arbres de scénario est présentée dans le tableau 35. Pour le protocole alternatif « confirmation IFNMIX », les coûts seraient majoritairement pris en charge par l'éleveur (

tableau 36) mais seraient peu élevés (tableau 35). Les coûts du protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX » seraient supportés en plus grande partie par l'élevage dans la plupart des types de troupeau, sauf dans les troupeaux à faible taux de rotation (

tableau 36) pour lequel ils seraient beaucoup plus élevés (tableau 35). Quel que soit le protocole, on constate qu'une plus grande part des coûts serait prise en charge par l'éleveur dans les troupeaux à taux de rotation élevé. La répartition des coûts serait semblable à celle estimée pour les protocoles réglementaires, avec toutefois une très légère diminution du pourcentage pris en charge par l'éleveur dans les protocoles alternatifs (tableau 31 et

tableau 36).

Tableau 35. Coûts moyens pour l'État et pour l'élevage des protocoles alternatifs par type de troupeau, pour un troupeau soumis au dépistage (en € / troupeau), en prenant en compte les pratiques des VS

Type de production	Taille	Taux de rotation	Protocole « confirmation IFNMIX »		Protocole « abattage-recontrôle IFNMIX »	
			Coût État [IC _{95%}]	Coût élevage [IC _{95%}]	Coût État [IC _{95%}]	Coût élevage [IC _{95%}]
Élevage laitier	petit	< 40 %	214 [210-217]	302 [300-305]	3 651 [3 601-3 701]	2 667 [2 640-2 694]
		≥ 40 %	107 [105-109]	281 [277-285]	1 473 [1 446-1 500]	6 806 [6 730-6 882]
	grand	< 40 %	501 [493-509]	876 [867-885]	1 0383 [1 0284-1 0482]	5 181 [5 131-5 232]
		≥ 40 %	356 [350-361]	1 160 [1 143-1 176]	6 868 [6 803-6 933]	13 107 [12 971-13 244]
Élevage allaitant	petit	< 40 %	103 [101-105]	189 [188-191]	1 479 [1 456-1 503]	2 522 [2 493-2 550]
		≥ 40 %	79 [78-81]	216 [212-220]	1 037 [1 017-1 056]	9 230 [9 116-9 345]
	grand	< 40 %	298 [293-303]	757 [748-767]	5 695 [5 630-5760]	6 552 [6 480-6 624]
		≥ 40 %	120 [118-122]	593 [580-606]	1 809 [1 783-1836]	25 868 [25 555-26 180]
Élevage mixte	petit	< 40 %	328 [323-334]	625 [618-633]	6 317 [6 235-6399]	5 478 [5 422-5 534]
		≥ 40 %	249 [245-254]	903 [888-919]	4 512 [4 446-4578]	14 324 [14 171-14 477]
	grand	< 40 %	693 [681-705]	1 771 [1 747-1 794]	15 018 [14 865-15 171]	10 264 [10 160-10 369]
		≥ 40 %	624 [613-635]	4 602 [4 516-4 689]	13 352 [13 212-13 491]	39 110 [38 688-39 531]

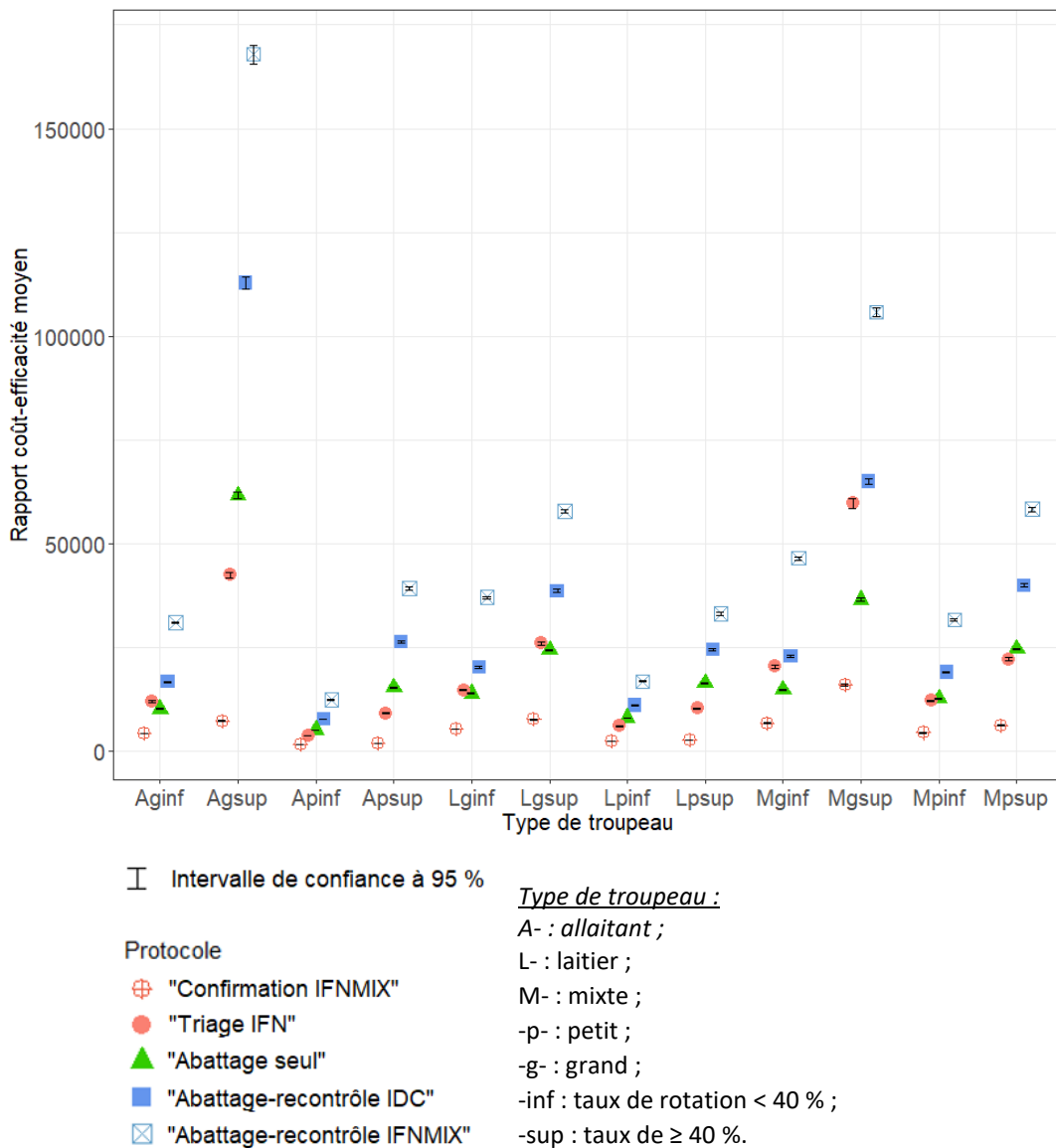
Tableau 36. Proportion (en %) du coût total moyen pris en charge par l'éleveur pour chaque protocole alternatif (en pourcentage du coût total moyen estimé)

Type de production	Taille	Taux de rotation	Protocole « confirmation IFNMIX »	Protocole « abattage-recontrôle IFNMIX »
			Pourcentage du coût total pris en charge par l'éleveur	Pourcentage du coût total pris en charge par l'éleveur
Élevage laitier	petit	< 40 %	59	42
		≥ 40 %	72	82
	grand	< 40 %	64	33
		≥ 40 %	77	66
Élevage allaitant	petit	< 40 %	65	63
		≥ 40 %	73	90
	grand	< 40 %	72	53
		≥ 40 %	83	93
Élevage mixte	petit	< 40 %	66	46
		≥ 40 %	78	76
	grand	< 40 %	72	41
		≥ 40 %	88	75

4.3.4. Rapport coût-efficacité des protocoles alternatifs

La figure 24 illustre le rapport coût-efficacité moyen estimé pour chacun des protocoles (réglementaires et alternatifs), par type de troupeau. Un indice coût-efficacité élevé est associé à une faible efficacité du protocole. Toutes les différences observées entre protocoles pour un type de troupeau donné étaient significatives. Quel que soit le type de troupeau, le protocole alternatif « confirmation IFNMIX » était le protocole le plus efficace, alors que le protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX » était le moins efficace, malgré sa meilleure sensibilité troupeau.

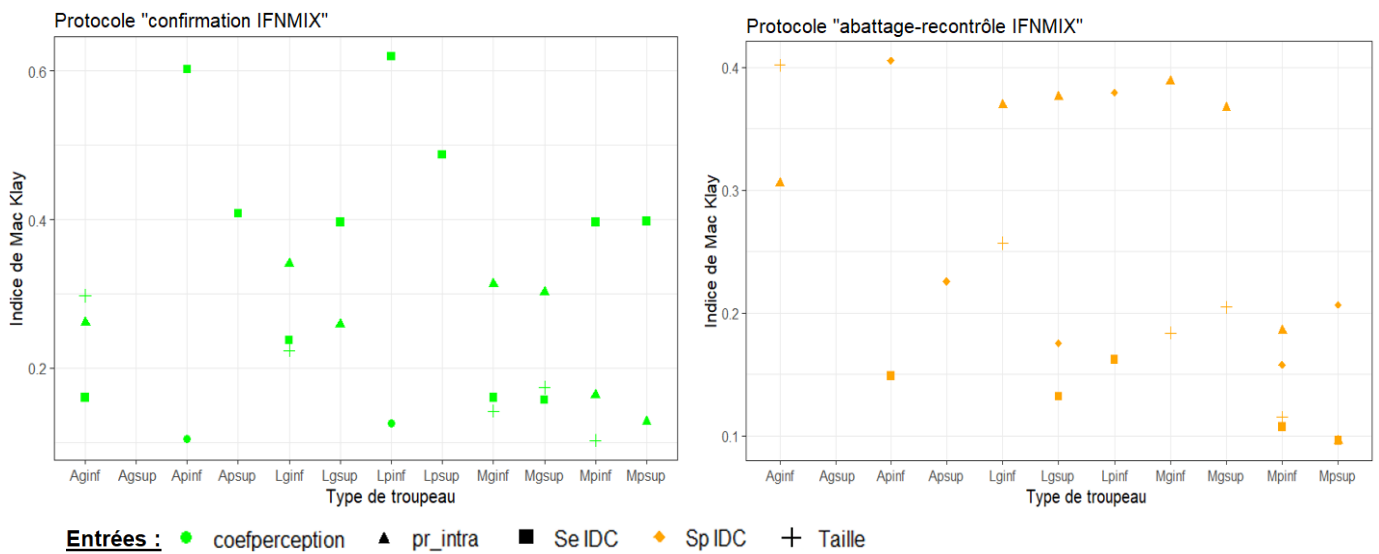
Figure 24. Rapport coût-efficacité moyen des trois protocoles réglementaires de dépistage de la TB et des deux protocoles alternatifs par type de troupeau



4.3.5. Analyse de sensibilité

Pour l'analyse de sensibilité de la sortie « sensibilité troupeau », les indices de Mc Klay des variables d'entrée supérieurs à 10 % sont représentés sur la figure 25, par type de troupeau et pour chaque protocole. Comme pour tous les protocoles réglementaires, pour le protocole alternatif « confirmation IFNMIX », la sensibilité de l'IDC était la variable avec la plus grande influence sur la variance (variabilité et incertitude) de la sensibilité troupeau pour les petits troupeaux et les grands troupeaux laitiers à fort taux de rotation. Dans les autres grands troupeaux, la sensibilité de l'IDC, la prévalence intra-troupeau et la taille du troupeau partageaient l'influence sur cette variation. Pour le protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX », les variables d'entrée ayant le plus d'influence étaient la taille du troupeau pour les grands troupeaux allaitants, la spécificité de l'IDC pour les petits troupeaux allaitants et laitiers et les petits troupeaux mixtes à fort taux de rotation, et la prévalence intra-troupeaux pour les grands troupeaux mixtes, les petits troupeaux mixtes à faible taux de rotation et les grands troupeaux laitiers.

Figure 25. Analyse de sensibilité pour la sortie "sensibilité troupeau" par type de troupeau et par protocole alternatif (indices de McKay supérieurs à 10 %)



Type de troupeau : A- : allaitant ; L- : laitier ; M- : mixte ; -p- : petit ; -g- : grand ; -inf : taux de rotation < 40 % ; -sup : taux de rotation ≥40 %

Légende : Taille= taille du troupeau (nombre de bovins), Se IDC=sensibilité de l'IDC, pr_intra=prévalence intra-troupeau, Sp IDC=spécificité de l'IDC.

Nous avons effectué la même analyse de sensibilité pour les sorties de coûts totaux (annexe 24). Pour le protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX », l'intervalle entre les résultats de l'IDC1 et l'abattage des animaux réagissants était la variable d'entrée la plus influente, sauf pour les petits élevages laitiers à faible taux de rotation pour lesquels la taille était la plus influente.

Pour le protocole alternatif « confirmation IFNMIX », la spécificité de l'IDC et la taille du troupeau étaient les principales variables d'entrée responsables de la variation des coûts totaux.

4.4. Discussion

La méthodologie utilisée pour modéliser les protocoles de surveillance a déjà été discutée dans les chapitres précédents. Nous discuterons donc ci-dessous des résultats obtenus.

4.4.1. Estimations obtenues pour les protocoles de dépistage alternatifs

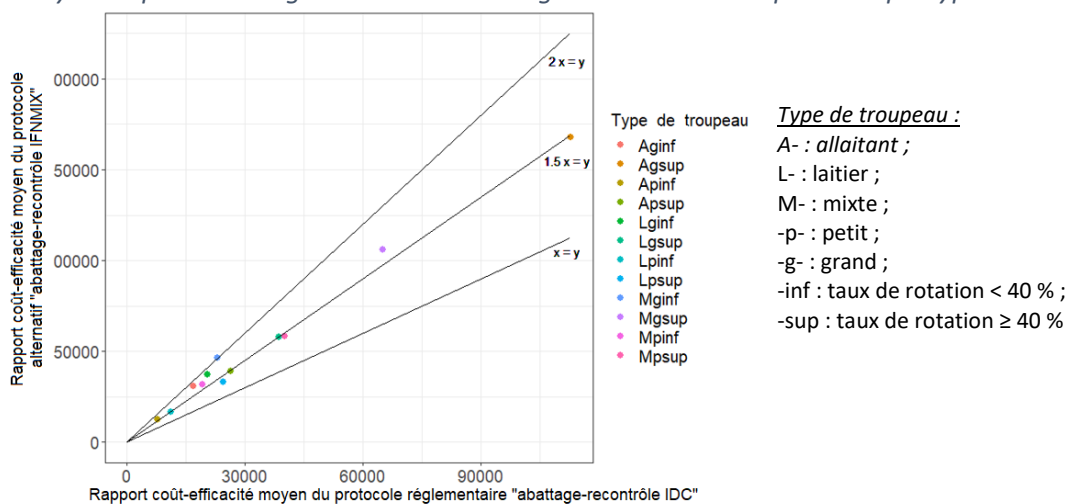
Le remplacement de l'IDC2 par l'IFNMIX induit une augmentation de la sensibilité troupeau moyenne estimée pour le protocole « abattage-recontrôle », ce qui semble logique compte tenu de la sensibilité plus élevée du test IFNMIX comparée à l'IDC2. Cependant, cette substitution n'a pas produit le même effet pour le protocole alternatif « confirmation IFNMIX » pour lequel nous avons observé une diminution de la sensibilité troupeau moyenne estimée. Cette apparente contradiction s'explique simplement : en effet, dans ce protocole, l'IFNMIX a été substitué à l'IDC mais le test IFN γ qui, dans le protocole réglementaire, était effectué avant l'IDC2 a également été enlevé du protocole. Le gain de sensibilité induit par la substitution de l'IDC2 par l'IFNMIX était donc certainement insuffisant pour compenser la perte de sensibilité troupeau causée par la suppression du test IFN γ . Cependant, nous n'avons pas pris en compte l'effet potentiellement bénéfique que pourrait avoir la réduction du délai entre le début et la fin d'une suspicion sur la déclaration des IDC1 non-négatives par les VS. En effet, certains VS hésitent à déclarer les résultats non-négatifs, car ils craignent d'avoir un impact négatif et injustifié (en cas de faux positifs) sur leur client (l'éleveur), en l'empêchant de vendre des animaux pour toute la durée du protocole d'enquête (cf paragraphe 3.4.2.1). Une réduction de la durée des protocoles pourrait donc réduire la réticence des VS à déclarer les résultats non-négatifs. En supposant que la diminution des délais ait réellement cet effet, sa prise en compte dans les estimations de la

sensibilité troupeau pourrait améliorer la sensibilité estimée pour les protocoles alternatifs et rendre ainsi la sensibilité estimée pour le protocole « confirmation IFNMIX » au moins équivalente à celle du protocole réglementaire « triage IFN ».

Le remplacement de l'IDC par le test IFNMIX dans les protocoles pourrait également avoir l'intérêt de garantir la répétabilité et la standardisation de la méthode de dépistage, ce qui est très difficile avec l'IDC en raison des contraintes inhérentes à ce test. Mais son coût élevé (environ dix fois supérieur à l'IDC), la nécessité de stimuler l'échantillon dans un délai de six heures et le nombre limité de laboratoires agréés pour le test IFN γ empêchent le remplacement de l'IDC par l'IFN γ en tant que premier test pour le dépistage annuel des bovins. Néanmoins, il serait envisageable de remplacer l'IDC de recontrôle dans les troupeaux suspects par l'IFNMIX afin de réduire la durée de l'investigation des suspicions. Cette étude a permis de tester l'amélioration potentielle que ce remplacement pourrait apporter à l'efficacité des protocoles. Pour le protocole « abattage-recontrôle IFNMIX », ce remplacement améliorerait la sensibilité troupeau, parallèlement à une augmentation considérable du coût (doublé par rapport au protocole réglementaire « abattage-recontrôle IDC »), faisant de ce protocole alternatif, quel que soit le type de troupeau, le protocole le plus efficace mais le moins efficient. Cette substitution de l'IDC2 par l'IFNMIX ne peut donc pas être systématiquement recommandée. Pour le protocole « confirmation IFNMIX », utiliser l'IFNMIX au lieu de l'IDC2 diminuait d'environ 1 à 4 % la sensibilité troupeau tout en divisant le coût par trois à sept en fonction du type de troupeau, faisant de ce protocole alternatif le protocole le plus efficient, tous protocoles confondus. Ainsi, quel que soit le type de troupeau, il pourrait être envisagé de remplacer le protocole « triage IFN » par le protocole « confirmation IFNMIX » proposé. L'utilisation de ce protocole alternatif réduirait considérablement les coûts, tout en ayant un impact minime sur la sensibilité troupeau.

Compte tenu de la sensibilité troupeau plus élevée du protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX », nous nous sommes interrogés sur la pertinence de l'utiliser dans certaines situations particulières. En supposant que, dans certaines situations, les décideurs soient prêts à investir plus d'argent dans les investigations d'un cas suspect de TB pour gagner en sensibilité troupeau, l'utilisation de ce protocole pourrait-elle être pertinente ? Pour répondre à cette question, nous avons représenté sur la figure 26 les rapports coût-efficacité (RCE) moyens du protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX » en fonction de ceux du protocole réglementaire « abattage-recontrôle IDC » pour chaque type de troupeau. Chaque point représente ainsi un type de troupeau et les lignes permettent de comparer le RCE du protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX » (en ordonnée) à celui du protocole réglementaire « abattage-recontrôle IDC » (en abscisse). Si les points sont sous une ligne considérée, cela signifie que, pour le type de troupeau correspondant, le RCE du protocole alternatif est supérieur au RCE du protocole réglementaire (pour la droite $x = y$), de sorte que pour ce type de troupeau, le protocole alternatif est moins efficient que son homologue réglementaire.

Figure 26. RCE moyen du protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX » en fonction du RCE moyen du protocole réglementaire « abattage-recontrôle IDC » pour chaque type de troupeau



Cette figure confirme que, quel que soit le type de troupeau, le protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX » n'était jamais le plus efficace (en effet, son RCE moyen était toujours supérieur à celui du protocole réglementaire « abattage-recontrôle IDC »). En supposant que les autorités acceptent d'investir deux fois plus pour obtenir une meilleure sensibilité troupeau ($2x = y$), l'utilisation du protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX » pourrait être une option pour tous les types de troupeaux, à l'exception des gros troupeaux mixtes à faible taux de rotation. S'ils sont disposés à investir 1,5 fois plus (droite $1,5x = y$), le protocole alternatif ne pourrait être envisagé que pour les petits troupeaux laitiers à fort taux de rotation et pour les petits troupeaux mixtes à fort taux de rotation. Pour les autres types de troupeaux, le coût de ce protocole alternatif resterait trop élevé par rapport au gain de sensibilité troupeau permis.

Les analyses de sensibilité de la sortie « sensibilité troupeau » fournissaient les mêmes résultats pour les protocoles alternatifs que pour les protocoles réglementaires, les variables d'entrée « sensibilité de l'IDC », « prévalence intra-troupeau » et « taille du troupeau » étant les plus influentes sur la variation de la sensibilité troupeau. Toutefois, pour les protocoles alternatifs, la sensibilité de l'IDC avait un peu moins d'influence, certainement car ce test n'était utilisé qu'une seule fois.

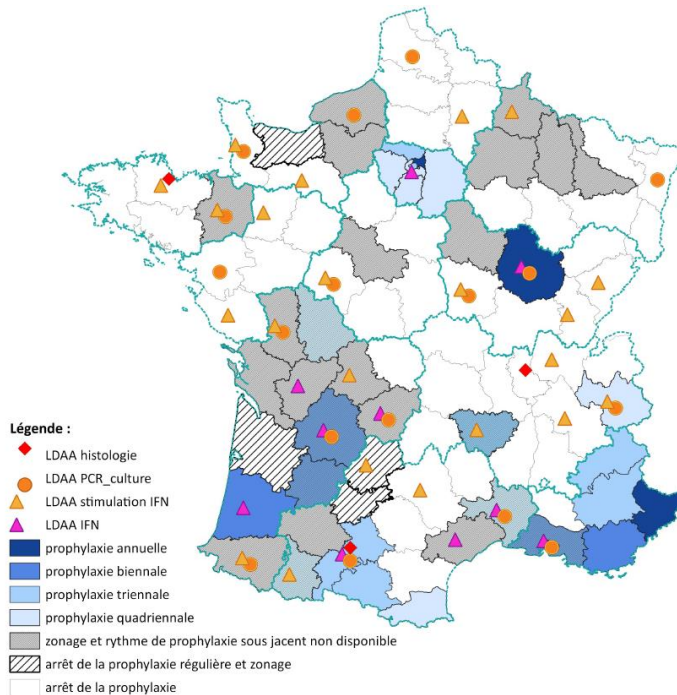
Dans les analyses de sensibilité de la sortie « coût total » pour le protocole « abattage-recontrôle IDC », la variable d'entrée la plus influente était le délai entre l'IDC1 et l'IDC2. Dans le protocole alternatif correspondant, ce délai n'existant plus, les variables les plus influentes sur la variabilité des coûts et sur l'incertitude étaient les délais entre les tests non-négatifs (IDC1 ou IFNMIX) et l'abattage de l'animal correspondant.

4.4.2. Recommandations opérationnelles

Nous avons mis en évidence dans le chapitre précédent l'influence de la perception des VS à la fois sur leurs pratiques d'IDC et leur déclaration des résultats non-négatifs aux autorités sanitaires. Par ailleurs, un changement des protocoles pour obtenir une meilleure efficacité, une diminution du nombre d'IDC à exécuter (IDC2 remplacée par un test IFNMIX) et une réduction des délais, pourraient influencer de manière positive la perception des VS sur le contrôle de la TB, car les protocoles seraient moins pénalisants pour les éleveurs et plus faciles à mettre en œuvre pour les VS. Par conséquent, les protocoles alternatifs proposés semblaient être pertinents pour améliorer l'efficacité du système de surveillance *via* une amélioration de la volonté des VS à suivre les pratiques prescrites (Pfeiffer, 2006) et, pour le protocole « abattage recontrôle IFNMIX », une meilleure sensibilité intrinsèque au protocole. Les résultats de l'évaluation coût-efficacité de ces protocoles alternatifs et leur comparaison avec les protocoles réglementaires ont toutefois montré que l'intérêt de leur utilisation était certainement plus modéré, notamment en raison de leur coût plus important.

Sous réserve de l'existence d'un nombre suffisant de laboratoires autorisés à effectuer la stimulation des échantillons (pour les tests IFNMIX) et la présence d'un de ces laboratoires à proximité (ce qui n'est pas le cas dans tous les départements (figure 27) ; le protocole « triage IFN » pourrait être remplacé par le protocole alternatif « confirmation IFNMIX » proposé. Cela réduirait considérablement les coûts (selon le type de troupeau, de -65 % à -81 % pour les éleveurs et de -52 % à -74 % pour l'État) et la durée des investigations, ce qui aurait certainement un impact positif sur l'opinion des éleveurs et sur la perception des VS, et assurerait ainsi peut-être une meilleure acceptabilité du protocole. En effet, Crozet *et al.* (2019) ont estimé qu'environ un quart des VS pensent qu'il est nécessaire d'arrêter le blocage des troupeaux pendant six semaines en cas d'obtention de résultats non-négatifs au test de dépistage. De plus, la principale préoccupation d'un quart des VS ayant répondu à l'enquête de Crozet *et al.* (2019), lorsqu'ils constatent un résultat non-négatif à l'IDC1, était qu'il pouvait s'agir d'un résultat faussement positif induisant un blocage de l'élevage pendant plusieurs semaines.

Figure 27. Localisation des LDA pour l'histologie, la PCR et la culture ou le test IFN γ et rythme de dépistage des départements en 2016



Cependant, le remplacement de l'IDC2 par l'IFNMIX n'est pas une bonne option pour le protocole « abattage-recontrôle ». En effet, l'utilisation d'IFNMIX sur un troupeau entier coûterait trop cher, à moins que dans certains cas particuliers, les autorités ne soient disposées à investir davantage pour améliorer la sensibilité troupeau du protocole. Si et quand le coût des tests IFN γ diminuera, et quand suffisamment de laboratoires seront agréés pour la réalisation de ces tests, un protocole alternatif « abattage-recontrôle IFNMIX » pourrait être envisagé pour remplacer le protocole « abattage-recontrôle IDC » actuel, ce qui permettrait un gain important de sensibilité troupeau.

Les analyses coût-efficacité suggèrent donc que le remplacement de l'IDC2 par un test IFNMIX ne pourrait être intéressant que dans le cadre du protocole « confirmation IFNMIX ». Toutefois, ce remplacement n'est actuellement pas autorisé par l'Union européenne.

Bilan

Ce travail a permis de mettre en évidence l'intérêt potentiel de l'utilisation des tests IFNMIX dans les protocoles de dépistage périodique de la TB en élevage. Le remplacement de l'IDC2 par l'IFNMIX réduirait le nombre d'IDC à réaliser ainsi que les délais d'investigation. Cette substitution était potentiellement pertinente pour le protocole « triage IFN ». Par conséquent, les autorités sanitaires pourraient envisager de remplacer le protocole « triage IFN » par le protocole alternatif « confirmation IFNMIX », sous réserve d'une autorisation de l'Union Européenne.

Toutefois, compte tenu du coût élevé des tests IFN γ à l'heure actuelle, cette méthode alternative ne serait pas rentable pour le protocole « abattage-recontrôle », malgré le gain important de sensibilité.

Chapitre 5. Évaluation coût-efficacité de l’investigation des liens épidémiologiques

Ce travail a donné lieu à une publication :

V. Guétin-Poirier, J. Rivière and B. Dufour. 2020. Cost-effectiveness of two different protocols for animal tracing investigations of bovine tuberculosis outbreaks in France. *Prev. Vet. Med.* **175**, 104868.

5.1. Objectif spécifique de l’évaluation

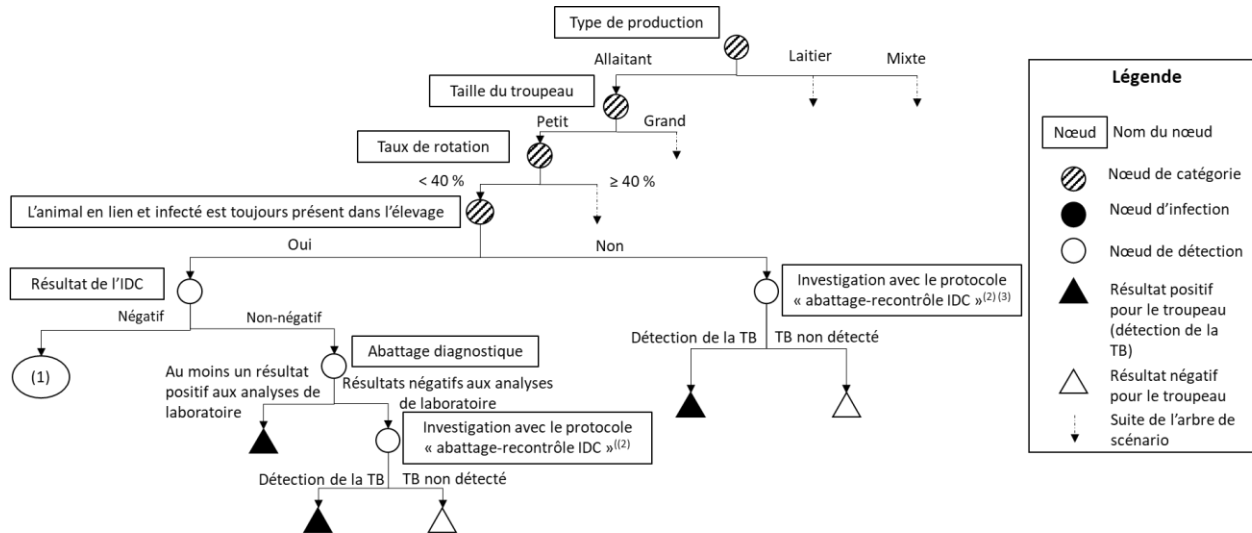
Pour surveiller une maladie animale contagieuse telle que la TB, il est important, suite à la détection d’un foyer, de réaliser des enquêtes épidémiologiques amont – pour rechercher l’origine de l’infection de l’élevage- et aval – afin de vérifier si le foyer n’a pas contaminé un autre élevage (Radunz, 2006). Ainsi, en 2016, 21 % des foyers de TB français ont été détectés grâce à ces enquêtes (données SIGAL). C’est pourquoi, afin de poursuivre nos travaux d’évaluation de la surveillance *ante mortem* de la TB, nous avons évalué pour la première fois les deux protocoles existants d’investigation des liens aval *via* la modélisation par arbre de scénario en utilisant une approche stochastique. Comme l’investigation dans les élevages en lien amont et en lien de voisinage suit le même protocole que le protocole de dépistage périodique en élevage « abattage-recontrôle IDC » (Note de service DGAL/SDSPA/2016-1001), nous ne l’avons pas modélisé une seconde fois. Les investigations des liens aval ont pour but de détecter tout troupeau contaminé par le foyer *via* l’achat d’un animal (appelé ci-après « animal en lien »). Tous les élevages qui ont acheté un animal à l’élevage foyer dans les trois à neuf années précédentes, en fonction de la date estimée de l’infection du foyer (le plus souvent cinq ans, communication personnelle F. Chevalier), sont identifiés comme des troupeaux susceptibles d’être contaminés (également appelés troupeaux en lien), dans lesquels des investigations complémentaires doivent être entreprises (Notes de service DGAL/SDSPA/2016-1001 et DGAL/SDSPA/2017-333). Pour cela, il existe deux protocoles différents. Malgré l’importance des enquêtes épidémiologiques dans le système de surveillance de la TB, aucune évaluation quantitative de ces protocoles n’a jamais été effectuée en France. L’objectif de ce chapitre était donc d’évaluer leur coût et leur sensibilité troupeau (capacité du protocole à détecter au moins un animal infecté dans un élevage infecté), afin de comparer ces deux protocoles en termes de coût-efficacité, et ainsi de fournir des données quantitatives utiles pour le choix d’un protocole.

5.2. Matériel et méthode

Dans ces protocoles, la présence ou l’absence de l’animal en lien dans l’élevage susceptible conditionne les étapes de l’investigation. Si l’animal n’est plus présent dans l’élevage (s’il a été vendu ou abattu par exemple), l’investigation suit les mêmes étapes que le protocole « abattage-recontrôle IDC » du dépistage périodique en élevage. Si l’animal est toujours présent, il est testé par IDC. Un résultat non-négatif à cette IDC entraîne l’abattage de l’animal et la mise en place d’un protocole semblable au protocole « abattage-recontrôle » dans le reste du troupeau. Les deux protocoles d’investigation diffèrent sur la démarche suivie quand l’animal en lien obtient un résultat négatif à l’IDC : dans le **protocole « identifier et abattre »**, l’animal est soumis à un abattage diagnostique, le résultat de cet abattage (détection ou non de la TB) détermine le statut de l’élevage (foyer ou requalification) ; dans le **protocole « identifier et tester »**, le résultat négatif à l’IDC effectuée sur l’animal en lien suffit à la requalification de l’élevage, mais celui-ci est classé « à risque » pendant trois ans, ce qui signifie qu’il sera soumis à un dépistage annuel par le protocole « abattage-recontrôle IDC ». Pour évaluer ces deux protocoles d’investigation des liens aval, nous avons utilisé la modélisation par arbre de scénario et adopté une approche stochastique qui permet de modéliser l’incertitude et/ou la

variabilité des variables d’entrée du modèle et donc d’avoir une estimation plus réaliste. Nous avons développé un arbre de scénario pour chaque protocole à l’échelle du troupeau, en conservant les nœuds de catégorie d’infection et de détection sélectionnés dans le chapitre 2 (figure 28).

Figure 28. Arbre de scénario utilisé pour modéliser l’investigation dans un élevage en lien aval avec un foyer de TB



(1) La fin de la branche dépend du protocole :

- pour le protocole « identifier et tester » : il s'agit d'un résultat négatif pour le troupeau (△)
- pour le protocole « identifier et abattre » : l'investigation continue avec un abattage diagnostique comme suit =

(2) Le protocole « abattage-recontrôle IDC » correspond au protocole de dépistage périodique en élevage, décrit et évalué dans le chapitre 2 de la partie 2.

(3) Seul un échantillon des animaux de plus de 24 mois est testé par IDC.

De la même façon que dans les chapitres précédents, nous présentons l'évaluation obtenue avec les données départementales du Cantal (15), bien que nos modèles nous permettent de réaliser les mêmes estimations pour chaque département de France métropolitaine. Les probabilités d'occurrence des branches issues des nœuds de catégorie « type de production », « taille du troupeau » et « taux de rotation » ont donc été modélisées de la même manière que décrit dans le paragraphe II.2.2.1.

La probabilité que l'animal en lien soit toujours présent dans l'élevage en lien a été modélisée d'après les données françaises. Nous avons échantillonné dans la BDNI 2 000 troupeaux de chaque type de production. Pour chacun de ces troupeaux, nous avons estimé leur taille au premier janvier 2016, leur taux de rotation à la même date, le nombre d'animaux vendus à un autre élevage dans un délai de cinq ans (du 01/01/2011 au 01/01/2016) et parmi ces animaux, combien d'entre eux étaient encore en vie au 01/01/2016. Ces données ont permis de connaître, pour chaque type de troupeau, la probabilité qu'un animal vendu dans les cinq ans soit encore en vie dans un autre élevage. Les lois de distribution normales utilisées pour modéliser, pour chaque type de troupeau, la probabilité que les animaux en lien soient absents de cet élevage en lien ont été ajustées pour correspondre à ces données (tableau 37).

L'abattage diagnostique a été modélisé de la même façon que décrit dans le paragraphe II.2.2.1.6.

Nous avons supposé que les recommandations de pratiques de l'IDC étaient respectées et que les résultats non-négatifs de l'IDC étaient tous déclarés aux autorités sanitaires par les VS : les caractéristiques de l'IDC ont donc été modélisées comme présenté dans le paragraphe II.2.2.1.5.1.

Tableau 37. Paramètres des lois normales utilisées pour modéliser la probabilité que l’animal en lien soit absent ou présent dans l’élevage au moment de l’investigation du lien épidémiologique

Type de production	Taille ⁽¹⁾	Taux de rotation	Animal en lien absent de l’élevage		Animal en lien présent dans l’élevage	Taille échantillon
			Moyenne	Écart type		
Élevage laitier	petit	< 40 %	0,534	0,179	Complémentaire à 1	1 054
		≥ 40 %	0,461	0,214	Complémentaire à 1	67
	grand	< 40 %	0,501	0,178	Complémentaire à 1	858
		≥ 40 %	0,473	0,216	Complémentaire à 1	21
Élevage allaitant	petit	< 40 %	0,539	0,179	Complémentaire à 1	875
		≥ 40 %	0,471	0,211	Complémentaire à 1	57
	grand	< 40 %	0,502	0,178	Complémentaire à 1	1 037
		≥ 40 %	0,450	0,219	Complémentaire à 1	31
Élevage mixte	petit	< 40 %	0,494	0,180	Complémentaire à 1	1 075
		≥ 40 %	0,493	0,189	Complémentaire à 1	37
	grand	< 40 %	0,490	0,186	Complémentaire à 1	865
		≥ 40 %	0,453	0,204	Complémentaire à 1	23

⁽¹⁾ Le seuil définissant les deux catégories de taille des troupeaux était 74 femelles pour les élevages laitiers, 66 pour les élevages allaitants et 124 pour les élevages mixtes.

La sensibilité troupeau du protocole « abattage-recontrôle IDC » avait déjà été estimée (II. Chapitre 2). Lorsque l’animal en lien ne se trouve plus dans l’élevage investigué, c’est ce protocole qui est utilisé, généralement sur un échantillon des animaux présents dans le troupeau, afin de limiter le risque d’obtenir des résultats faussement positifs en raison du défaut de spécificité. Cet échantillonnage est effectué pour la même raison et de la même manière que pour le deuxième test IDC (IDC2) du protocole de dépistage périodique « abattage-recontrôle IDC » (communication personnelle, F. Chevalier). Par conséquent, pour calculer, à chaque itération de nos modèles, la sensibilité troupeau du protocole « abattage-recontrôle IDC » utilisé en cas d’absence de l’animal en lien ou en cas d’IDC positive sur cet animal, nous avons utilisé l’arbre de scénario précédemment développé pour le protocole « abattage-recontrôle IDC » (chapitre 2), dans lequel nous avons modélisé la proportion d’animaux testés par la première ID de ce protocole de la même manière que l’IDC2 l’était en II.2.2.1.4. La moyenne et l’écart type des sensibilités troupeau ainsi estimées sont présentés en annexe 25.

Les coûts de ces protocoles d’investigation des liens aval peuvent être directs (tests de dépistage, analyses de laboratoire, etc.) ou indirects (pertes dues à l’interdiction de vente d’animaux et de lait non pasteurisé). Pour les estimer, nous avons utilisé les prix et les coûts collectés et estimés pour nos précédentes évaluations (cf. paragraphe II.2.2.3.).

La sensibilité troupeau et le coût total des deux protocoles d’investigation d’un lien aval ont été estimés selon les mêmes méthodes de calculs que dans les évaluations précédentes, pour douze types de troupeaux, définis par leur type de production (allaitant, laitier et mixte), leur taille (gros / petit) et leur taux de rotation (supérieur ou inférieur à 40 %). Les comparaisons entre les protocoles et les analyses coût-efficacité et de sensibilité ont été réalisées selon la méthodologie présentée dans le paragraphe 2.2.3.3.

5.3. Résultats

5.3.1. Sensibilité troupeau de l’investigation des liens épidémiologiques

La sensibilité troupeau moyenne était comprise entre 67,27 % et 89,19 % pour le protocole « identifier et abattre » et entre 51,15 % et 73,13 % pour le protocole « identifier et tester » (tableau 38). La différence de sensibilité troupeau moyenne entre les deux protocoles était significative pour chaque type de troupeau. Indépendamment du protocole, la sensibilité troupeau moyenne était plus élevée dans les troupeaux dont le taux de rotation était faible que dans ceux à taux de rotation élevé, sauf

dans les petits troupeaux allaitants pour le protocole « identifier et abattre » et pour les grands troupeaux mixtes. Cette différence était particulièrement importante dans les grands troupeaux allaitants.

Tableau 38. Sensibilité troupeau (en %) (moyenne [IC_{95%}]) estimée par type de troupeau via la modélisation par arbre de scénario pour les deux protocoles réglementaires d’investigation d’un élevage en lien aval

Type de production	Taille	Taux de rotation	« Identifier et abattre »	« Identifier et tester »
Laitier	petit	< 40 %	83,87 [83,5-84,24]	69,87 [69,5-70,25]
		≥ 40 %	80,08 [79,68-80,48]	64,18 [63,8-64,55]
	grand	< 40 %	82,78 [82,35-83,22]	67,90 [67,47-68,33]
		≥ 40 %	81,49 [81,04-81,93]	65,83 [65,41-66,25]
Allaitant	petit	< 40 %	79,29 [78,93-79,65]	65,42 [65,06-65,77]
		≥ 40 %	80,42 [80,02-80,82]	64,73 [64,36-65,11]
	grand	< 40 %	79,72 [79,28-80,15]	64,92 [64,49-65,34]
		≥ 40 %	67,27 [66,84-67,7]	51,15 [50,77-51,54]
Mixte	petit	< 40 %	82,17 [81,76-82,57]	67,15 [66,75-67,55]
		≥ 40 %	79,93 [79,53-80,33]	64,87 [64,48-65,25]
	grand	< 40 %	87,84 [87,35-88,34]	72,79 [72,3-73,27]
		≥ 40 %	89,19 [88,68-89,69]	73,13 [72,64-73,62]

5.3.2. Coût total et répartition des coûts de l’investigation des liens épidémiologiques

Le coût total moyen du protocole « identifier et abattre » était compris entre 1 941 et 16 347 €/troupeau (tableau 39). Il était compris entre 1 663 et 15 717 €/troupeau pour le protocole « identifier et tester ». Quel que soit le protocole utilisé, l’investigation était toujours plus coûteuse dans les grands troupeaux que dans les petits troupeaux, et dans les troupeaux à fort taux de rotation par rapport à ceux à faible taux de rotation. Quel que soit le type de troupeau, le protocole « identifier et abattre » était toujours plus sensible que le protocole « identifier et tester », mais également nettement plus coûteux. Cette différence de coût était moins importante pour les troupeaux allaitants.

Tableau 39. Coût total (moyenne [IC_{95%}]) (en euros par troupeau investigué) estimé par la modélisation par arbre de scénario pour les deux protocoles réglementaires d’investigation d’un élevage en lien aval par type de troupeau

Type de production	Taille	Taux de rotation	« Identifier et abattre »	« Identifier et tester »
Laitier	petit	< 40 %	3 577 [3 539-3 616]	2 947 [2 910-2 985]
		≥ 40 %	4 385 [4 350-4 420]	3 668 [3 633-3 704]
	grand	< 40 %	5 164 [5 110-5 219]	4 493 [4 439-4 548]
		≥ 40 %	7 577 [7 513-7 641]	6 873 [6 808-6 938]
Allaitant	petit	< 40 %	1 941 [1 920-1 961]	1 663 [1 644-1 682]
		≥ 40 %	4 151 [4 113-4 189]	3 837 [3 798-3 875]
	grand	< 40 %	3 623 [3 588-3 659]	3 327 [3 292-3 362]
		≥ 40 %	8 980 [8 891-9 069]	8 655 [8 565-8 745]
Mixte	petit	< 40 %	4 549 [4 500-4 599]	3 960 [3 912-4 008]
		≥ 40 %	7 480 [7 415-7 545]	6 888 [6 823-6 953]
	grand	< 40 %	6 905 [6 831-6 979]	6 314 [6 241-6 387]
		≥ 40 %	16 347 [16 203-16 491]	15 717 [15 571-15 862]

Le coût pour l’élevage était le même pour les deux protocoles (tableau 40). La différence de coût entre les deux protocoles se répercute uniquement sur l’État. La part du coût total prise en charge par l’État est d’autant plus importante que l’élevage est petit et a un faible taux de rotation.

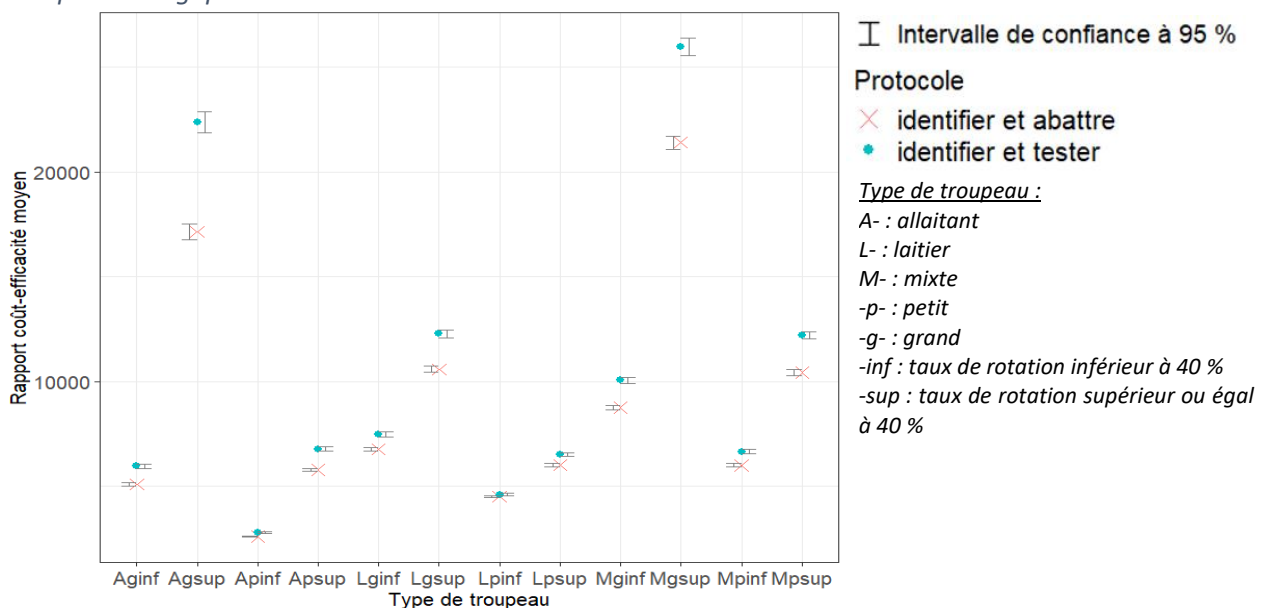
Tableau 40. Coût moyen pour l’État et pour le monde de l’élevage (en euros) des protocoles d’investigation des liens épidémiologique avals, estimés par la méthode des arbres de scénario

Type de production	Taille	Taux de rotation	« identifier et abattre »		« identifier et tester »	
			Coût État [IC _{95%}]	Coût élevage [IC _{95%}]	Coût État [IC _{95%}]	Coût élevage [IC _{95%}]
Élevage laitier	petit	< 40 %	2 649 [2 613-2 684]	929 [920-937]	2 019 [1 984-2 054]	929 [920-937]
		≥ 40 %	1 816 [1 794-1 837]	2 569 [2 544-2 594]	1 099 [1 079-1 119]	2 569 [2 544-2 594]
	grand	< 40 %	3 475 [3 424-3 525]	1 690 [1 674-1705]	2 804 [2 754-2 853]	1 690 [1 674-1 705]
		≥ 40 %	3 052 [3 012-3 093]	4 525 [4 482-4 567]	2 349 [2 309-2 388]	4 525 [4 482-4 567]
Élevage allaitant	petit	< 40 %	1 100 [1 082-1 117]	841 [833-849]	822 [806-838]	841 [833-849]
		≥ 40 %	958 [944-972]	3 193 [3 159-3 227]	644 [632-656]	3 193 [3 159-3 227]
	grand	< 40 %	1 590 [1 563-1 617]	2 034 [2 013-2 054]	1 293 [1 268-1 319]	2 034 [2 013-2 054]
		≥ 40 %	928 [915-941]	8 052 [7 964-8 140]	603 [593-614]	8 052 [7 964-8 140]
Élevage mixte	petit	< 40 %	2 738 [2 694-2 782]	1 811 [1 794-1 828]	2 149 [2 108-2 191]	1 811 [1 794-1 828]
		≥ 40 %	2 417 [2 379-2 455]	5 063 [5 016-5 110]	1 825 [1 790-1 861]	5 063 [5 016-5 110]
	grand	< 40 %	3 557 [3 494-3 620]	3 348 [3 317-3 380]	2 966 [2 905-3 026]	3 348 [3 317-3 380]
		≥ 40 %	3 331 [3 273-3 389]	13 016 [12 892-13 140]	2 701 [2 645-2 756]	13 016 [12 892-13 140]

5.3.3. Rapport coût-efficacité de l’investigation des liens épidémiologiques

Quel que soit le type de troupeau, le protocole « identifier et abattre » était toujours le plus coût-efficace (figure 29). Cette différence d’efficacité était très faible dans les petits élevages à faible taux de rotation et très importante dans les grands élevages allaitants et mixtes à fort taux de rotation.

Figure 29. Rapport coût-efficacité moyen des deux protocoles réglementaires d’investigation des liens épidémiologiques avals



5.3.4. Analyse de sensibilité

La probabilité que l’animal en lien ne soit plus présent dans l’élevage était la variable la plus influente sur la variation (variabilité et incertitude) de la sortie « sensibilité troupeau » du modèle, pour les deux protocoles d’investigation (figure 30). Pour le protocole « identifier et tester », cette variable partageait l’influence avec la sensibilité de l’IDC.

Pour les deux protocoles, les variables avec le plus d’influence sur la variation de la sortie « coût total » étaient le coût du protocole « abattage-recontrôle IDC » pour l’éleveur et pour l’Etat, et la probabilité pour l’animal en lien de ne plus être présent dans l’élevage (figure 31).

Figure 30. Analyse de sensibilité pour la sortie "sensibilité troupeau" des arbres de scénario modélisant les deux protocoles d'investigation des élevages en lien aval avec un foyer de TB (indice de Mc Kay > 10 %)

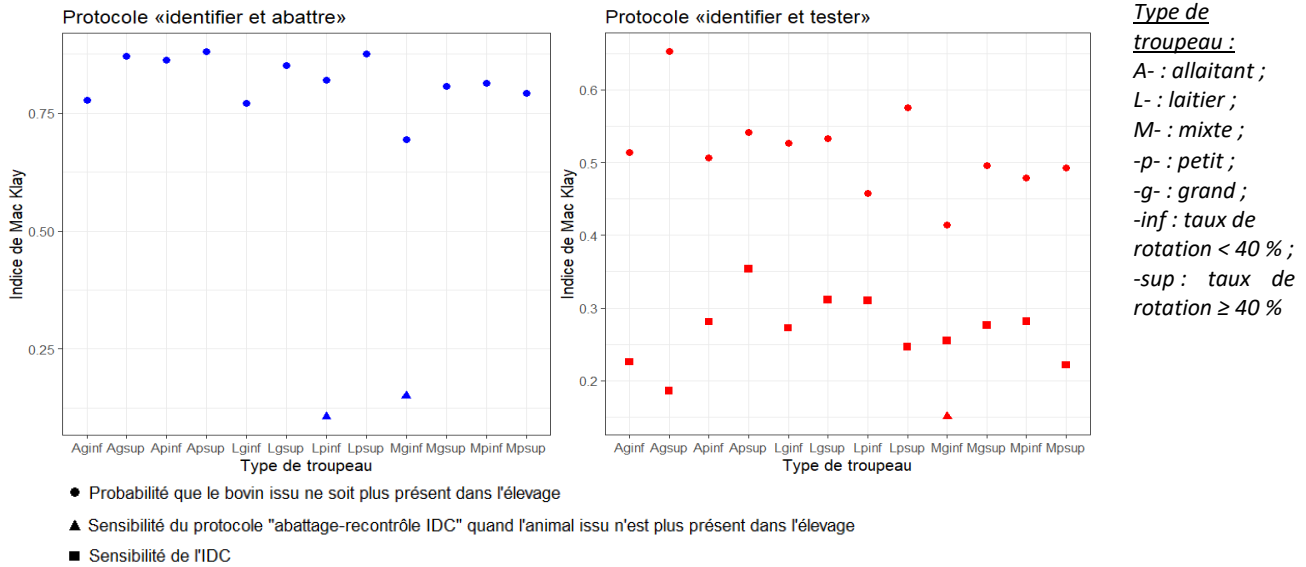
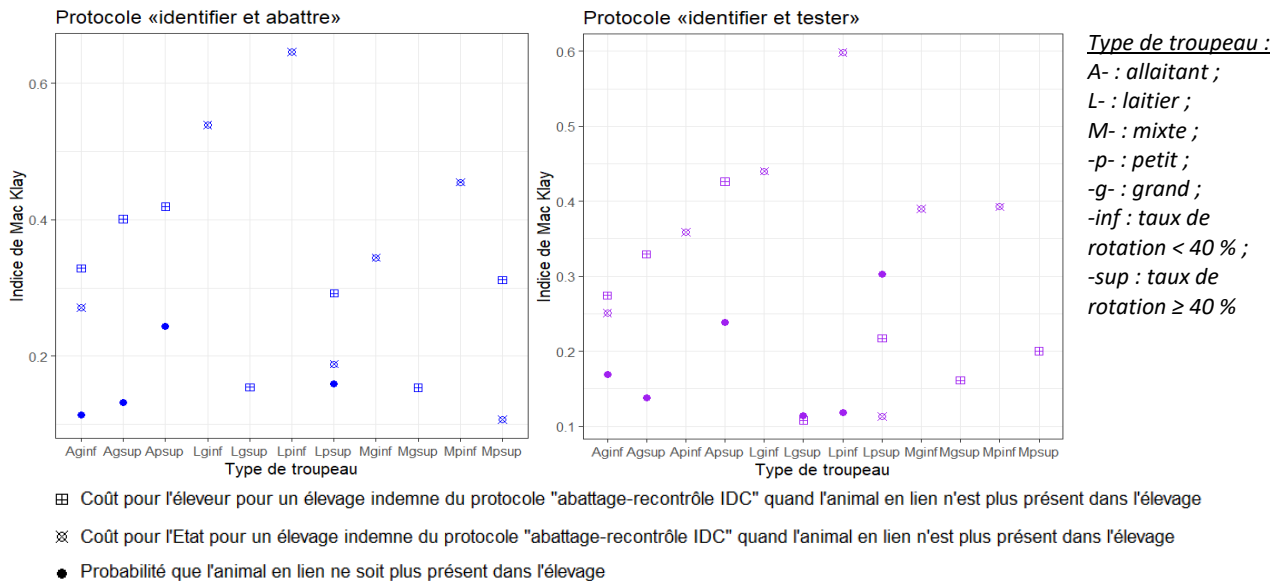


Figure 31. Analyse de sensibilité pour la sortie "coût total" des arbres de scénario modélisant les deux protocoles d'investigation des élevages en lien aval avec un foyer de TB (indice de Mc Kay > 10 %)



5.4. Discussion

5.4.1. Méthode utilisée

La méthode d'échantillonnage dans la BDNI, utilisée pour estimer la probabilité qu'un animal en lien soit présent dans l'élevage au moment de l'investigation, a fourni de petits échantillons pour les types de troupeaux les plus rares (comme les troupeaux avec un taux de rotation élevé), ce qui a entraîné l'utilisation de lois de distribution moins informatives qui ont donc introduit plus d'incertitude dans le modèle. Cette incertitude supplémentaire sur la probabilité qu'un animal en lien soit absent du troupeau aval est visible dans les résultats des analyses de sensibilité. De plus, en estimant ainsi cette probabilité, nous avons fait l'hypothèse que l'enquête avait lieu dans le dernier élevage où l'animal en lien avec le foyer a séjourné. Toutefois, au cours de la période de cinq ans prise en compte dans les enquêtes épidémiologiques, un animal peut vivre successivement dans des troupeaux différents.

Néanmoins, ce cas est assez rare et les autorités sanitaires débutent toujours les investigations dans le dernier troupeau dans lequel l'animal en lien a séjourné. S'ils ne détectent aucune infection dans ce troupeau, l'investigation s'arrête et, par conséquent, il n'y a pas d'enquête dans le ou les troupeau(x) intermédiaire(s).

Lorsque l'animal en lien ne fait plus partie du troupeau investigué, un échantillon d'animaux du troupeau est soumis à un dépistage par IDC. Les autorités sanitaires sélectionnent généralement les animaux qui étaient en contact étroit avec l'animal en lien pour optimiser la sensibilité du dépistage. Par conséquent, les animaux échantillonnés ont sans doute une probabilité d'infection plus élevée que celle modélisée. Cela n'a pas été pris en compte dans notre étude, car nous n'avons aucune information sur cette probabilité et parce que l'échantillonnage des animaux en contact ne peut pas toujours être effectué (par exemple, si l'animal a été au contact de tous les animaux) et dans ce cas, un échantillonnage aléatoire est réalisé. Ainsi, la sensibilité troupeau associée à la branche où l'animal en lien est absent du troupeau a peut-être été légèrement sous-estimée, entraînant une sous-estimation de la sensibilité des protocoles.

Nous avons supposé que les recommandations de pratiques de l'IDC étaient respectées et que les résultats non-négatifs de l'IDC étaient tous déclarés par les VS. D'après le coordinateur national français de la surveillance de la TB, cette hypothèse semblait raisonnable. En effet, en pratique, davantage de résultats non-négatifs sont déclarés lors des investigations dans les élevages en lien que lors des investigations dans les élevages suspects suite au dépistage périodique. Cela peut s'expliquer par le contexte particulier, car les autorités sanitaires surveillent généralement de près les investigations dans les troupeaux en lien, ce qui incite les VS à suivre les pratiques prescrites. De plus, les VS peuvent avoir davantage confiance en des résultats non-négatifs (car l'élevage est en lien avec un foyer de TB) par rapport à un résultat non-négatif lors du dépistage périodique en élevage. Par conséquent, leur « analyse de risque » personnelle du contexte peut les inciter à déclarer tous les résultats non-négatifs, à l'inverse de ce qui se produit dans un contexte de dépistage périodique (Guillon *et al.*, 2018 ; Crozet *et al.*, 2019).

5.4.2. Résultats de l'évaluation

Les estimations de la sensibilité troupeau étaient plus élevées dans les troupeaux à faible taux de rotation. Cette différence peut être expliquée par un nombre plus élevé d'animaux âgés de plus de 24 mois dans ces troupeaux, ce qui induit une plus grande sensibilité troupeau lors du dépistage par IDC (seuls les animaux de plus de 24 mois subissent le dépistage). Cette différence était plus grande dans les grands troupeaux allaitants, car il y avait une plus grande différence dans la proportion d'animaux de plus de 24 mois dans ces troupeaux. Néanmoins, dans les petits troupeaux allaitants et dans les grands troupeaux mixtes, cette différence s'inversait. En effet, dans ce type de troupeau, la différence de sensibilité du dépistage du troupeau par IDC, entre les élevages à faible taux de rotation et les élevages à fort taux de rotation, était plus faible. De même, les troupeaux à fort taux de rotation avaient une probabilité plus élevée de suivre le chemin le plus sensible (celui dans lequel l'animal en lien est toujours présent dans l'élevage) (tableau 37). La plus grande sensibilité du dépistage par IDC dans les troupeaux à faible taux de rotation n'était donc pas suffisante pour compenser la probabilité plus élevée de suivre cette voie.

Quel que soit le type de troupeau, il y avait peu de différence entre les coûts totaux moyens des deux protocoles étudiés. La différence de quelques centaines d'euros peut s'expliquer par le coût de l'abattage diagnostique de l'animal en lien et des analyses de laboratoire correspondantes. Cette différence était d'environ 600 euros pour les élevages laitiers, de 600 à 700 euros pour les élevages mixtes et d'environ 300 euros pour les élevages allaitants. Elle était plus faible dans les troupeaux allaitants car la carcasse des bovins est mieux valorisée (valeur bouchère supérieure) ; par conséquent, les coûts d'indemnisation liés à l'abattage de ces animaux sont moins élevés que ceux des animaux laitiers ou mixtes (paragraphe II.2.2.3.1.).

Par rapport à tous les autres types de troupeau, le coût était beaucoup plus élevé dans les grands troupeaux mixtes à fort taux de rotation car ils subissent des coûts indirects plus élevés. En effet, si on les compare aux autres types de troupeau vendant le plus d'animaux (les grands élevages allaitants à fort taux de rotation), ces élevages vendent en moyenne 60 animaux de plus chaque année. Par conséquent, lorsqu'ils ne peuvent pas vendre d'animaux (car ils sont suspects de TB), ils subissent des pertes indirectes beaucoup plus importantes que d'autres types de troupeaux, ce qui entraîne des coûts totaux plus élevés pour les protocoles d'investigation.

Cette étude ne prend pas en compte les conséquences économiques à moyen et long terme du manque de sensibilité des protocoles (moins de foyers détectés et donc plus de risque de propagation de la TB). Par conséquent, seul le coût à court terme des protocoles a été estimé. Néanmoins, les coûts à moyen et long terme sont plus difficiles à obtenir et leur prise en compte serait préjudiciable au protocole « identifier et tester » (qui a la plus faible sensibilité troupeau) ; leur prise en compte ne changerait donc pas le classement des protocoles, mais seulement l'intensité de la différence d'efficacité entre eux.

Pour les deux protocoles, les coûts pris en charge par l'éleveur ont été estimés identiques à type de troupeau équivalent. En effet, la seule différence entre les deux protocoles est l'abattage ou non de l'animal en lien en cas d'IDC négative de celui-ci. Or, les coûts de cet abattage sont pris en charge par l'État, ce qui explique cela. Toutefois, le choix du protocole « identifier et tester » entraîne le classement de l'élevage en tant qu'élevage « à risque », ce qui engendre des coûts supplémentaires pour l'éleveur les trois années suivantes puisqu'un dépistage annuel du troupeau pendant trois ans est alors imposé. Ces coûts supplémentaires n'ont pas été pris en compte dans notre étude et ne sont valables que dans les départements dans lesquels le rythme de dépistage est allégé (s'il est annuel, l'élevage sera à nouveau dépisté l'année suivante quel que soit le protocole choisi). La prise en compte de ces coûts augmenterait le coût total du protocole « identifier et tester » et, *in fine*, augmenterait l'écart du rapport coût-efficacité entre les protocoles, en défaveur de ce dernier.

La forte diminution de la sensibilité du protocole « identifier et tester » par rapport au protocole « identifier et abattre » n'est pas compensée par une réduction suffisante des coûts. Le rapport coût-efficacité est donc inférieur pour le protocole « identifier et abattre », quel que soit le type de troupeau, ce qui traduit une meilleure efficacité. Les types de troupeaux pour lesquels la différence d'efficacité entre les protocoles était mineure (la plupart des troupeaux à faible taux de rotation) sont ceux pour lesquels les sensibilités du protocole étaient les plus proches.

Les résultats des analyses de sensibilité ont mis en évidence le rôle majeur de la probabilité que l'animal en lien soit toujours présent dans l'élevage. Cette influence est cohérente avec le rôle central de cette probabilité dans la voie à suivre (la moins chère et la moins sensible - sans l'abattage de l'animal en lien-, ou la plus chère et la plus sensible dans laquelle l'animal en lien est abattu). Cela correspond également à la variabilité et à l'incertitude que nous avons à propos de cette probabilité.

Bilan

Cette évaluation a montré que l'abattage systématique des animaux en lien (protocole « identifier et abattre ») offre une bien meilleure sensibilité troupeau et est plus efficace pour tous les types de troupeaux. Par conséquent, la recommandation des autorités sanitaires d'utiliser préférentiellement ce protocole lorsque les animaux en lien sont encore présents dans l'élevage investigué semble très pertinente. Ces résultats peuvent renforcer la capacité des autorités sanitaires à convaincre les éleveurs d'utiliser cette voie dite rapide en leur fournissant un argument quantitatif. Néanmoins, la différence d'efficacité est moins évidente dans la plupart des troupeaux à faible taux de renouvellement. Dans ces troupeaux, le choix d'une voie plutôt que l'autre pourrait être fait en fonction du contexte épidémiologique. Par exemple, dans les zones à faible prévalence, on pourrait éventuellement choisir de réduire les coûts et d'accepter une sensibilité plus faible et, par conséquent, choisir la voie dite conservatoire, sous réserve d'accepter un coût supplémentaire pour l'éleveur les trois années suivantes dû au dépistage obligatoire de son élevage.

Chapitre 6. Évaluation coût-efficacité du dépistage lors des mouvements d'animaux

6.1. Objectif spécifique d'évaluation du dépistage lors des mouvements d'animaux

L'objectif de cette partie était d'évaluer individuellement la dernière composante de la surveillance *ante mortem* de la TB : le dépistage réalisé sur les animaux lors de leur achat (paragraphe 1.2.3.2.1.2). Les contrôles lors des mouvements sont rarement mis en œuvre sur le terrain car de nombreuses dérogations existent. L'objectif de cette composante est plus de protéger l'élevage achetant l'animal d'une éventuelle contamination par la TB que de détecter les foyers de TB. Entre 2015 et 2017, elle a permis la détection d'un seul foyer de TB parmi les quelques 100 foyers découverts chaque année (Delavenne *et al.*, 2019). Toutefois, elle fait partie intégrante du système de surveillance *ante mortem* actuel et son évaluation était donc intéressante, notamment pour fournir des arguments quantitatifs pour discuter de son éventuel abandon, en estimant la perte en sensibilité et le gain financier qui y seraient associés. L'IDS et l'IDC pouvant toutes deux être utilisées pour le dépistage aux mouvements, nous avons évalué l'efficacité de cette composante pour chacun des deux tests.

6.2. Matériel et méthode

Comme pour les autres composantes de la surveillance *ante mortem*, nous avons réalisé une évaluation coût-efficacité du dépistage lors des mouvements d'animaux, *via* une approche stochastique de modélisation par arbre de scénario. Le protocole évalué était théorique car il ne correspondait pas exactement aux pratiques de terrain : nous avons supposé un dépistage de tous les animaux vendus par l'élevage sur une année à l'aide d'une ID (IDC ou IDS) et l'abattage diagnostique des animaux ayant obtenu un résultat non-négatif à ce dépistage.

Nous avons conservé les mêmes nœuds de catégorie d'infection et/ou de détection que pour les modèles précédents, ainsi que les lois de distribution associées à leurs branches.

La spécificité et la sensibilité de l'IDC et des analyses de laboratoire (histologie, culture, PCR) étaient les mêmes que celles utilisées dans les modélisations précédentes. Les caractéristiques de l'IDS ont été modélisées par des lois normales asymétriques paramétrées d'après les données d'études publiées, soit une moyenne à 84 % avec un IC à 95 % égal à [60 %-100 %] pour la sensibilité (Praud *et al.*, 2015) et une moyenne à 97 % avec un IC à 95% égal à [75 %-99 %] pour la spécificité (de la Rua-Domenech *et al.*, 2006).

Nous avons simulé l'utilisation de l'IDC et de l'IDS, en prenant en compte ou non les adaptations de pratiques par les VS comme présenté dans le chapitre 3. Les adaptations de pratiques de l'IDS ont été déterminées de la même façon que celles de l'IDC, en sélectionnant les VS répondants de l'enquête quantitative (Chapitre 3) pratiquant des IDS (n=190). Comme pour l'IDC, seul le score de perception du système de surveillance de la TB avait une influence significative sur le score de réalisation de l'IDS. La seule variable ayant une influence significative sur le score perception de ces VS était leur classe d'âge (inférieur ou supérieur à 50 ans). En effet, les VS de plus de 50 ans avaient un meilleur score de perception de la lutte contre la TB. Le coefficient de perception des VS pour l'IDS a donc été modélisé en fonction de l'âge du VS, par des lois de distributions bêta, dont les paramètres ont été déterminés pour correspondre au mieux aux résultats de l'enquête quantitative (tableau 41).

Tableau 41. Paramètres des lois Béta utilisées pour modéliser le score de perception des VS pratiquant l'IDS en fonction de leur catégorie d'âge

Catégorie d'âge du VS	Paramètres de la loi Béta	
	a	b
< 50 ans	4,96	9,82
≥ 50 ans	5,41	13,33

Le score de réalisation de l'IDS a ensuite été modélisé selon l'équation (16), où c suit une loi de distribution normale $N(\text{moyenne} = 3,82, \text{écart type} = 1,11)$, dont les paramètres ont été définis en fonction du résultat de l'analyse multivariée expliquant le score de réalisation de l'IDS ; et ϵ , le résidu de la régression multivariée, suivant une loi de distribution normale $N(\text{moyenne} = 1,84, \text{écart type} = 0,36)$ et comprise entre $(-c * \text{score de perception})$ et $(11-c * \text{score de perception})$.

$$(16) \text{ Score de réalisation de l'IDS} = c * \text{score de perception IDS} + \epsilon$$

L'impact du score de l'IDS sur les caractéristiques du test a été modélisé de la même manière que l'impact du score d'IDC sur ses propres caractéristiques (paragraphe II.3.3.3). Nous avons fait l'hypothèse que les résultats non-négatifs étaient systématiquement déclarés aux autorités sanitaires, car cela protège l'élevage dans lequel l'animal est introduit, qui est le client du VS réalisant le test.

Les coûts directs et indirects ont également été modélisés de la même façon, exceptés pour les coûts de l'IDC et de l'IDS qui ont été modélisés par une loi de Pert paramétrée avec les valeurs minimale, moyenne et maximale constatées dans les départements pour lesquels les données étaient disponibles, soit pour l'IDC : PERT(min=1,7 ; mode=6,08 ; max=9,48), et pour l'IDS : PERT(min=1,55 ; mode=3,52 ; max=6,05).

Le seul nouveau paramètre à estimer était la probabilité qu'un animal soit vendu à un autre élevage (en excluant les ventes pour abattage) sur une année. Nous avons pour cela utilisé les données de la BDNI : pour chaque département, nous avons échantillonné des élevages de la même façon que pour estimer la probabilité pour un animal vendu d'être encore présent dans l'élevage (II.5.2). Pour chaque département, nous avons ainsi obtenu un échantillon pour chaque type de troupeau (12 types en fonction du type de production, de la taille et du taux de rotation). Pour chaque élevage de ces échantillons, nous avons extrait de la BDNI le nombre d'animaux vendus au cours de l'année 2016 (en excluant les mâles de plus de six mois des élevages allaitants et mixtes qui correspondent aux brouards vendus pour engraissement et qui bénéficient d'une dérogation pour les contrôles aux mouvements) et la taille du troupeau au premier janvier 2016, permettant le calcul de la proportion d'animaux vendus (ramenée à 100 %, si du fait des animaux achetés et vendus au cours de l'année 2016, la proportion était supérieure à 100 %). La probabilité pour un animal d'être vendu au cours de l'année a donc été modélisée en fonction du département et du type de troupeau, par une loi normale asymétrique conçue de telle façon qu'elle corresponde le mieux possible à la répartition constatée dans l'échantillon correspondant au type de troupeau et au département concerné. Le tableau 42 présente les paramètres obtenus pour ces lois normales dans le département du Cantal.

La sensibilité troupeau et le coût total du dépistage aux mouvements ont été estimés selon les mêmes méthodes de calculs que dans les évaluations précédentes, pour douze types de troupeaux, définis par leur type de production (allaitant, laitier et mixte), leur taille (grand, petit) et leur taux de rotation (supérieur ou égal à 40 %, inférieur à 40 %). Les comparaisons effectuées et les analyses coût-efficacité et de sensibilité ont été réalisées selon la méthodologie présentée dans le paragraphe II.2.2.3.3.

Les résultats ci-dessous correspondent à 10 000 itérations pour le dépistage aux mouvements de tous les animaux vendus d'un élevage du Cantal soit par IDS, soit par IDC, et en prenant en compte ou non les adaptations de pratiques du VS.

Tableau 42. Paramètres des lois Normales utilisées pour modéliser la probabilité pour un animal d'être vendu au cours de l'année dans le département du Cantal

Type de production	Taille	Taux de rotation	Moyenne de la loi Normale	Écart type
Laitier	petit	< 40 %	0,432	0,245
		≥ 40 %	0,485	0,250
	grand	< 40 %	0,413	0,247
		≥ 40 %	0,477	0,252
Allaitant	petit	< 40 %	0,404	0,243
		≥ 40 %	0,495	0,251
	grand	< 40 %	0,390	0,244
		≥ 40 %	0,448	0,249
Mixte	petit	< 40 %	0,458	0,250
		≥ 40 %	0,517	0,251
	grand	< 40 %	0,435	0,247
		≥ 40 %	0,558	0,249

6.3. Résultats

6.3.1. Sensibilité troupeau du dépistage aux mouvements

Le tableau 43 présente les sensibilités troupeau moyennes estimées pour le dépistage lors des mouvements de bovin, en fonction du test de dépistage utilisé (IDS ou IDC) et de la prise en compte ou non de pratiques d'ID modifiées par rapport à la réglementation. La sensibilité troupeau estimée était comprise entre 13,23 et 56,31 % pour l'utilisation de l'IDS conformément à la réglementation, et entre 9,85 et 46,25 % en cas d'adaptation des pratiques. Pour l'utilisation de l'IDC, elle était comprise entre 11,57 et 51,84 % en cas de pratiques conformes et entre 8,47 et 41,63 % sinon.

À pratiques « égales », l'utilisation de l'IDS avait toujours entre 1 et 4 % de sensibilité supplémentaire par rapport à l'utilisation de l'IDC, selon le type de troupeau.

Tableau 43. Résultat de la sensibilité troupeau (moyenne [IC_{95%}]) du dépistage des animaux lors de leur mouvement par IDS ou par IDC, en prenant en compte ou non les adaptations de pratiques des VS

Type de production	Taille	Taux de rotation	Avec des pratiques d'ID conformes		Avec des pratiques d'ID modifiées	
			IDS	IDC	IDS	IDC
Laitier	petit	< 40 %	16,49 [16,27-16,7]	14,53 [14,33-14,73]	12,35 [12,18-12,52]	10,71 [10,55-10,86]
		≥ 40 %	13,23 [13,04-13,43]	11,57 [11,39-11,74]	9,85 [9,7-10]	8,47 [8,34-8,61]
	grand	< 40 %	32,99 [32,63-33,36]	29,29 [28,95-29,64]	25,72 [25,41-26,03]	22,37 [22,09-22,65]
		≥ 40 %	30,69 [30,38-31]	27,55 [27,27-27,84]	23,62 [23,37-23,88]	20,83 [20,6-21,06]
Allaitant	petit	< 40 %	13,79 [13,59-13,99]	12,29 [12,11-12,48]	10,29 [10,13-10,44]	9,02 [8,88-9,16]
		≥ 40 %	14,99 [14,78-15,2]	13,27 [13,08-13,46]	11,20 [11,04-11,36]	9,74 [9,6-9,88]
	grand	< 40 %	33,26 [32,87-33,65]	30,16 [29,79-30,53]	26,02 [25,69-26,35]	23,15 [22,85-23,45]
		≥ 40 %	37,83 [37,43-38,22]	34,33 [33,95-34,71]	29,84 [29,5-30,17]	26,55 [26,24-26,87]
Mixte	petit	< 40 %	28,14 [27,82-28,47]	25,01 [24,71-25,31]	21,63 [21,37-21,9]	18,87 [18,63-19,11]
		≥ 40 %	27,44 [27,13-27,75]	24,81 [24,52-25,1]	21,03 [20,78-21,28]	18,69 [18,46-18,92]
	grand	< 40 %	47,88 [47,44-48,33]	43,89 [43,46-44,32]	38,75 [38,35-39,14]	34,79 [34,42-35,16]
		≥ 40 %	56,31 [55,9-56,72]	51,84 [51,44-52,24]	46,25 [45,87-46,63]	41,63 [41,27-41,98]

6.3.2. Coûts du dépistage aux mouvements

Le coût du dépistage aux mouvements était compris entre 654 et 12 213 €/troupeau pour des pratiques d'IDS conformes à la réglementation, et entre 488 et 8 893 €/troupeau avec des pratiques modifiées (tableau 44). Pour l'IDC, le coût était compris entre 545 et 9 516 €/troupeau en cas de pratiques conformes, et entre 717 et 6 904 €/troupeau en cas de pratiques modifiées.

Contribution personnelle – Chapitre 6. Évaluation coût-efficacité du dépistage lors des mouvements d'animaux

Les coûts étaient toujours plus faibles en utilisant l'IDC qu'en utilisant l'IDS et la modification des pratiques entraînait une réduction des coûts (tableau 44).

Pour la plupart des types de troupeau, la majorité des coûts sont pris en charge par l'État. À pratiques égales, les coûts pris en charge par l'éleveur étaient très proches entre l'IDS et l'IDC (tableau 45). La modification des pratiques entraînait toutefois une diminution des coûts pris en charge par l'éleveur (tableau 45).

Tableau 44. Résultat du coût total moyen (en euros/troupeau) (moyenne [IC_{95%}]) du dépistage des animaux lors de leur mouvement par IDS ou par IDC, en fonction des pratiques des VS

Type de production	Taille	Taux de rotation	Avec des pratiques d'ID conformes		Avec des pratiques d'ID modifiées	
			IDS	IDC	IDS	IDC
Laitier	petit	< 40 %	2 056 [2 013-2 099]	1 600 [1 565-1 635]	1 503 [1 471-1 534]	1 172 [1 147-1 198]
		≥ 40 %	1 377 [1 347-1 408]	1 072 [1 047-1 097]	1 009 [986-1 031]	788 [770-806]
	grand	< 40 %	5 452 [5 343-5 561]	4 195 [4 106-4 283]	3 981 [3 901-4 060]	1 958 [1 917-1 999]
		≥ 40 %	3 901 [3 828-3 973]	3 075 [3 016-3 135]	2 851 [2 799-2 904]	1 256 [1 231-1 280]
Allaitant	petit	< 40 %	654 [637-671]	545 [531-559]	488 [476-501]	717 [699-735]
		≥ 40 %	670 [653-686]	568 [554-582]	501 [489-513]	765 [747-784]
	grand	< 40 %	2 076 [2 026-2 126]	1 728 [1 686-1 769]	1 544 [1 507-1 580]	2 475 [2 421-2 529]
		≥ 40 %	2 198 [2 145-2 251]	1 834 [1 791-1 877]	1 641 [1 602-1 679]	2 775 [2 716-2 834]
Mixte	petit	< 40 %	3 855 [3 773-3 937]	3 013 [2 946-3 080]	2 818 [2 758-2 877]	1 513 [1 482-1 545]
		≥ 40 %	2 969 [2 904-3 034]	2 385 [2 331-2 438]	2 176 [2 129-2 223]	1 073 [1 050-1 096]
	grand	< 40 %	12 203 [11 959-12 447]	9 516 [9 317-9 716]	8 893 [8 715-9 071]	6 904 [6 761-7 048]
		≥ 40 %	9 047 [8 872-9 222]	7 193 [7 050-7 336]	6 629 [6 502-6 756]	5 283 [5 180-5 386]

Tableau 45. Coûts moyens pour l'éleveur (en euros/troupeau) (moyenne [IC_{95%}]) du dépistage des animaux lors de leur mouvement par IDS ou par IDC, en fonction des pratiques des VS

Type de production	Taille	Taux de rotation	Avec des pratiques d'ID conformes		Avec des pratiques d'ID modifiées	
			IDS	IDC	IDS	IDC
Laitier	petit	< 40 %	480 [471-489]	422 [413-430]	365 [358-372]	332 [326-339]
		≥ 40 %	151 [148-153]	159 [156-162]	123 [121-126]	138 [136-141]
	grand	< 40 %	1 779 [1 745-1 813]	1 462 [1 434-1 490]	1 329 [1 304-1 354]	1 115 [1 094-1 136]
		≥ 40 %	640 [630-650]	610 [600-619]	501 [493-508]	501 [494-508]
Allaitant	petit	< 40 %	92 [91-94]	119 [118-121]	82 [81-83]	111 [110-113]
		≥ 40 %	70 [69-71]	108 [106-109]	68 [67-69]	106 [104-107]
	grand	< 40 %	446 [439-454]	485 [477-493]	368 [362-374]	423 [417-430]
		≥ 40 %	269 [266-273]	376 [371-381]	248 [245-252]	360 [355-365]
Mixte	petit	< 40 %	1 280 [1256-1304]	1 079 [1 059-1 100]	959 [941-977]	828 [813-844]
		≥ 40 %	467 [459-474]	471 [463-478]	371 [365-377]	395 [389-401]
	grand	< 40 %	6 667 [6 535-6 800]	5 318 [5 208-5 428]	4 892 [4 795-4 989]	3 917 [3 837-3 996]
		≥ 40 %	2 166 [2 132-2 200]	1 948 [1 919-1 977]	1 659 [1 634-1 684]	1 549 [1 527-1 571]

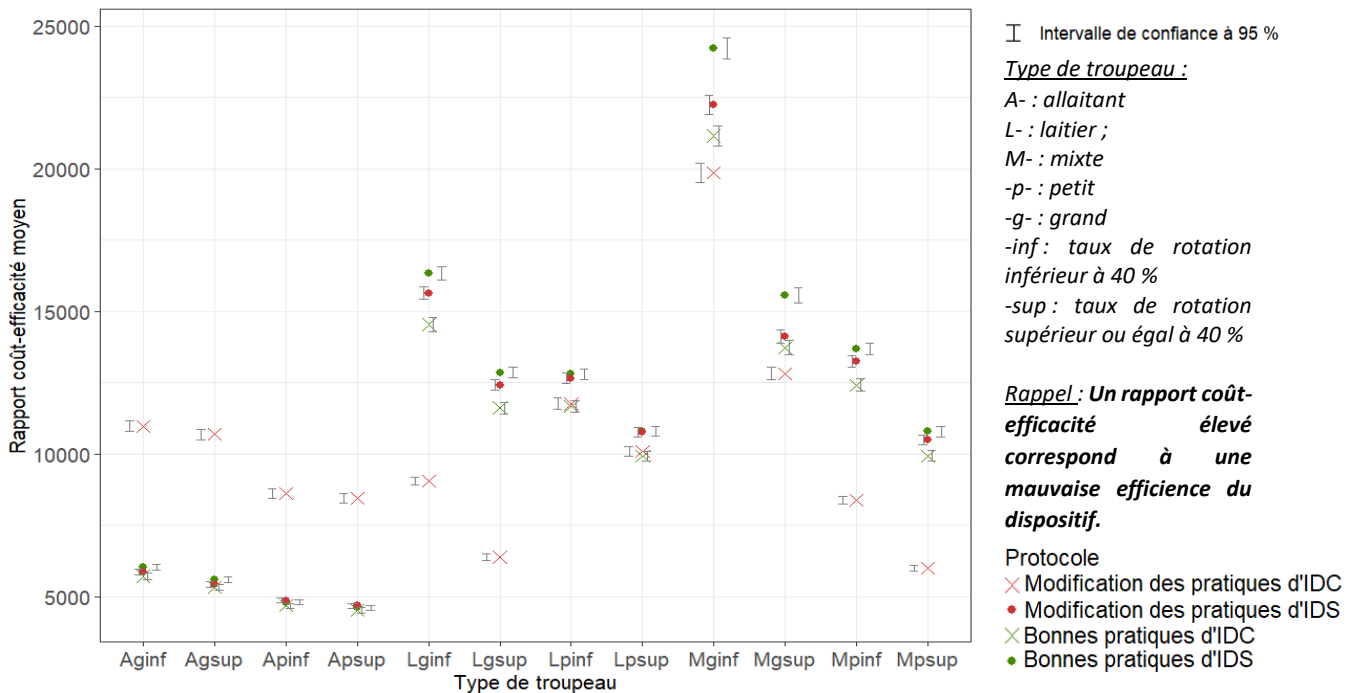
6.3.3. Rapport coût-efficacité du dépistage aux mouvements

À pratiques constantes, l'utilisation de l'IDC était toujours plus coût-efficace que l'utilisation de l'IDS, sauf dans les troupeaux allaitants en cas de pratiques modifiées des VS (figure 32).

La modification des pratiques améliorait le rapport coût-efficacité de l'IDS, sauf dans les petits troupeaux allaitants et laitiers pour lesquels la différence n'était pas significative.

La modification des pratiques de l'IDC avait un impact différent sur le rapport coût-efficacité du dispositif en fonction du type de troupeau : une détérioration pour les élevages allaitants, une amélioration pour les grands troupeaux laitiers et pour les troupeaux mixtes et pas de différence significative pour les petits élevages laitiers.

Figure 32. Rapport coût-efficacité du dépistage lors des mouvements d'animaux par IDC ou par IDS en prenant ou non en compte les adaptations de pratiques des VS



6.3.4. Analyse de sensibilité

L'annexe 26 et l'annexe 27 présentent les indices de Mc Kay supérieurs à 10 % obtenus lors des analyses de sensibilité de la variance respectivement des sorties « sensibilité troupeau » et « coût total » pour les protocoles de dépistage aux mouvements utilisant l'IDC. Les résultats obtenus pour l'IDS étaient très semblables.

Pour tous les types de troupeau et pour toutes les pratiques d'IDC, la variable ayant le plus d'influence sur les variations de la sensibilité troupeau était la proportion d'animaux vendus dans l'année. Dans les petits élevages, la taille de l'élevage avait également une influence importante sur cette variation.

Les variables ayant le plus d'influence sur les variations (variabilité et incertitude) de la sortie « coût total » étaient principalement la proportion d'animaux vendus dans l'année et la spécificité de l'ID.

6.4. Discussion

6.4.1. Méthode utilisée

La méthode utilisée est la même que pour les évaluations des autres composantes et a donc les mêmes limites. Pour cette évaluation, nous avons fait l'hypothèse que tous les animaux vendus d'un troupeau étaient dépistés par ID, ce qui n'est pas du tout le cas en pratique. En effet, une dérogation s'applique pour les animaux dont la durée du transport est inférieure ou égale à six jours (I.2.3.2.1.2), ce qui est le cas pour la grande majorité des animaux échangés. Cette hypothèse entraîne donc une surestimation de la valeur de la sensibilité troupeau du dépistage lors des mouvements. Toutefois, cette dérogation ne s'applique pas dans les élevages classés « à risque » pour lesquels tous les animaux doivent être soumis au dépistage avant leur vente. Pourtant, sur le terrain, cette obligation n'est pas systématiquement respectée car il est difficile pour les autorités sanitaires, avec les outils actuellement

disponibles, de vérifier qu'elle a bien été mise en œuvre. Ainsi, si dans certains départements comme la Côte-d'Or, des personnes sont spécifiquement dédiées à ces vérifications, mais dans la plupart des autres départements, il n'est pas vérifié si l'animal provient d'un cheptel classé « à risque » (communication personnelle F. Chevalier). La sensibilité troupeau estimée pour le dépistage aux mouvements des animaux a donc été surestimée par rapport à sa réelle efficacité sur le terrain.

6.4.2. Résultats de l'évaluation

Les sensibilités troupeau du dépistage aux mouvements sont assez faibles comparées à celles estimées pour les protocoles des investigations des liens avalés alors même que les hypothèses de modélisation entraînent sa surestimation. Cela soulève la question de la plus-value apportée par cette composante au dispositif global de surveillance *ante mortem* de la TB.

La sensibilité du dépistage aux mouvements était supérieure en utilisant l'IDS qu'avec l'IDC, ce qui s'explique par une meilleure sensibilité individuelle de l'IDS. La prise en compte des pratiques des VS ne changeait pas ce classement malgré une diminution de la sensibilité estimée. Les pratiques de l'IDS ne semblaient pas avoir un impact plus important sur la sensibilité troupeau que les pratiques de l'IDC. Toutefois, la prise en compte de ces pratiques s'appuie sur un faible nombre de VS ayant répondu au questionnaire quantitatif portant sur les pratiques d'ID, qui ne peut pas être considéré comme représentatif de l'ensemble des VS sanitaires ruraux français. Pour obtenir une meilleure évaluation de cette différence de pratiques entre l'IDS et l'IDC, il faudrait répéter cette enquête à l'échelle départementale afin de collecter plus de données sur les pratiques spécifiques à chaque département.

L'utilisation de l'IDC était toutefois le choix le plus efficace dans la plupart des élevages grâce à son coût total moins important. De plus, malgré un prix en moyenne plus élevé pour l'IDC de dépistage (à la charge de l'éleveur), les coûts pour l'éleveur étaient plus faibles en cas d'utilisation de l'IDC, car sa meilleure spécificité individuelle permettait d'éviter les surcoûts dus au blocage d'un élevage faussement positif.

Dans les élevages avec un taux de rotation élevé, la proportion d'animaux vendus au cours d'une année était plus importante (tableau 42) mais la sensibilité et les coûts estimés étaient plus faibles que pour des élevages semblables à faible taux de rotation, pour les petits élevages mixtes et pour les élevages laitiers, ce qui semble contre-intuitif. Cela s'explique simplement par un nombre d'animaux présents dans les élevages à fort taux de rotation nettement plus faible (à type de production et taille constante) (tableau 12), ce qui conduit à un nombre d'animaux vendus plus faible. Pour cette même raison, le coût pour l'élevage était plus faible dans les élevages à fort taux de rotation.

Dans les élevages allaitants, en cas de pratiques modifiées, l'utilisation de l'IDS était plus coût-efficace que l'utilisation de l'IDC. En effet, dans ce cas, le coût total moyen était moins important pour l'IDS que pour l'IDC, car les surcoûts entraînés par l'investigation d'une fausse suspicion (qui est plus fréquente lors de l'utilisation de l'IDS du fait de sa moins bonne spécificité) sont moins importants dans les élevages allaitants du fait d'un plus faible pourcentage d'animaux de plus de 24 mois (animaux soumis au dépistage) ; ainsi, le faible coût individuel du test IDS n'est plus compensé par un fort surcoût par manque de spécificité du test.

L'importance de la proportion d'animaux vendus dans l'année sur les variations des sensibilités troupeau et des coûts totaux estimés reflète l'importance de cette variable dans la sensibilité troupeau (plus le nombre d'animaux infectés testés est élevé, plus la probabilité de détecter la TB est forte) et dans les coûts (plus le nombre d'animaux infectés testés est élevé, plus les coûts augmentent), ainsi que la forte variabilité de cette variable (tableau 42).

Bilan

Dans la plupart des cas, l'utilisation de l'IDC permettait d'obtenir le dépistage aux mouvements le plus coût-efficace, malgré une sensibilité troupeau légèrement meilleure avec l'IDS.

Malgré une probable surestimation, nous avons mis en évidence une sensibilité troupeau assez faible pour cette composante de la surveillance, avec une efficacité légèrement meilleure en cas d'utilisation de l'IDS. La suppression de cette composante de la surveillance qui semble peu efficace pourrait donc être envisagée. La part que prend effectivement le dépistage lors des mouvements dans l'efficacité de la surveillance *ante mortem* de la TB serait à estimer afin d'évaluer l'intérêt technique et économique du maintien de cette composante, déjà peu appliquée sur le terrain.

Chapitre 7. Évaluation de la sensibilité globale de la surveillance *ante-mortem* de la tuberculose bovine

Ce travail est en cours de valorisation :

V. Guétin-Poirier, J. Rivière et B. Dufour. 2020. Assessment of the overall sensitivity of French ante-mortem surveillance for bovine tuberculosis in cattle: a scenario tree modelling approach. PLoS ONE (en cours de rédaction)

7.1. Objectif spécifique de l'évaluation globale de la surveillance *ante mortem*

Une fois chaque composante du système de surveillance *ante mortem* de la TB évalué séparément, le système de surveillance a été évalué dans son ensemble à l'échelle des départements. L'objectif était d'estimer sa sensibilité dans chaque département, afin de vérifier sa capacité à détecter la présence de l'infection à une prévalence fixée (détecter au moins un élevage infecté) ; d'estimer sa capacité à détecter les élevages infectés, ainsi que son coût moyen ; et d'identifier les composantes les plus importantes, dans le but de mieux connaître les caractéristiques du système de surveillance *ante mortem* de la TB en France.

7.2. Matériel et méthode

Les arbres construits précédemment pour chacune des composantes de la surveillance *ante mortem* ont été réutilisés et associés dans un arbre global présenté sur la figure 33.

7.2.1. Nœuds de catégorie

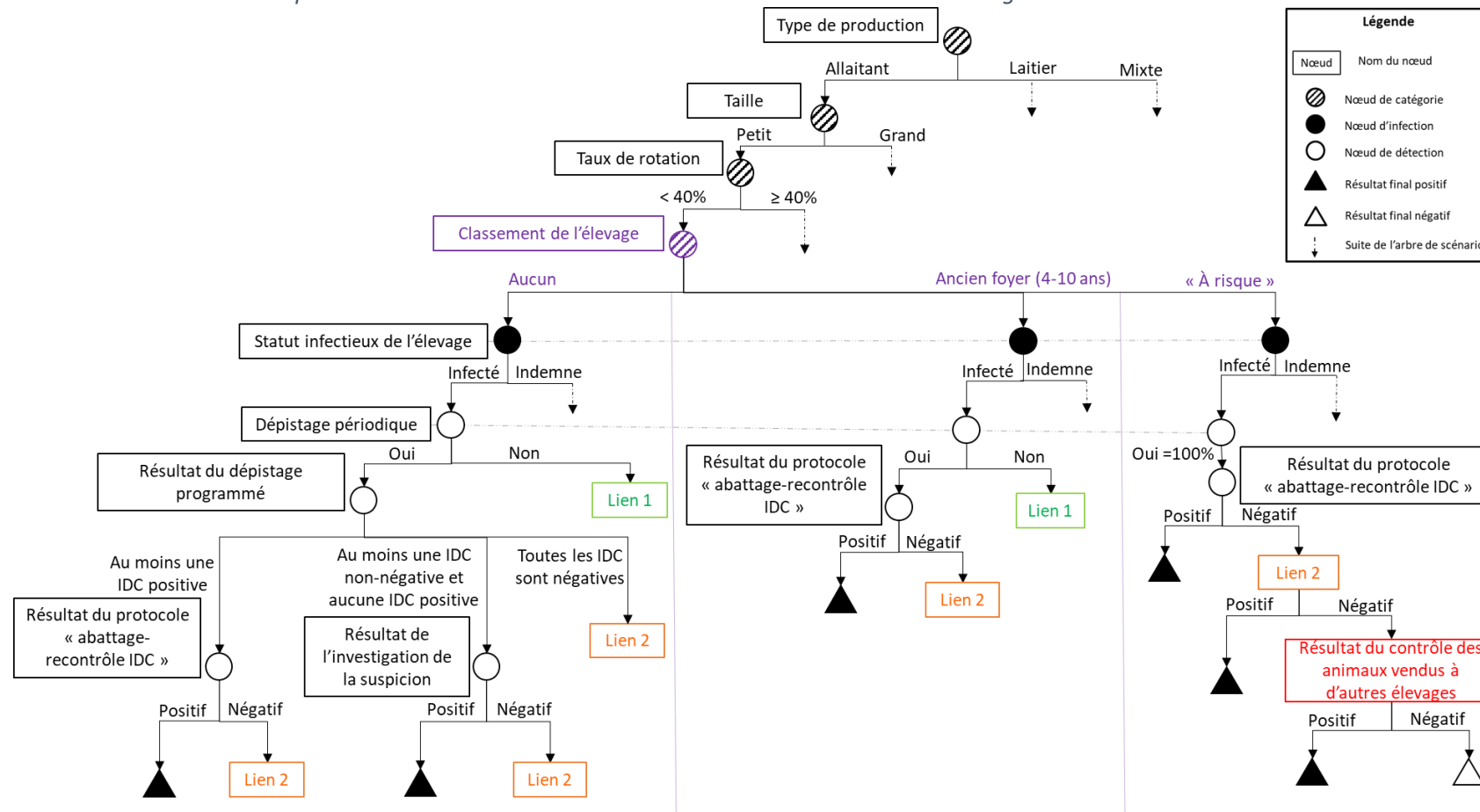
Les nœuds de catégorie caractérisant le type de troupeau (type de production, taille, taux de rotation) ont été conservés. Pour réaliser des simulations à l'échelle départementale, un nœud de catégorie « classement de l'élevage » a été ajouté. Ce nœud correspond au classement de l'élevage, par les gestionnaires de la surveillance, en ancien foyer ou en tant qu'élevage « à risque ». Il influence ainsi le scénario de détection de l'élevage. En effet, en cas de suspicion suite à un dépistage périodique, un ancien foyer (jusqu'à 10 ans) ou un élevage classé « à risque » est systématiquement investigué *via* le protocole « abattage-recontrôle IDC ». De plus, un dépistage annuel est réalisé dans les élevages classés « à risque » et ils sont soumis au dépistage aux mouvements des animaux vendus (Notes de service DGAL/SDSPA/2017-863 et 218-598).

7.2.1.1. Probabilité que l'élevage soit classé « à risque »

Bien que les notes de service de la DGAL (Direction générale de l'alimentation) définissent clairement les situations dans lesquelles les élevages doivent être classés « à risque » (Notes de service DGAL/SDSPA/2017-863 et 218-598), il s'avère qu'en pratique, sur le terrain, les pratiques diffèrent selon le département (communications personnelles F. Chevalier : coordinateur national tuberculose bovine et S. Treynard : adjoint santé animale DDPP38). Malheureusement, il n'existe aucune liste exhaustive centralisée des élevages classés « à risque », qui aurait permis d'estimer facilement la probabilité pour un élevage d'être classé « à risque » dans chaque département.

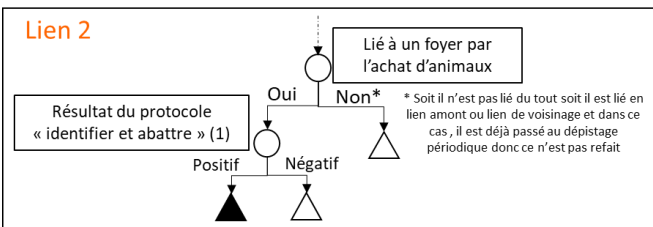
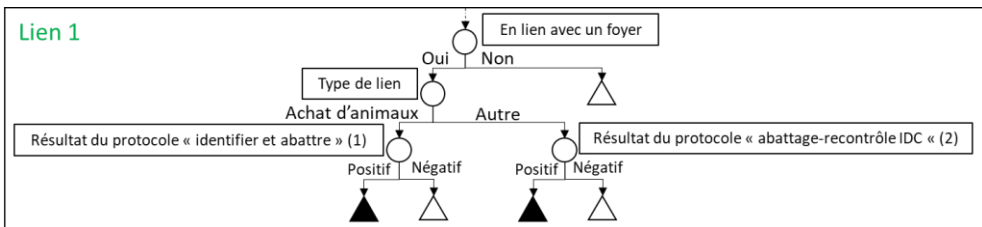
En pratique, sont généralement classés « à risque » : les anciens foyers de moins de trois ans (inclus) et les élevages en « lien aval », dans lesquels l'infection n'a pas été détectée et ayant conservé l'animal en lien (protocole « identifier et tester ») (communication personnelle F. Chevalier). Les autres types

Figure 33. Arbre de scénario utilisé pour modéliser la surveillance ante mortem sur un an dans un élevage



Légende

- Nœud Nom du nœud
- ◉ Nœud de catégorie
- Nœud d'infection
- Nœud de détection
- ▲ Résultat final positif
- △ Résultat final négatif
- ↓ Suite de l'arbre de scénario



(1) Protocole « identifier-et-abatte » = protocole d'investigation d'un lien épidémiologique aval dans lequel les animaux en lien sont systématiquement abattus (cf. Partie II, chapitre 5)

(2) Protocole d'investigation des suspicions suite à un dépistage programmé en élevage (cf. Partie II, chapitre 3)

de lien peuvent également être classés « à risque », mais cela n'est pas systématique et la décision est prise au cas par cas, ils n'ont donc pas été pris en compte dans notre modèle. Dans certains départements, les élevages à fort taux de rotation sont classés « à risque », mais ils ne sont soumis qu'au dépistage des animaux introduits afin de protéger l'élevage de l'éventuelle introduction de l'infection. Nous les avons donc exclus du classement « à risque ». Finalement, dans l'arbre de scénario, les élevages « à risque » ont été définis comme les anciens foyers (1-3 ans) et les élevages en « lien aval » dans lesquels l'animal en lien n'a pas été abattu (protocole « identifier et tester »). La probabilité pour un élevage de type t et du département d d'être classé « à risque » était alors estimée en sommant : i) la probabilité pour un tel élevage d'être un ancien foyer de moins de trois ans (déterminée à partir des données SIGAL de l'année 2016) ; ii) avec le produit des probabilités pour ce même élevage : d'être en lien aval (cf. 7.2.4.1.), d'être investigué par le protocole « identifier et tester » (probabilité fixée à 0,05, sur avis de F. Chevalier), que le bovin en lien soit toujours présent dans l'élevage (cf.5.2) et qu'il ait obtenu un résultat négatif au test IDC (caractéristiques de l'IDC).

7.2.1.2. Probabilité que l'élevage soit un ancien foyer de plus de 3 ans

Pour chaque département et pour chaque type d'élevage, la probabilité pour un élevage d'être un ancien foyer de plus de trois ans a été modélisée par une probabilité fixe correspondant à la proportion d'anciens foyers de plus de trois ans existants en 2016 dans chaque département, issue des données SIGAL.

7.2.1.3. Risques relatifs ajustés d'infection

Pour chacun des facteurs identifiés comme influant sur la probabilité pour un élevage d'être infecté (taille et taux de rotation de l'élevage, classement sanitaire de l'élevage : « à risque » ou ancien foyer de plus de trois ans), un risque relatif d'infection ajusté a été estimé en utilisant l'équation (1) (I.1.3.2.2.3) pour prendre en compte leur plus forte probabilité d'infection.

Tout d'abord, nous avons modélisé un coefficient multiplicateur reflétant le sur-risque d'infection engendré par chacun de ces facteurs. De nombreuses études ont mis en évidence une association statistique entre l'augmentation de la taille du troupeau et l'augmentation de la probabilité pour un troupeau d'être infecté (annexe 28). La plupart de ces études estimaient des OR représentant l'augmentation du risque pour un troupeau d'être infecté lors de l'augmentation de la taille du troupeau d'une unité logarithmique ou en comparant des classes de taille avec les très petits troupeaux, ce qui n'était pas facilement intégrable à notre modèle reposant sur une distinction binaire petits/grands élevages. Pour construire le **coefficient multiplicateur** c_{taille} représentant **l'influence de la taille de l'élevage** sur sa probabilité d'infection par *M. bovis*, nous avons donc choisi de nous appuyer sur la seule étude ayant comparé les élevages de façon binaire (grands vs petits) (Martínez-López *et al.*, 2014). Nous avons ainsi modélisé c_{taille} sous la forme d'une loi normale asymétrique de valeur moyenne de 2 et de bornes d'IC_{95%} 1,4 et 3. Les valeurs de la publication ont été arrondies pour mieux rendre compte de l'incertitude vis-à-vis de ce coefficient.

Concernant l'influence du taux de rotation, la plupart des études s'intéressaient plus particulièrement à l'achat d'animaux provenant d'un marché ou d'un élevage infecté (Ramírez-Villaescusa *et al.*, 2010 ; Broughan *et al.*, 2016) et obtenaient des OR respectivement de 1,95 [1,05-3,63]_{IC95%} et 2,6 [1,20-5,63]_{IC95%}. Une étude s'était toutefois intéressée au nombre d'animaux achetés indépendamment de leur origine et avait montré que l'achat de plus de 27 animaux par an augmentait la probabilité pour un élevage d'être infecté (OR= 1,23 [1,03-1,49]_{IC95%}) (Doyle *et al.*, 2014). Ce nombre de 27 animaux achetés par an correspond à un taux de rotation supérieur à 40 % pour tous les élevages de moins de 68 animaux, ce qui est assez proche des tailles moyennes des élevages de notre modèle. Nous avons donc utilisé les résultats de cette publication pour modéliser le coefficient multiplicateur traduisant l'impact d'un fort taux de rotation sur la probabilité pour un élevage d'être infecté, en utilisant des valeurs arrondies afin de rendre compte de l'incertitude sur ce coefficient. Ainsi, le coefficient multiplicateur modélisant l'influence du taux de rotation de l'élevage sur sa probabilité d'être infecté

par la TB ($c_{rotation}$) a été modélisé par une loi normale asymétrique $N_{asym}(moy=1,2 ; borne IC_{95\%} min=1 ; borne IC_{95\%} max=1,5)$.

Enfin, l'historique de l'élevage vis-à-vis de la TB n'a jamais été formellement mis en évidence en tant que facteur de risque d'infection dans les conditions françaises. Néanmoins certaines études ont pu le mettre en évidence, notamment en Angleterre (Bessell *et al.*, 2012), ainsi qu'en Belgique (Humblet *et al.*, 2009, 2010) (coefficient estimé à 2). De même, une étude française avait anciennement mis en évidence un sur-risque d'infection (OR d'environ 80) dans les anciens foyers assainis par abattage sélectif (par rapport à ceux assainis par abattage total) (Bénet et Dufour, 2009). Toutefois, cette étude avait été réalisée à partir de données anciennes provenant de protocoles d'abattages sélectifs différents de ceux pratiqués aujourd'hui. Compte tenu des résultats de ces études, et étant donné la possible résistance de la mycobactérie dans l'environnement et l'actuelle autorisation en France de l'utilisation de l'assainissement par abattage sélectif (qui présente le risque de conserver un animal infecté dans l'élevage), nous avons donc pris en compte la probabilité accrue pour un **ancien foyer de TB** d'être infecté à l'aide d'un coefficient multiplicateur ($c_{classé}$). À partir des données SIGAL disponibles pour les années 2014 à 2016, nous avons estimé un coefficient de « sur-risque » d'infection pour les anciens foyers en regroupant les élevages soit par département (coefficient moyen de 1,8), soit par type de troupeau (coefficient moyen de 3). Les coefficients étaient variables d'une année à l'autre et la quantité de données disponibles ne permettait pas la mise en évidence de différences significatives entre les types d'élevage. Nous avons donc modélisé ce coefficient, quel que soit le département et le type de troupeau, par une loi de Pert ayant comme minimum 1 (ce qui correspond à une absence de sur-risque d'être infecté pour un élevage qui a déjà été foyer dans les 10 ans), comme valeur la plus probable 2 et comme maximum 10 (coefficient maximal constaté dans les départements).

Les données sur les élevages classés « à risque » n'étant pas disponibles, et les élevages « à risque » comprenant les anciens foyers de moins de trois ans, nous avons fait l'hypothèse que les **élevages « à risque »** avaient un sur-risque d'être infecté du même ordre que celui des anciens foyers de TB et avons donc utilisé le même coefficient $c_{classé}$ pour modéliser l'influence du classement « à risque » sur la probabilité pour un élevage d'être infecté par la TB.

Dans le modèle, les risques relatifs d'infection par la TB de chaque catégorie d'élevage définie par sa taille, son taux de rotation et son classement sanitaire ont été estimés comme présenté dans le tableau 46.

Tableau 46. Calcul du risque relatif d'infection par la TB de chaque catégorie d'élevage, utilisé dans l'arbre de scénario modélisant la surveillance *ante mortem* de la TB dans un élevage

Taille	Taux de rotation	Classement sanitaire	Calcul du risque relatif
Petit	< 40 %	« à risque »	$C_{classé}$
		« ancien foyers > 3 ans »	$C_{classé}$
		Sans classement	1
	≥ 40 %	« à risque »	$C_{rotation} \times C_{classé}$
		« ancien foyers > 3 ans »	$C_{rotation} \times C_{classé}$
		Sans classement	$C_{rotation}$
Grand	< 40 %	« à risque »	$C_{taille} \times C_{classé}$
		« ancien foyers > 3 ans »	$C_{taille} \times C_{classé}$
		Sans classement	C_{taille}
	≥ 40 %	« à risque »	$C_{taille} \times C_{rotation}$
		« ancien foyers > 3 ans »	$C_{taille} \times C_{rotation} \times C_{classé}$
		Sans classement	$C_{taille} \times C_{rotation}$

Légende :

C_{taille} : coefficient multiplicateur modélisant l'influence de la taille de l'élevage sur sa probabilité d'être infecté de TB, il a été modélisé par une loi normale asymétrique $N_{asym}(moy=2 ; borne IC_{95\%} min=1,4 ; borne IC_{95\%} max=3)$;

$C_{rotation}$: coefficient multiplicateur modélisant l'influence du taux de rotation de l'élevage sur sa probabilité d'être infecté de TB, il a été modélisé par une loi normale asymétrique $N_{asym}(moy=1,2 ; borne IC_{95\%} min=1 ; borne IC_{95\%} max=1,5)$;

$C_{classé}$: coefficient multiplicateur modélisant l'influence du classement à risque de l'élevage ou du fait qu'il s'agisse d'un ancien foyer de TB sur sa probabilité d'être infecté de TB, il a été modélisé par une loi de Pert : $Pert(min=1, moy=2, max=10)$.

Finalement, pour chaque catégorie d'élevage, le risque relatif ajusté a été calculé selon l'équation (1) (page 32) afin que la somme des 12 risques relatifs ajustés calculés soit égale à 1.

7.2.2. Probabilité d'infection

Lors d'une première approche, les départements ont été répartis en trois groupes en fonction du nombre de foyers y ayant été détectés entre 2011 et 2016 (0 à 5 foyers, 5 à 10 foyers et plus de 10 foyers). Dans chaque groupe, la prévalence a été fixée respectivement à 0,01 %, 0,02 % et 0,6 %, ce qui correspond à l'incidence apparente moyenne constatée en 2016 dans chaque groupe. Le détail par département est fourni en annexe 29. Par la suite, une autre évaluation a été réalisée en fixant la prévalence à 0,1 % (seuil européen permettant le maintien du statut indemne de TB) pour tous les départements afin de pouvoir comparer l'efficacité et le coût de la surveillance *ante mortem* dans ces départements à prévalence égale. La probabilité résiduelle d'infection d'un élevage a été déterminée dans chaque branche du modèle, en multipliant la prévalence avec le risque relatif ajusté correspondant à la catégorie de l'élevage (7.2.1.3).

La prévalence intra-troupeau a été modélisée tel que décrit au paragraphe II.2.2.1.3.

7.2.3. Dépistage périodique en élevage

7.2.3.1. Probabilité pour un élevage d'être soumis au dépistage périodique

Pour les élevages non classés « à risque », la probabilité d'être soumis au dépistage périodique a été modélisée, pour chaque département, par une valeur fixée d'après les données SIGAL de l'année 2016 (fournissant le nombre d'élevages effectivement dépistés pour la campagne 2016-2017) et le nombre d'élevage existants dans le département au 1^{er} janvier 2016, extrait de la BDNI.

Pour les élevages classés « à risque », qui sont soumis à un dépistage annuel, cette probabilité a été fixée à 1.

7.2.3.2. Protocole de dépistage périodique utilisé

Le protocole appliqué pour le dépistage en élevage dépend à la fois du classement sanitaire de l'élevage (ancien foyer, classement « à risque ») et des résultats aux premières IDC de dépistage (IDC1). Dans les élevages classés « à risque » et dans les anciens foyers, le protocole « abattage-recontrôle IDC » est systématiquement utilisé.

Dans les élevages sans classement sanitaire, le protocole utilisé est conditionné par les résultats obtenus à l'IDC1. Un **nœud de catégorie de détection** supplémentaire, intitulé « **résultat du dépistage programmé** », qui correspond aux résultats de l'élevage à l'IDC1, a donc été ajouté dans l'arbre. Trois branches sont issues de ce nœud : (i) « Au moins une IDC positive », qui se poursuit selon le protocole « abattage et recontrôle IDC » ; (ii) « Que des IDC négatives », qui ne se poursuit par aucune investigation complémentaire et (iii) « Au moins une IDC non négative mais aucune IDC positive », qui se poursuit soit selon le protocole « abattage seul », soit selon le protocole « triage IFN » (figure 33).

La probabilité pour un élevage de taille N de n'obtenir que des résultats négatifs lors du dépistage périodique était calculée dans le modèle en fonction des sensibilité et spécificité strictes de l'IDC (modélisées comme présenté au paragraphe 2.2.1.5.1) et selon les équations (17) et (18) respectivement pour un élevage infecté (I) et pour un élevage indemne (NI).

$$(17) p(\text{tous négatifs} | I) = (1 - Se_{IDC})^{N * pr_intratroupeau} * Sp_{IDC}^{N*(1-pr_intratroupeau)}$$

$$(18) p(\text{tous négatifs} | NI) = Sp_{IDC}^N$$

Pour un élevage de taille N, la probabilité d'obtenir au moins une IDC positive lors du dépistage périodique était calculée selon les équations (19) et (20) respectivement pour un élevage infecté (I) et pour un élevage indemne (NI).

$$(19) p(\geq 1 \text{ IDC+} | I) = 1 - (1 - Se_{IDC \text{ brute}})^{N * pr_intratroupeau} * Sp_{IDC \text{ brute}}^{N*(1-pr_intratroupeau)}$$

$$(20) p(\geq 1 \text{ IDC+} | NI) = 1 - Sp_{IDC \text{ brute}}^N$$

Avec $Se_{IDC \text{ brute}}$ et $Sp_{IDC \text{ brute}}$ la sensibilité et la spécificité du test lorsque les résultats douteux sont considérés comme négatifs, dont la modélisation ($Se_{IDC \text{ brute}} = Se_{IDC} * 0,6$ et $Sp_{IDC \text{ brute}} = 1 - [(1 - Sp_{IDC}) * 0,15]$) a été déduite de données françaises comme détaillé en annexe 30.

La probabilité pour un élevage d'obtenir au moins une IDC non négative, mais aucune IDC positive, était déduite par complément à un des deux probabilités précédentes.

Lorsqu'au moins une IDC est non-négative, mais qu'aucune n'est positive, le protocole appliqué peut être soit le protocole « abattage seul », soit le protocole « triage IFN ». Le choix du protocole se fait alors au cas par cas sur décision des autorités sanitaires. Les protocoles mis en œuvre ont pu être déduits à partir de l'analyse des données concernant les résultats de la campagne de dépistage 2015-2016 disponibles dans SIGAL. Nous avons ainsi estimé que dans 37 départements, le protocole « abattage seul » était utilisé dans 100 % des cas et qu'il était utilisé moins fréquemment pour les départements suivants : Bouches-du-Rhône (13) (11 % de protocole « abattage seul »), Haute-Corse (2B) (7 %), Côte-d'Or (21) (7 %), Pyrénées-Orientales (66) (0%) et Haute-Vienne (87) (79 %). Ce sont ces proportions qui ont été utilisées dans notre arbre de scénario. Pour les départements dans lesquels nous ne disposons pas de données suffisantes (54 départements), la probabilité d'utiliser le protocole « abattage seul » a été modélisée par une loi de PERT, paramétrée par avis d'expert (Fabrice Chevalier, coordinateur national tuberculose bovine) : PERT(min=0,2 ; mode=0,4 ; max=0,6).

7.2.3.3. Sensibilité et spécificité des protocoles

Dans le modèle, les probabilités d'obtenir un résultat positif ou négatif au protocole « abattage-recontrôle IDC », utilisées dans les branches « anciens foyers » et « à risque », étaient estimées à chaque itération *via* l'arbre de scénario correspondant à ce protocole, et prenant en compte les adaptations de pratiques de l'IDC par les VS, comme décrit dans le chapitre 3.

Pour les élevages sans classement sanitaire particulier, ces probabilités étaient estimées conditionnellement à l'obtention d'au moins un résultat positif à l'IDC1 pour le protocole « abattage-recontrôle IDC » et conditionnellement à l'obtention d'au moins un résultat non-négatif à l'IDC mais d'aucun résultat positif pour les protocoles « abattage seul » et « triage IFN », selon la méthode décrite en annexe 31.

7.2.4. Enquêtes épidémiologiques

7.2.4.1. Probabilité pour un élevage d'être en lien aval d'un foyer de TB

Pour chaque département, nous avons échantillonné dans la BDNI 2 000 troupeaux de chaque type de production. Pour chacun de ces troupeaux, nous avons estimé leur taille au premier janvier 2016 et leur taux de rotation à la même date, afin d'avoir un échantillon d'élevages pour chaque type de troupeau et pour chaque département. Pour chaque élevage de ces échantillons, la liste des animaux achetés entre le 1^{er} Janvier 2010 et le 1^{er} janvier 2016 (c'est-à-dire sur une période de cinq ans) et les numéros d'identification des élevages d'origine de ces animaux ainsi que leur taille, type de production, taux de rotation et département ont été extraits de la BDNI. Ainsi, pour chaque élevage

de l'échantillon, les élevages potentiellement générateurs d'un lien aval en 2016 ont été identifiés (« élevages vendeurs »). La probabilité pour chacun de ces élevages d'être foyer en 2016 a été estimée en multipliant la prévalence fixée dans le modèle pour le département d'appartenance (cf.7.2.2) par le risque relatif ajusté associé à son type d'élevage (cf.7.2.1.3). Puis, pour chacun des élevages échantillonnés, la probabilité qu'au moins un de ses élevages vendeurs soit foyer en 2016 – correspondant donc à la probabilité pour l'élevage de l'échantillon d'être en lien aval avec un foyer de TB- (p_{lienaval}) a été estimée *via* l'équation (21) où $p_{\text{foyer } k}$ était la probabilité, pour le $k^{\text{ième}}$ élevage vendeur, d'être foyer en 2016 et k le nombre d'élevages vendeurs.

$$(21) \quad p_{\text{lienaval}} = 1 - \prod_k (1 - p_{\text{foyer } k})$$

Ainsi, pour chaque type d'élevage de chaque département, les valeurs minimale, maximale et moyenne de la probabilité pour un élevage d'être en lien aval en 2016 ont été estimées et ont été utilisées comme paramètres pour les lois de Pert permettant de modéliser cette probabilité dans le modèle. Lorsque l'information était manquante dans un département pour un type de troupeau (car celui-ci était très peu ou pas représenté dans le département), cette probabilité a été fixée à 0.

7.2.4.2. Protocole d'investigation du lien aval utilisé

La probabilité d'utilisation du protocole « identifier et abattre » pour l'investigation d'un lien aval au lieu du protocole « identifier et tester » a été fixée à 95 %, sur un avis d'expert (F. Chevalier, coordinateur national TB).

7.2.4.3. Probabilité pour un élevage d'être en lien amont d'un foyer de TB

En 2016, 576 APMS pris pour cause de lien épidémiologique ont été saisis dans la base de données SIGAL. À partir de ces données, la probabilité pour un élevage d'un département et d'un type donné d'être en lien épidémiologique avec un foyer de TB a été estimée. Si la probabilité d'être en lien ainsi estimée était inférieure ou égale à celle d'être en lien aval (7.2.4.1) -ce qui était le cas pour 56 % des départements-, alors la probabilité d'être en lien était modélisée comme égale à la probabilité d'être en lien aval (impliquant l'hypothèse de l'absence de lien amont ou de voisinage). La probabilité d'être en lien amont ou de voisinage était alors déduite par soustraction de la probabilité d'être en lien aval à la probabilité d'être en lien (tous type de lien confondu). L'investigation des liens amont ou de voisinage était modélisée selon le protocole « abattage-recontrôle IDC ».

7.2.5. Dépistage aux mouvements

Nous avons fait l'hypothèse que le dépistage lors des mouvements de bovins n'était réalisé que dans les élevages classés « à risque » et que l'IDC était systématiquement utilisée. La probabilité d'obtenir un résultat positif ou négatif à ce dépistage aux mouvements sur une période d'un an a été estimée en fonction du statut infectieux de l'élevage, par type de troupeau et par département, en utilisant l'arbre de scénario modélisant le dépistage aux mouvements *via* l'IDC, en prenant en compte les adaptations de pratiques des VS comme décrit dans le chapitre 6.

7.2.6. Coûts

Un coût a été associé à chaque branche de l'arbre de scénario de la même façon que cela a été décrit dans les chapitres précédents, mais en tenant compte des différences de coûts qui existent entre les départements. Ainsi, les coûts des tests de dépistage *ante mortem* ont été fixés conformément aux conventions départementales (ou régionales) passées entre les VS et les éleveurs que nous avons pu collecter (cf. 2.2.3.1). Lorsque la convention n'était pas disponible, ils ont été modélisés par une loi de distribution identique à celle décrite dans le paragraphe 2.2.3.1. De la même façon, les coûts des analyses de laboratoire ont été modélisés avec les données collectées par l'intermédiaire des questionnaires adressés aux LDA (cf. 2.2.3.1). Nous avons fait l'hypothèse que chaque département

envoyait les prélèvements collectés sur son territoire au LDA le plus proche géographiquement, ce qui nous a permis d'attribuer pour chaque département un coût à chaque analyse de laboratoire. Les autres coûts (indemnisation des animaux abattus et coûts indirects) ont été modélisés de la même façon quel que soit le département et tels que décrit dans les chapitres précédents.

7.2.7. Calculs

7.2.7.1. Probabilité de détecter l'infection dans les départements

Pour chaque département, la probabilité d'occurrence de chaque branche de l'arbre de scénario a été calculée en multipliant entre elles les probabilités d'occurrence des sous-branches la composant. Puis la probabilité de détecter la TB dans un élevage du département ($p(I \cap D)_{\text{élevage}}$) était estimée en sommant la probabilité d'occurrence des branches menant à la détection de l'infection dans un élevage infecté.

Cette probabilité a ainsi été estimée pour chaque département, pour une prévalence de 0,1 % et pour une prévalence fixée en fonction du groupe auquel appartenait le département (cf.7.2.2), ce qui a permis d'estimer la probabilité de détecter l'infection dans chacun des départements pour ces valeurs de prévalence (c'est-à-dire la probabilité de détecter au moins un élevage infecté dans le département), selon l'équation (22).

(22) probabilité de détection = $1 - (1 - p(I \cap D)_{\text{élevage}})^N$ où N est le nombre d'élevages dans le département.

De plus, la part de chaque composante de la surveillance *ante mortem* dans la probabilité de détecter l'infection dans un département a été estimée, pour chaque département.

7.2.7.2. Calcul des coûts

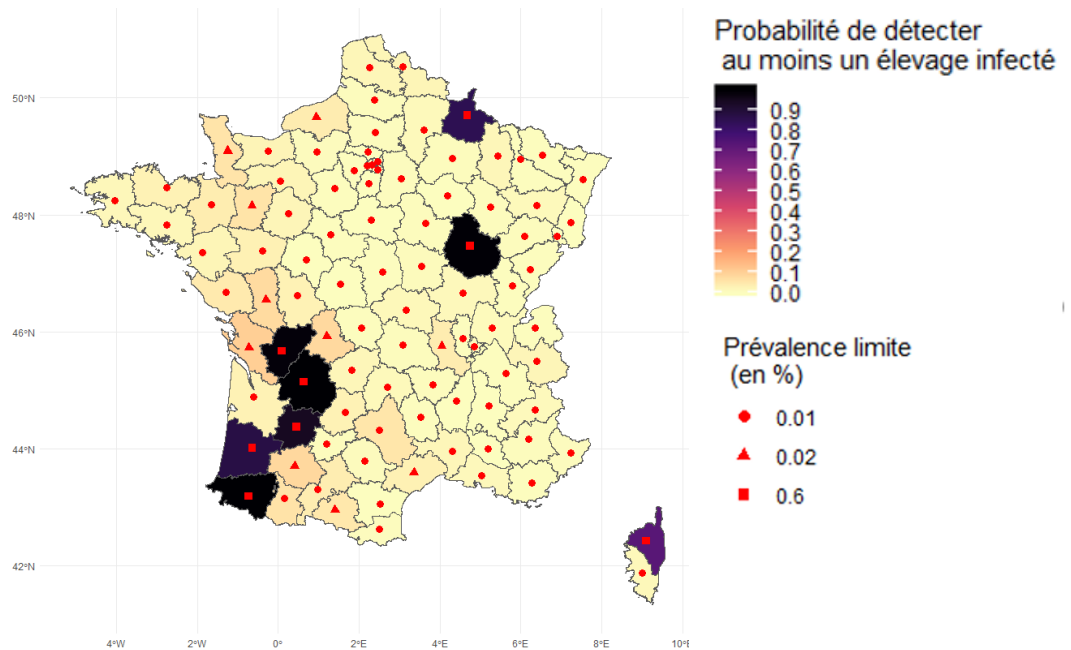
Pour chaque département, le coût total moyen par élevage de la surveillance *ante mortem* de la TB a été estimé en sommant les coûts associés à chaque branche, pondérés par leur probabilité d'occurrence.

7.3. Résultats

7.3.1. Efficacité du dispositif de surveillance *ante mortem* de la TB

La probabilité de détecter l'infection dans les départements était d'autant plus importante que la prévalence fixée était élevée. Toutefois, à prévalence égale, certains départements étaient plus susceptibles de détecter l'infection. Par exemple, pour une forte prévalence, la Côte d'Or, la Charente, le Lot-et-Garonne et les Pyrénées-Atlantiques avaient une plus forte probabilité de détecter l'infection que les Landes et les Ardennes (figure 34). En comparant la probabilité de détecter l'infection dans les départements à prévalence fixée égale (figure 35), les Pyrénées-Atlantiques étaient le département avec la probabilité de détection la plus forte, suivi par la Dordogne et la Charente. Les départements du grand Ouest avaient une assez bonne probabilité de détecter l'infection pour une prévalence fixée à 0,1 %, contrairement aux départements du centre et du Sud-Est de la France.

Figure 34. Estimation de la probabilité de détecter, via la surveillance ante mortem, au moins un élevage infecté dans les départements français pour une prévalence limite fixée en fonction du nombre de foyers recensés entre 2011 et 2016



La probabilité pour un élevage infecté d'être détecté au cours d'une année était la plus élevée dans les départements avec une forte pression de surveillance (dépistage périodique) (figure 36 et figure 37).

Figure 35. Estimation de la probabilité de détecter, via la surveillance ante mortem, au moins un élevage infecté dans les départements français pour une prévalence limite fixée à 0,1 %

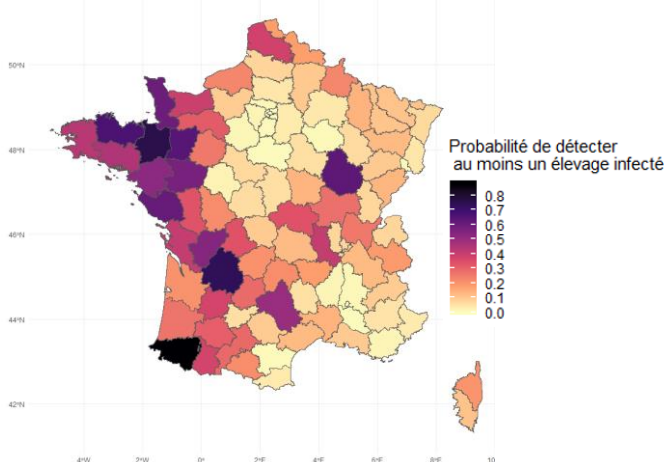


Figure 36. Probabilité qu'un élevage infecté soit détecté pour une prévalence limite fixée à 0,1 %

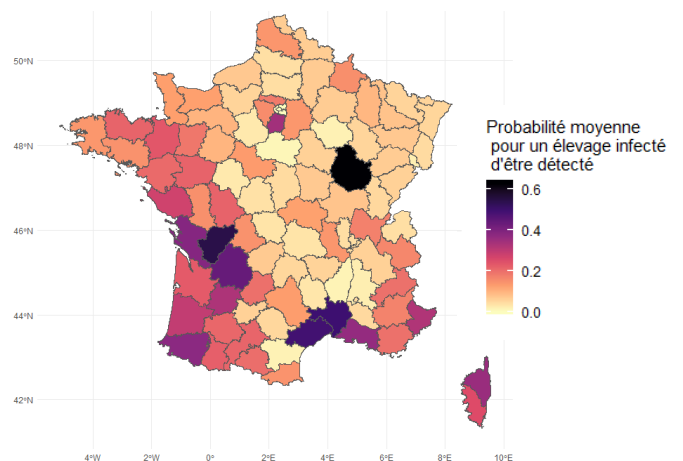
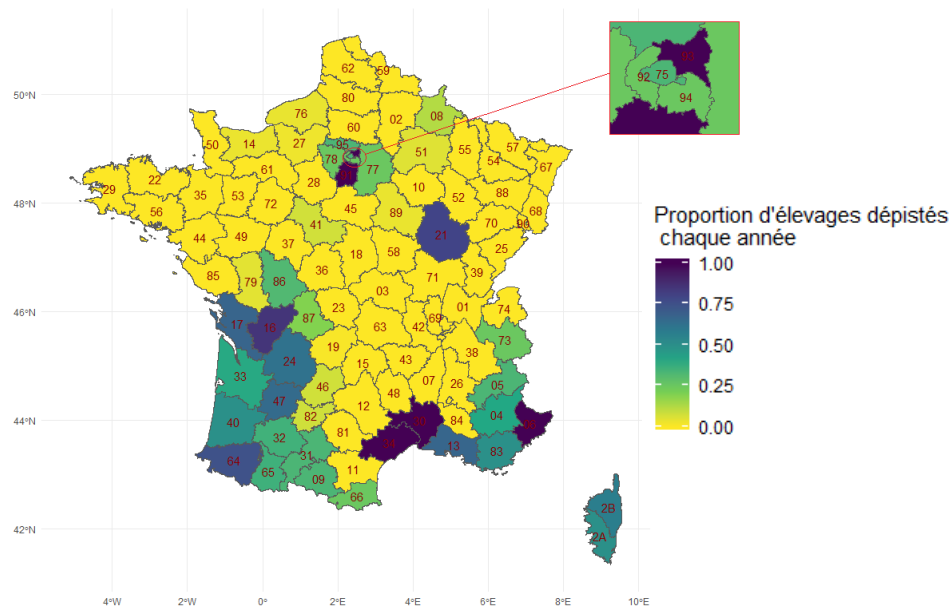


Figure 37. Proportion d'élevages soumis au dépistage périodique chaque année tel que modélisé dans l'arbre de scénario et code insee des départements



7.3.2. Part de chaque composante dans la sensibilité globale du dispositif de surveillance *ante mortem*

Quel que soit le département, la participation du dépistage aux mouvements à la sensibilité globale du système était négligeable (au maximum 0,1 % de la sensibilité globale).

Dans les départements où le dépistage périodique en élevage est arrêté (50 départements), 100 % de la sensibilité globale était assurée par l'investigation des liens aval, sauf pour l'Ardèche (07) et le Cantal (15) dans lesquels l'investigation des liens amonts participaient également à la sensibilité globale.

Dans les départements sans infection récente, l'investigation des liens épidémiologiques aval assurait la majorité de la sensibilité du dispositif de surveillance *ante mortem*, comme l'illustre la figure 38 qui a été restreinte aux départements pour lesquels la probabilité de détecter l'infection de TB dans le département était supérieure à 25 %. Dans les départements dans lesquels le dépistage périodique est maintenu ou dans lequel un zonage avait été mis en place en 2016 (Charente-Maritime (17), Haute-Garonne (31), Gers (32), Lot (46), Hautes-Pyrénées (65), Deux-Sèvres (79) et Haute-Vienne (87)), cette composante assurait une part non négligeable de la sensibilité globale du dispositif (figure 37).

Dans les départements avec une prévalence apparente élevée (0,6 %), le dépistage périodique était la composante la plus susceptible de permettre la détection d'un élevage infecté, l'investigation des liens aval permettant également la détection d'une part non négligeable des élevages infectés (figure 39).

Figure 38. Part de chaque composante de surveillance dans la probabilité de détecter l'infection, pour une prévalence limite de 0,1 % pour les départements non infectés récemment et pour lesquels cette probabilité est supérieure à 25 %

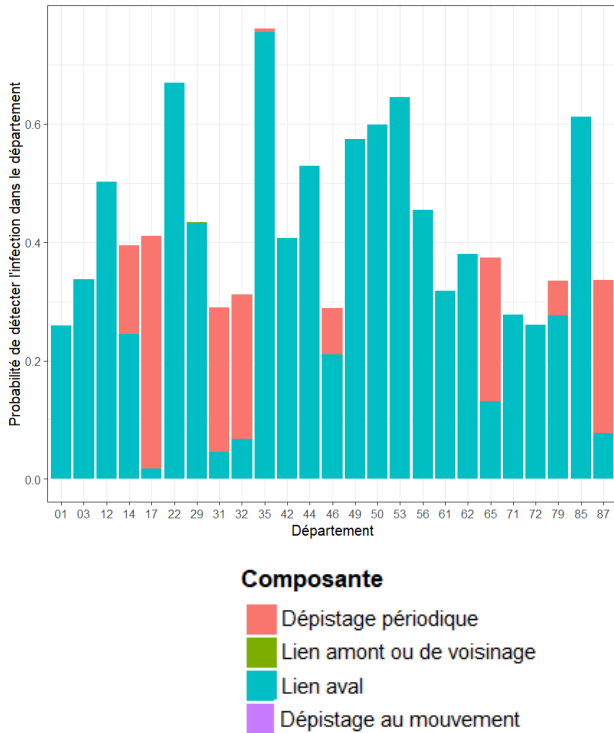
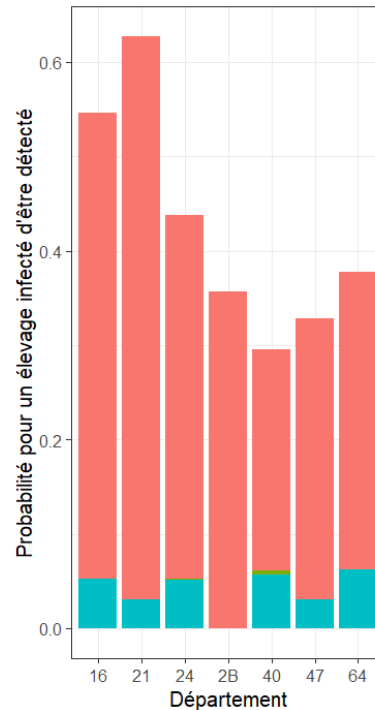


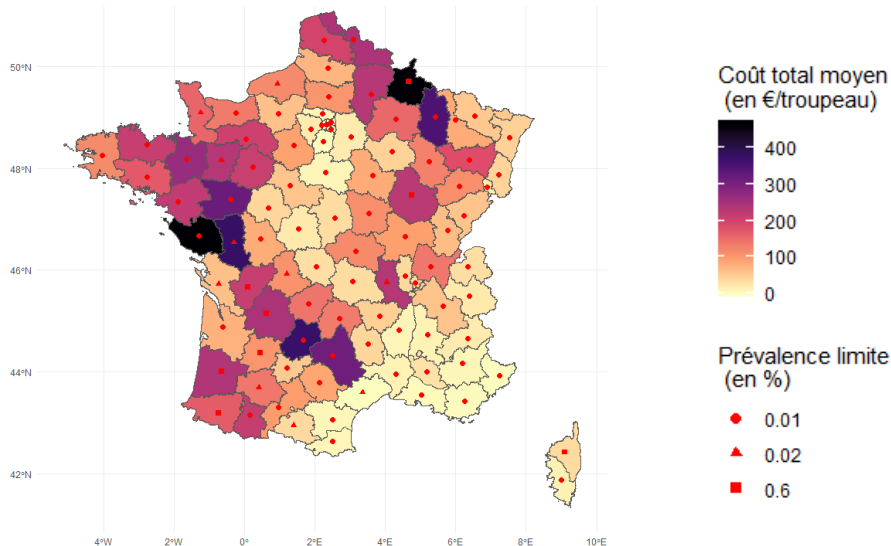
Figure 39. Part de chaque composante dans la probabilité pour un élevage infecté d'être détecté, dans les départements avec une prévalence fixée à 0,6 % dans le modèle



7.3.3. Coût total moyen de la surveillance *ante mortem*

Le coût total moyen de la surveillance de la TB sur un an en prenant en compte l'ensemble des élevages du département, estimé dans chaque département, allait de 0 €/troupeau (dans les départements avec une prévalence fixée très faible et dans lesquels le dépistage est arrêté) à 462 €/troupeau (figure 40). Les départements de Vendée (85) et des Ardennes (08) étaient les départements avec le coût total moyen par troupeau le plus élevé.

Figure 40. Coût annuel moyen de la surveillance *ante mortem* de la TB en euros/troupeau



7.4. Discussion

7.4.1. Matériel et méthode utilisée

La probabilité pour un élevage d'être classé « à risque » a été estimée par le calcul en utilisant la définition des élevages à risque la plus couramment utilisée sur le terrain. Cependant, chaque département semblait avoir sa propre interprétation du classement à risque. Il est donc possible que le nombre d'élevages classés à risque ait été surestimé pour certains départements, induisant ainsi une surestimation de la sensibilité globale, en particulier de la sensibilité apportée par le dépistage périodique.

Nous avons fait l'hypothèse que les élevages classés « à risque » avaient le même sur-risque d'infection que les élevages anciens foyers de TB. Cette hypothèse peut être discutée pour les foyers classés « à risque » suite à l'investigation d'un lien épidémiologique aval. En effet dans ces élevages, contrairement aux anciens foyers, la TB n'a à priori jamais été présente, et le classement « à risque » découle donc uniquement de la détention d'un animal issu d'un élevage foyer, ayant obtenu un résultat négatif à l'IDC et non abattu. Or, aucune donnée ne permet de statuer sur la valeur du sur-risque entraîné par ce lien épidémiologique par rapport à celui des anciens foyers. Toutefois, la part des élevages classés « à risque » suite à un lien aval sans abattage de l'animal en lien (protocole « identifier et tester » de l'investigation d'un lien aval) est à priori faible car ce protocole est rarement choisi (communication personnelle, F. Chevalier). La majorité des élevages « à risque » seraient donc des anciens foyers de TB, ce qui justifie notre hypothèse. Les anciens foyers classés « à risque » (de moins de trois ans inclus) sont plus récents et pourraient donc avoir un sur-risque d'infection plus important que des anciens foyers plus anciens (4 à 10 ans). Malheureusement, les données et études actuelles dans les conditions françaises ne permettent pas d'estimer cette possible différence.

La prévalence fixée dans chaque département pour estimer l'efficacité du dispositif en fonction du niveau d'infection du département s'appuie sur des données réelles de l'incidence apparente moyenne constatée en 2016 dans chaque groupe de département. En France, la prévalence et l'incidence ne sont pas exactement égales puisque certains élevages peuvent rester foyers jusqu'à trois ans (durée maximale constatée pour un abattage sélectif (Poirier, 2017)) ; néanmoins, ces élevages ne sont pas concernés par les mesures de surveillance car l'infection y a déjà été détectée, ils sont donc en phase d'assainissement (abattage total ou sélectif).

La probabilité pour un élevage d'être soumis au dépistage périodique a été fixée d'après les données disponibles dans SIGAL et dans la BDNI pour la campagne 2016-2017. Le pourcentage d'élevages testés obtenus sous SIGAL était, pour la plupart des départements, cohérent avec les rythmes de dépistage officiels sauf en Côte d'Or où seuls 80 % des élevages avaient été testés alors que le dépistage y était officiellement annuel. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la Côte d'Or bénéficiait déjà d'un allègement du dépistage dans certaines zones. Pour les départements en zonage, il est possible que certains élevages enregistrés comme soumis au dépistage périodique correspondent en réalité aux élevages en suivi (c'est-à-dire les élevages « à risque »), ce qui entraînerait une surestimation de la proportion d'élevages soumis au dépistage périodique et donc de la sensibilité apportée par cette composante du système de surveillance. Par ailleurs, depuis la réalisation de ce travail, les rythmes de dépistage ont évolué dans certains départements, notamment par arrêt du dépistage ou passage en zonage. Nos estimations seraient donc à actualiser à chaque modification du rythme de dépistage dans un département.

Pour les protocoles utilisés dans le cadre du dépistage périodique, nous avons simplifié le scénario de la prise de décision. En effet, le choix du protocole à appliquer est fait au cas par cas en fonction de la

situation épidémiologique de l'élevage et des résultats obtenus à l'IDC1, qui permettent d'estimer qualitativement la probabilité que l'élevage suspect soit effectivement infecté (suspicion forte impliquant l'utilisation du protocole « abattage-recontrôle IDC » ou faible impliquant l'utilisation du protocole « abattage seul » ou du protocole « triage IFN »). Cette estimation se fait ainsi selon les résultats obtenus à l'IDC1 (un résultat positif à l'IDC entraînant, par application de la note de service DGAL/SDSPA/2016-1001, une suspicion forte) et selon le classement « à risque » ou « ancien foyer » de l'élevage -critères pris en compte dans notre modèle, mais également sur d'autres critères (résultats d'ID, présence de faune sauvage infectée dans la zone etc.) qui n'ont pas pu être pris en compte dans notre modèle. Ainsi, il est possible que nous ayons légèrement sous-estimé la proportion de « suspicions fortes », et donc la probabilité d'application du protocole « abattage-recontrôle IDC », qui était le protocole le plus sensible et le plus couteux (cf. II.2.3), entraînant ainsi une sous-estimation de la sensibilité globale du dispositif en particulier dans les départements du Sud-Ouest où la faune sauvage est très infectée.

Dans les départements où elles étaient disponibles, les données SIGAL ont été utilisées pour modéliser les probabilités d'utilisation du protocole « abattage seul » et du protocole « triage IFN » en cas de suspicion faible. À partir des résultats de tests enregistrés dans SIGAL pour les élevages suspects de ces départements, nous avons déduit le protocole utilisé. Toutefois, ces résultats sont parfois manquants et nous n'avons donc pu identifier les protocoles utilisés que pour 58 % des 1 539 suspicions enregistrées sous SIGAL, suite à la campagne de dépistage de 2015-2016. De plus, il est possible que les interventions aient été enregistrées de façon différentielle selon le protocole utilisé. Ainsi, les proportions d'utilisation de chaque protocole (« triage IFN » ou « abattage seul »), estimées à partir de ces données et utilisées dans notre modèle, peuvent être éloignées de la réalité de terrain et avoir entraîné, dans certains départements, une légère surestimation de la sensibilité, si l'utilisation du protocole « abattage seul » a été surestimé ou une sous-estimation dans le cas inverse.

Nous n'avons pas pu prendre en compte la diversité des pratiques des VS en fonction du département (chapitre 3). Pour améliorer l'estimation de la sensibilité globale du dispositif, il serait donc nécessaire de réaliser des études sociologiques plus approfondies dans quelques départements d'intérêt, afin d'y collecter toutes les informations détaillées spécifiques au département, ce qui permettrait d'obtenir une estimation plus proche de la réalité de terrain et de diminuer l'incertitude des estimations. Nos estimations permettent donc de comparer l'efficacité du dispositif dans chaque département à pratiques des VS supposées égales, ce qui n'est certainement pas le cas en réalité.

Le dépistage aux mouvements s'applique lorsque le délai entre le départ de l'élevage vendeur et l'arrivée chez l'acheteur d'un animal est strictement supérieur à six jours ainsi que dans les élevages classés « à risque » (cf. I.2.3.2.1.2). Le cas des échanges de plus de six jours n'a pas été pris en compte dans notre modèle compte tenu de leur rareté, du manque d'informations à leur sujet et de la probabilité très faible qu'ils puissent permettre la détection de l'infection d'un élevage. Aucune donnée centralisée suffisamment fiables n'était disponible sur la proportion des animaux vendus par des élevages « à risque » qui sont effectivement soumis à un test de dépistage au moment de leur vente. Nous avons donc fait l'hypothèse que tous les animaux vendus par des élevages classés « à risque » (à l'exception des animaux destinés à l'engraissement) étaient soumis au dépistage. Cette hypothèse est sans doute optimiste pour certains départements. En effet, vérifier si un animal provient d'un cheptel « à risque » est actuellement très fastidieux *via* SIGAL (car cela nécessite une manipulation prenant 10 à 15 minutes par animal). Dans certains départements comme la Côte-d'Or, une personne du GDS travaille à temps complet sur cette vérification, mais ce n'est pas le cas dans tous les départements où ce dépistage n'est donc pas systématiquement appliqué (communication personnelle Fabrice Chevalier). La probabilité de détecter l'infection *via* le dépistage des animaux vendus par les élevages « à risque » a donc, pour la plupart des départements, été surestimée.

La probabilité pour un élevage d'être en lien épidémiologique (aval, amont ou de voisinage) a été estimée par type d'élevage et pour chaque département à partir des données SIGAL, mais l'information sur les origines de la suspicion n'était pas disponible pour environ un quart des 1 954 APMS enregistrés sous SIGAL au cours de l'année 2016. Le nombre de suspicions dues aux investigations des liens épidémiologiques a donc probablement été sous-estimé, causant la sous-estimation de la probabilité pour un élevage d'être en lien amont ou de voisinage (car cette probabilité était déduite par la soustraction de la probabilité d'être en lien aval à la probabilité d'être en lien épidémiologique). Ainsi, la part de l'investigation des liens amont et de voisinage a certainement été sous-estimée dans notre étude. Toutefois, les liens épidémiologiques amont sont souvent investigués lors de la campagne de dépistage périodique de l'année suivante (communication personnelle F. Chevalier), ils ont donc été indirectement pris en compte dans la « composante dépistage périodique » du modèle. De plus, les liens de voisinage n'existent, par définition, que dans les départements avec des foyers domestiques ou sauvages de TB, mais dans ces départements, un dépistage annuel est en général en place, à minima dans les zones autour des foyers, et un élevage déjà testé la même année dans le cadre du dépistage périodique ne sera pas à nouveau soumis au dépistage en cas de lien de voisinage (le dépistage réalisé dans l'année fait foi). Il semble ainsi cohérent que la majorité des liens épidémiologiques investigués soient des liens aval.

De plus, dans certains départements, la probabilité d'être en lien épidémiologique (aval, amont et de voisinage) déduite de SIGAL était inférieure à la probabilité d'être en lien aval, estimée à partir des données de la BDNI et de l'incidence apparente dans chaque département. Cela peut s'expliquer soit par des défauts d'enregistrement dans SIGAL des élevages investigués suite à un lien épidémiologique, soit par une réelle non-investigation des liens dans ces départements.

Tableau 47. Bilan des paramètres surestimés et sous-estimés

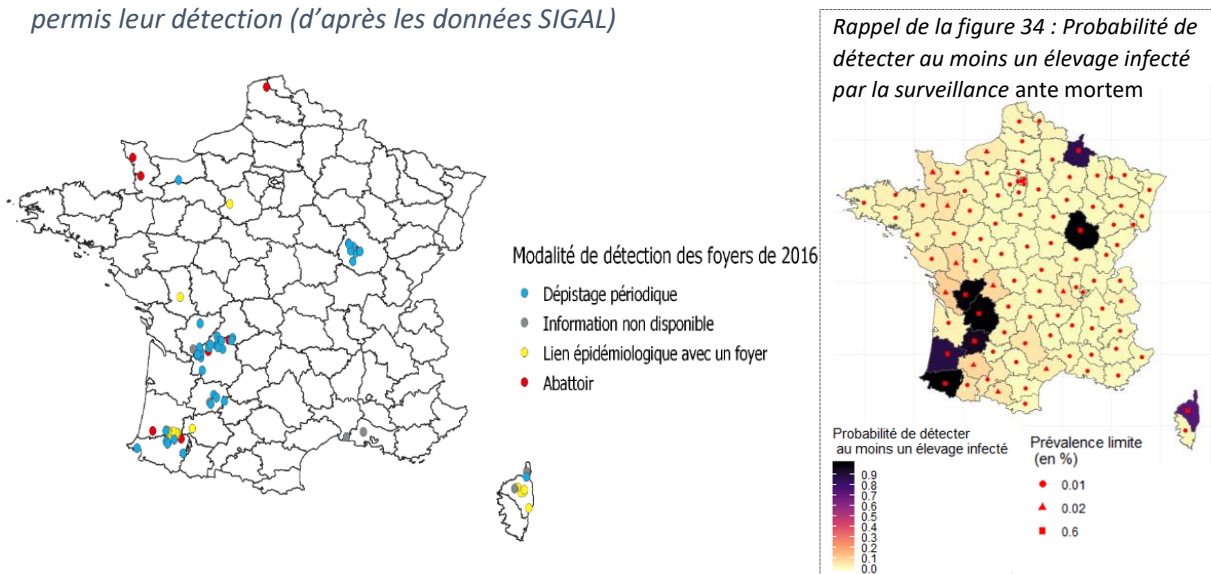
Paramètres surestimés	Paramètres sous-estimés
+ probabilité pour un élevage d'être « à risque »	- probabilité d'être infecté pour les élevages situés dans les zones soumises à zonages
+ pour les départements en zonage : proportions d'élevages soumis au dépistage périodique	- proportion d'utilisation du protocole « abattage-recontrôle » (en particulier dans le Sud-Ouest)
+ sensibilité du dépistage aux mouvements	- probabilité pour un élevage d'être en lien amont ou en lien de voisinage

7.4.2. Résultats de l'évaluation

7.4.2.1. Efficacité du dispositif

La probabilité de détecter au moins un élevage infecté, estimée pour chaque département (figure 34), est cohérente avec la localisation des foyers détectés en 2016 (figure 41). Des foyers ont en effet été détectés dans les départements pour lesquels la probabilité de détecter la TB était estimée importante ; dans les départements avec une faible probabilité de détection par la surveillance *ante mortem*, la surveillance *post mortem* a permis de détecter des foyers.

Figure 41. Foyers détectés pendant l'année 2016 et composante du système de surveillance ayant permis leur détection (d'après les données SIGAL)



En l'absence de dépistage périodique, le système de surveillance *ante mortem* assurait une surveillance satisfaisante dans les départements dans lesquels il existait un risque non négligeable pour un élevage d'être contaminé *via* l'introduction d'un animal infecté issu d'un foyer (figure 36 et figure 42). En particulier, les départements du grand Ouest bénéficient d'une relativement forte probabilité de détecter l'infection, malgré un arrêt du dépistage périodique, assurée par la composante « investigation des liens épidémiologiques » (figure 42). Cela s'explique par la probabilité moyenne plutôt importante pour un élevage de ces départements d'être en lien avec un foyer de TB (figure 42) associée à un grand nombre d'élevages (figure 43) et par le type d'élevage majoritaire (laitier) qui, par sa répartition du nombre d'animaux de plus de 24 mois, assure une sensibilité de l'investigation d'un lien légèrement meilleure que pour les élevages allaitants. Ce résultat souligne l'importance de la mise en œuvre systématique des investigations dans les élevages identifiés en tant que lien aval avec un foyer de TB. Dans les autres départements sans dépistage périodique, la probabilité de détecter l'infection à la prévalence limite de 0,1 % par la surveillance *ante mortem* est faible. Toutefois, la surveillance *post mortem* permet d'améliorer la probabilité globale de détection. De plus, si ces départements sont indemnes (comme le suggère l'arrêt du dépistage périodique) et que leurs élevages ont peu de risque d'être en lien avec un foyer de TB alors la probabilité qu'ils soient contaminés par l'agent de la TB est très faible et à priori surveillée *via* l'investigation des liens épidémiologiques.

Dans les zones avec une forte incidence apparente, la probabilité pour un élevage infecté d'être détecté est satisfaisante. En particulier en Côte-d'Or (21), la probabilité pour un élevage infecté d'être détecté était supérieure à 60 % au cours d'une période d'étude d'un an, alors même que la sensibilité du dépistage périodique dans ce département était sans doute sous-estimée (chapitre 3). Ainsi, sur une période de deux ans, un élevage infecté de Côte d'Or aurait une probabilité de 100 % d'être détecté. Ce résultat semble cohérent avec le succès de la lutte et de la surveillance en Côte d'Or, dont le nombre de foyers a fortement diminué (Delavenne *et al.*, 2019). Dans les départements du Sud-Ouest, la probabilité de détecter un élevage infecté était moins élevée, mais permettait tout de même d'approcher les 100 % après deux à trois années de surveillance consécutives.

Ces résultats ne prennent pas en compte, dans les départements en zonage, la probabilité d'infection à priori plus élevée pour les élevages de la zone par rapport aux élevages hors zonage du département : on peut donc espérer, dans ces départements, une meilleure sensibilité du dispositif.

Figure 42. Probabilité moyenne pour un élevage d'être en lien épidémiologique aval avec un foyer de TB, utilisée dans l'arbre de scénario

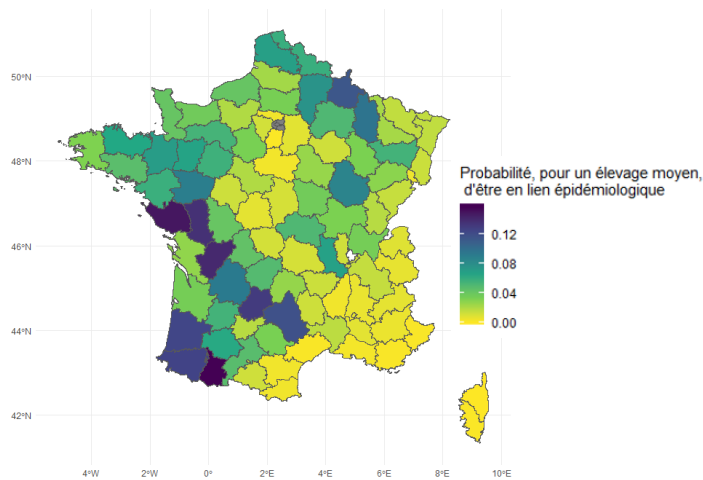
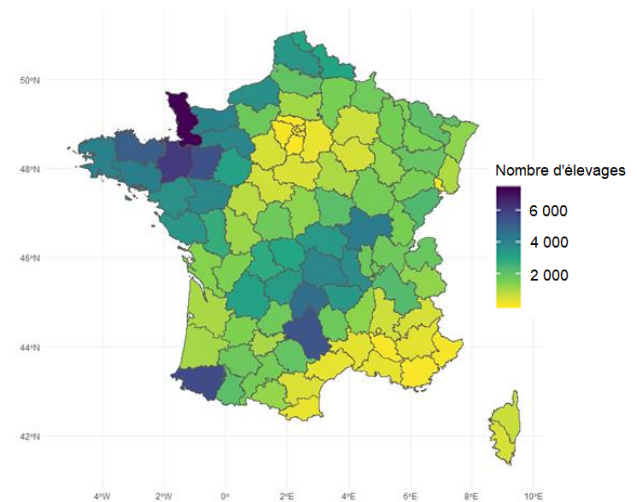


Figure 43. Nombre d'élevages bovins enregistrés dans la BDNI au 1^{er} Janvier 2016



7.4.2.2. Part de chaque composante de la surveillance

Malgré les hypothèses optimistes concernant le dépistage aux mouvements (7.4.1), cette composante du système de surveillance *ante mortem* ne participe pas de façon efficace à la détection de la TB dans les élevages. Cette approche à l'échelle départementale semble donc confirmer que l'arrêt du dépistage aux mouvements aurait un impact négligeable sur l'efficacité globale de la surveillance. Cette composante étant assez contraignante pour les acteurs de terrain et de très faible efficacité, son interruption semble donc logique, d'autant plus qu'actuellement, le dépistage aux mouvements des animaux issus d'élevages « à risque » est à priori très peu appliqué sur le terrain (7.4.1).

Dans les départements fortement infectés, le dépistage périodique était la composante assurant majoritairement à un élevage infecté une probabilité élevée d'être détecté (figure 39), soulignant l'importance du dépistage périodique dans le contrôle de la TB.

Dans les départements indemnes, la probabilité de détecter l'infection à une prévalence limite de 0,1 % était assez élevée dans les départements dont les élevages ont une forte probabilité d'être en lien aval avec un élevage infecté, comme pour les départements de l'Ouest (figure 35), pour lesquels la bonne sensibilité globale du dispositif de surveillance était assurée dans le modèle par l'investigation des liens aval seuls puisque le dépistage périodique y était arrêté. Ainsi, nous avons montré qu'il est possible d'obtenir une surveillance efficace grâce à cette composante de surveillance ciblée. Cela souligne également l'importance pour les départements de mettre en œuvre ces investigations de liens aval afin de détecter les éventuels foyers avant une détection tardive à l'abattoir.

Les liens amont et de voisinage participaient très peu à l'efficacité du dispositif, mais leur occurrence a sans doute été sous-estimée car ces investigations sont souvent mise en œuvre pendant le dépistage périodique et sont donc enregistrées en tant que dépistage périodique dans SIGAL (7.4.1).

Malheureusement, l'efficacité d'un dépistage par zonage n'a pas pu être estimée dans ce travail par manque d'information sur les zonages et sur la probabilité pour un élevage dans une zone d'être infecté par rapport au reste du département. Toutefois, compte tenu de la part de la contamination locale dans l'entretien de la TB en France (Palisson *et al.*, 2016), cette modalité de dépistage périodique fondée sur le risque semble pertinente pour améliorer encore la sensibilité de la surveillance *ante mortem* dans les départements infectés.

7.4.2.3. Coûts estimés

Les départements dans lesquels les coûts en euros par troupeau étaient les plus élevés étaient ceux dans lesquels la probabilité pour un élevage d'être en lien aval était la plus forte (figure 40 et figure 42). Toutefois, certains départements auraient tendance à ne pas mettre en œuvre ces investigations (communication personnelle F. Chevalier), ce qui n'a pas été pris en compte dans le modèle. Ces coûts estimés reflètent donc le coût que l'on peut prévoir en cas de pleine application des investigations des liens aval, et non pas les réelles dépenses effectuées sur le terrain au cours de l'année 2016.

De plus, les coûts estimés pour les départements du Sud-Est et d'Île-de-France semblent particulièrement faibles par rapport à la proportion d'élevages soumis au dépistage périodique et par rapport aux coûts estimés pour des départements avec un dépistage périodique semblable. Cela s'explique par une plus grande proportion d'élevages de petite taille (en nombre de bovins de plus de 24 mois) dans les départements du Sud-Est, ce qui diminue fortement le coût (en euros par troupeau) du dépistage périodique et donc de la surveillance.

Bilan

Une efficacité satisfaisante du système de surveillance *ante mortem* à détecter l'infection dans les départements avec une forte prévalence a été mise en évidence. De plus, dans les départements à priori indemnes mais dont les échanges d'animaux seraient les plus à risque d'introduire l'infection (forte probabilité de leurs élevages d'être en lien aval avec un foyer de TB), l'investigation des liens avals permet de détecter une infection au seuil de prévalence de 0,1 % avec une probabilité élevée, soulignant l'importance d'effectuer sérieusement ces investigations.

Au contraire, la composante de dépistage aux mouvements ne permettait pas d'améliorer significativement l'efficacité de la surveillance, malgré la surestimation de l'efficacité de cette composante entraînée par le paramétrage de notre modèle. Ainsi, l'arrêt du dépistage aux mouvements semble raisonnable.

Pour pouvoir optimiser la surveillance *ante mortem* en termes de coût-efficacité, une estimation fiable de la prévalence réelle de l'infection sur toute la France semble nécessaire afin d'identifier : (i) les départements infectés dans lesquels le dépistage périodique, associé aux investigations des liens épidémiologiques, est toujours nécessaire pour parvenir à détecter le plus d'élevages infectés possible chaque année ; et (ii) les départements indemnes, dans lesquels on pourrait se contenter d'une surveillance ciblée, *via* l'investigation des liens épidémiologiques. La surveillance *post mortem* permet de compléter l'efficacité du dispositif de surveillance *ante mortem* pour obtenir une meilleure efficacité globale de la surveillance de la TB.

Le dépistage par zonage n'a pas pu être étudié dans notre travail, mais constitue une piste d'amélioration intéressante pour la composante « dépistage périodique » (Palisson *et al.*, 2016).

Chapitre 8. Construction d'un outil d'aide à la décision multicritère appliqué au choix d'un protocole de surveillance par dépistage périodique

8.1. Objectif spécifique

L'évaluation du système de surveillance *ante mortem* de la TB a mis en évidence la diversité des facteurs à prendre en compte dans le choix des protocoles à appliquer, en particulier pour le dépistage périodique en élevage. En effet, l'évaluation coût-efficacité de ces protocoles a montré que les plus efficaces étaient souvent les plus coûteux et pouvaient ne pas être les plus acceptables sur le terrain. Il n'existe donc aucun protocole idéal dont il serait possible de recommander l'application systématique, chaque protocole proposé possédant son propre équilibre coût/efficacité/acceptabilité et aucun ne permettant d'optimiser tous ces critères à la fois. L'objectif de la dernière partie de notre travail était donc de développer un outil d'aide à la décision permettant la prise en compte simultanée de tous les critères précédemment cités. La comparaison multicritère des protocoles de dépistage périodique selon une liste de critères prenant en compte à la fois à leur efficacité, leur coût et leur acceptabilité a été utilisée. Le but n'était pas d'émettre directement une recommandation -bien que cette analyse puisse apporter des éléments utiles pour l'optimisation de la surveillance de la TB-, mais de fournir un outil permettant de classer des protocoles de surveillance, selon les préférences des autorités sanitaires en s'appuyant sur une liste de critères variés.

8.2. Matériel et méthode

Pour cela, nous avons appliqué à la santé animale une méthode d'aide à la décision, empruntée à d'autres disciplines, en prenant l'exemple des protocoles de dépistage périodique en élevage et avons comparé les résultats obtenus dans des contextes épidémiologiques divers. À partir de nos travaux précédents, la prévalence apparente locale de la TB et le type de production sont apparus comme des facteurs permettant de distinguer des catégories de zones, dans lesquelles les pratiques de surveillance et les opinions des acteurs sont globalement différentes. C'est pourquoi nous avons choisi d'appliquer la méthode dans quatre départements sélectionnés, selon leur prévalence apparente (faiblement infecté / fortement infecté) et le type de production majoritaire de leurs élevages (laitier ou allaitant). Nous avons ainsi sélectionné la Manche (50) (« fortement infecté » avec une majorité d'élevages laitiers), le Maine-et-Loire (49) (« faiblement infecté » avec une majorité d'élevages laitiers), la Dordogne (24) (« fortement infecté » avec une majorité d'élevages allaitants) et la Nièvre (58) (« faiblement infecté » avec une majorité d'élevages allaitants).

8.2.1. Protocoles comparés

Nous avons comparé les trois protocoles réglementaires de dépistage périodique en élevage (« abattage-recontrôle IDC », « abattage seul » et « triage IFN ») et les deux protocoles alternatifs utilisant l'IFNMIX, proposés dans le chapitre 4 (« abattage-recontrôle IFNMIX » et « confirmation IFNMIX »), pour lesquels l'ID1 pouvait être une IDS ou une IDC, soit dix protocoles au total.

8.2.2. Identification des critères de comparaison

Pour sélectionner les critères à prendre en compte dans cette analyse, nous avons commencé par dresser la liste des critères apparaissant comme les plus pertinents et permettant la comparaison des

Contribution personnelle – Chapitre 8. Construction d'un outil d'aide à la décision multicritère appliqué au choix d'un protocole de surveillance par dépistage périodique

protocoles entre eux selon : leur efficacité technique, leur coût et leur acceptabilité. Puis ces critères ont été soumis à avis d'experts. Ainsi, cette liste a été présentée et discutée au cours d'une réunion du groupe de suivi tuberculose, réunissant des épidémiologistes travaillant sur la TB, les référents nationaux et locaux pour la TB, un VS de terrain connaissant les difficultés pratiques de mise en œuvre de la surveillance, un représentant des éleveurs, des chercheurs en santé animale ayant travaillé sur la TB, des chefs de bureau de DDPP et des membres du bureau santé animale de la DGAI. Au cours de cette réunion, chaque participant a été interrogé individuellement (*via* un questionnaire papier) sur la pertinence des critères choisis et l'éventuelle variation de ces critères en fonction du type d'élevage (type de production, taille et taux de rotation), tout en leur fournissant l'opportunité de réfuter les critères proposés et d'en proposer d'autres ; ce qui nous a permis de recueillir, *in fine*, l'avis de treize personnes. À la fin de cette même réunion, les résultats des consultations individuelles (anonymisés) ont été mis en commun et discutés, ce qui a permis d'aboutir à un consensus sur les critères à utiliser. Une liste de huit critères a ainsi été retenue permettant de représenter à la fois le coût, l'efficacité et l'acceptabilité des protocoles de dépistage (tableau 48). La majorité des personnes interrogées pensaient que le type de production avait un impact sur la facilité de mise en œuvre du protocole pour l'éleveur et le vétérinaire, et que la taille de l'élevage avait un impact sur la facilité de mise en œuvre du protocole pour l'éleveur.

Tableau 48. Critères sélectionnés pour réaliser une comparaison multicritère des protocoles de dépistage périodique, suite à l'avis des membres du groupe de suivi TB

Critère	Description
Sensibilité du protocole	Probabilité d'obtenir au moins un résultat non-négatif dans un troupeau infecté (exprimée en %) (capacité du protocole à détecter les troupeaux infectés)
Spécificité du protocole	Probabilité d'obtenir au moins un résultat faussement positif dans un troupeau indemne (exprimée en %) (probabilité de suspecter à tort un troupeau)
Coût du protocole pour l'éleveur	Coût du dépistage périodique et des pertes indirectes dues au blocage de l'élevage suspect, supportés par l'éleveur (en € / troupeau)
Coût du protocole pour l'Etat	Coûts des analyses de laboratoires et des tests de recontrôles et coût d'indemnisation des animaux abattus, supportés par l'État (en € / troupeau suspect)
Facilité de mise en œuvre du protocole dans un élevage du point de vue des vétérinaires	Score représentant la facilité de réalisation du protocole dans l'élevage du point de vue des vétérinaires : prend en compte la facilité de réalisation des tests utilisés (ID, IFN), le nombre d'interventions nécessaires et la proportion d'animaux à recontrôler dans l'élevage
Facilité de mise en œuvre du protocole dans un élevage du point de vue des éleveurs	Score représentant la facilité de réalisation du protocole dans l'élevage du point de vue des éleveurs : prend en compte la facilité de réalisation des tests utilisés (ID, IFN), le nombre d'interventions nécessaires et la proportion d'animaux à recontrôler dans l'élevage
Pourcentage de bovins abattus « pour rien »	Pourcentage des animaux d'un troupeau subissant un abattage diagnostique dont le résultat sera finalement négatif
Facilité de mise en œuvre du point de vue de l'Etat	Complexité administrative et technique de mise en œuvre et de suivi du protocole par les DDPP

8.2.3. Méthode utilisée pour la comparaison multicritère des protocoles

Nous avons choisi d'utiliser la méthode d'analyse multicritère PROMETHEE (I.1.6.3.2.4). Cette méthode permettait en effet la prise en compte, pour chaque critère, des seuils de préférence (valeur à partir de laquelle la différence entre deux protocoles est considérée comme très importante par l'acteur

concerné, appelés seuils de différence dans les questionnaires décrits ci-après afin de faciliter la compréhension de sa signification) et d'indifférence (valeur en dessous de laquelle l'acteur interrogé considère que la différence est négligeable), ce qui permettait d'introduire plus de nuances dans la comparaison entre les protocoles. De plus, cette méthode présentait l'avantage d'avoir une méthode de calcul plus transparente ne nécessitant pas de logiciel spécifique (contrairement à la méthode ELECTRE présentée en 1.6.3.2.3 de la partie I de ce manuscrit).

8.2.3.1. Valeur de chaque critère pour les protocoles comparés

Les valeurs prises par les critères sensibilité, spécificité, coût élevage, coût État et animaux abattus « pour rien » pour chaque protocole, dans chaque département étudié, ont été estimées grâce aux arbres de scénario construits précédemment (chapitres 2, 3 et 4) et sont présentées en annexe 32.

Pour les critères de difficulté de mise en œuvre ou de gestion administrative, nous avons demandé à des acteurs de s'exprimer sur leur difficulté à mettre en œuvre ou à gérer chacune des étapes d'un protocole, en se positionnant sur une échelle de Likert (annexe 33 à annexe 35). Les vétérinaires et les directeurs de GDS ont dû répondre par type de production et catégorie de taille car la consultation du groupe d'experts avait fait ressortir ces facteurs comme influents sur les critères de difficulté de mise en œuvre des protocoles de dépistage. Ainsi, nous avons attribué à chaque test des protocoles (IDC, IDS, IFNy), une note traduisant leur difficulté de mise en œuvre selon chacun des acteurs (VS, éleveur ou DDPP) de chacun des quatre départements objets du travail (soit 12 notes par test), comme présenté dans le tableau 49.

Tableau 49. Note attribuée aux tests de dépistage en fonction du positionnement de l'acteur interrogé sur l'échelle de Likert

Exemple de question : « En général, du point de vue des éleveurs de votre département, la réalisation du dépistage par IDS est peu contraignant pour eux »

Réponse au questionnaire	Note de difficulté attribuée
Pas du tout d'accord	4
Pas d'accord	3
Neutre	2
D'accord	1
Tout à fait d'accord	0

Ces notes ont ensuite été utilisées pour calculer un score global de difficulté de réalisation (S) pour chaque protocole P selon le point de vue de chaque acteur A (VS ou éleveur) dans chaque département D, selon l'équation (23). Quand les notes étaient différentes selon le type d'élevage, une note moyenne a été estimée en pondérant les différentes notes obtenues par type d'élevage par la proportion de chaque type d'élevage dans le département en question.

(23) $S_{A,P,D} = \text{note ID1}_{A,P,D} + \text{note second test de dépistage}_{A,P,D} * [1 \text{ si un second test est réalisé en série dans le protocole, } 0 \text{ autrement}] * \text{pourcentage moyen de bovins réagissants à l'ID1}_{P,D} + (\text{note IDC recontrôle}_{A,P,D} * \text{pourcentage des animaux qui sont recontrôlés}_{P,D})$

Pour la difficulté de gestion administrative de ces protocoles par la DDPP, nous avons utilisé la même équation en y ajoutant le score de difficulté de gestion d'un abattage, pondéré par le nombre moyen d'abattages diagnostiques engendrés par chaque protocole dans le département.

Nous avons ainsi calculé un score pouvant aller de 0 à 12 qui était d'autant plus faible que le protocole était facile à mettre en œuvre du point de vue de l'acteur interrogé. Par construction, ce score diminuait quand le nombre d'interventions nécessaires diminuait, quand les tests utilisés étaient ceux considérés comme les plus faciles et quand le nombre d'animaux à recontrôler diminuait.

8.2.3.2. Définition des seuils

Une fois la liste de critère définie, nous avons élaboré des questionnaires permettant de fixer les seuils de préférence et d'indifférence (cf. I.1.6.3.2.1) de chacun des critères (annexe 33 à annexe 35). Ces questionnaires étaient adressés aux acteurs concernés par les critères en question : les représentants d'éleveurs, les représentants des vétérinaires ou les chefs de bureau santé animale des DDPP, en supposant qu'ils avaient une bonne idée du ressenti et de l'avis global des acteurs qu'ils représentent. Le tableau 50 associe à chaque critère l'acteur interrogé. Pour les animaux abattus pour rien et pour les élevages faussement positifs (spécificité), la question était posée en nombre d'animaux au sein d'un élevage ou d'élevages (respectivement), et ramené par la suite à un pourcentage en utilisant respectivement le nombre moyen d'animaux dans les élevages du département et le nombre d'élevages au 1^{er} janvier 2016 dans le département. En effet, le testage des questionnaires avait montré qu'il était plus facile pour les acteurs de se positionner avec des nombres d'élevages ou d'animaux qu'avec des pourcentages.

Pour les critères de difficulté de mise en œuvre des protocoles du point de vue des VS, des éleveurs et de difficulté de gestion pour la DDPP, les seuils ne pouvaient pas être définis par les acteurs eux même, car il s'agissait d'un score construit qui ne pouvait pas faire sens pour eux (cf. 8.2.3.1). Nous avons fait l'hypothèse que toute différence de score de difficulté correspondait à une différence significative (seuil d'indifférence = 0) et que la différence était importante à partir de 2 points de différence dans le score, ce qui correspond à l'écart entre « tout à fait d'accord » et « neutre » (tableau 49).

Tableau 50. Acteurs interrogés afin de définir les seuils de préférence et d'indifférence de chaque critère

Critère	Acteur interrogé
Sensibilité	Chef de service adjoint santé animale de la DDPP
Spécificité	Chef de service adjoint santé animale de la DDPP
Coût élevage	Président ou directeur du GDS
Coût Etat	Chef de service adjoint santé animale de la DDPP
Animaux abattus pour rien	Président ou directeur du GDS et chef de service adjoint santé animale de la DDPP

8.2.3.3. Poids des critères

Pour pouvoir classer les protocoles en fonction des préférences exprimées par les DDPP, nous avons adressé à chaque chef de service adjoint santé animale des DDPP des départements sélectionnés un questionnaire (annexe 36). Celui-ci a permis de définir les poids des critères les uns par rapport aux autres, selon la méthode de Rogers et Bruen (1997) décrite en I.1.6.3.2.2. Pour chaque critère, nous avons comptabilisé le nombre de fois où la personne interrogée avait « résisté au changement » de ce critère, c'est-à-dire qu'à choisir entre dégrader la valeur du critère en question et celle d'un autre critère qui lui était proposé, la personne avait préféré dégrader la valeur de l'autre critère. Par exemple, on proposait de choisir entre un protocole très sensible et très coûteux et un protocole peu sensible et peu coûteux : si le premier protocole était choisi, un point était comptabilisé pour le critère sensibilité. On comparait ainsi tous les critères deux à deux, en comptabilisant les points de résistance au changement. Une fois ce score de résistance au changement obtenu pour chacun des critères, les scores ont été normalisés afin que leur somme soit égale à 1. Nous avons ainsi obtenu les poids de chaque critère pour chacun des quatre départements étudiés.

8.2.3.4. Classement des protocoles

Une fois toutes ces données collectées, la méthode PROMETHEE (cf. I.1.6.3.2.4) pouvait être appliquée. Dans un premier temps, les indices de crédibilité partiels ($\sigma_k(a_i, a_j)$), reflétant la crédibilité des propositions « le protocole a_i est préféré au protocole a_j selon le critère c_k » pour chaque couple

ordonné (a_i, a_j) de protocoles et selon chacun des huit critères, ont été calculés suivant la procédure décrite dans le tableau 51.

Tableau 51. Valeur prise par l'indice de crédibilité partiel $\sigma_k(a_i, a_j)$ en fonction de la différence de la valeur du critère c_k dans les deux protocoles a_i et a_j comparés $(g_k(a_i) - g_k(a_j))$

Type de critère	Différence de valeur du critère c_k	Type de préférence	Valeur de $\sigma_k(a_i, a_j)$
À maximiser	$g_k(a_i) - g_k(a_j) \leq q_k$	$a_j S a_i$	0
	$g_k(a_i) - g_k(a_j) \geq p_k$	$a_i P a_j$	1
	$q_k < g_k(a_i) - g_k(a_j) < p_k$	$a_i Q a_j$	$\frac{g_k(a_i) - g_k(a_j) - q_k}{p_k - q_k}$
À minimiser	$g_k(a_i) - g_k(a_j) \geq -q_k$	$a_j S a_i$	0
	$g_k(a_i) - g_k(a_j) \leq -p_k$	$a_i P a_j$	1
	$-p_k < g_k(a_i) - g_k(a_j) < -q_k$	$a_i Q a_j$	$\frac{g_k(a_i) - g_k(a_j) + q_k}{q_k - p_k}$

Légende : $g_k(a_i)$ = valeur du critère k pour le protocole a_i ; p_k = seuil de préférence pour le critère k ; q_k = seuil d'indifférence pour le critère k ; $a_1 P a_2 = a_1$ est préféré à a_2 ; $a_1 S a_2 = a_1$ surclasse a_2 , c'est à dire que a_1 est préféré à a_2 ou que a_1 est équivalent à a_2 ($a_1 P a_2$ est donc inclus dans $a_1 S a_2$) ; $a_1 Q a_2 = a_1$ est faiblement préféré à a_2 .

L'indice de crédibilité global $(\sigma(a_i, a_j))$ de la proposition « le protocole a_i est préféré au protocole a_j » était ensuite obtenu en sommant les indices de crédibilité partiels $\sigma_k(a_i, a_j)$ obtenus pour chaque critère, pondérés par les poids normalisés des critères.

Ensuite, pour chaque protocole a_i , le « flux négatif » qui correspond à la somme des indices de crédibilité des propositions « a_j est préféré à a_i » pour tous les protocoles a_j était calculé. Cela correspondait à la crédibilité de l'affirmation « a_i n'était pas le protocole préféré ». À l'inverse, le « flux positif » qui correspond à la somme des indices de crédibilité des propositions « a_i est préféré à a_j » pour tous les protocoles a_j était également calculé. Cela correspondait à la crédibilité de l'affirmation « a_i était le protocole préféré ». Un premier classement des protocoles était ainsi obtenu, selon la méthode PROMETHEE I en croisant les deux pré-classements obtenus par flux positifs décroissants et par flux négatifs croissants.

Un second classement a ensuite été réalisé selon la méthode PROMETHEE II : pour chaque protocole, un score final appelé « flux net » était calculé en soustrayant le flux négatif au flux positif. Le classement final des protocoles était ensuite obtenu en classant les protocoles par flux net décroissant : plus un protocole avait un flux net élevé, plus la crédibilité qu'il soit préféré par rapport aux autres était élevée.

Tous ces calculs ont été réalisés à l'aide de la fonction PROMETHEE du package PROMETHEE sous R.

8.2.3.5. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée selon la méthode proposée par Mouine (2011) (cf. I.1.6.3.3). Nous avons ainsi fait varier les poids et les seuils de préférence et d'indifférence un à un, sans modifier les autres paramètres, afin de déterminer les valeurs extrêmes de chacun de ces paramètres pour lesquelles le classement des protocoles obtenu initialement était toujours valable (intervalle de validité). Pour les seuils d'indifférence (q), les valeurs étaient testées jusqu'à une valeur maximale correspondant à la valeur fixée pour le seuil de préférence (p) et jusqu'à une valeur minimale de zéro ; pour les seuils p , nous avons testé jusqu'à une valeur minimale correspondant à q et sans définir de valeur maximale.

Une fois ces intervalles de validité estimés, nous avons approfondi l'analyse de sensibilité. Nous avons étudié l'effet de valeurs extrêmes sur le classement final. Pour cela, nous avons donc choisi d'appliquer à nouveau la méthode PROMETHEE I, en modifiant un à un les seuils et les poids, en les augmentant puis en les diminuant de 50 %. Ainsi les valeurs testées correspondaient au double ou à la moitié des

valeurs fixées pour les seuils et les poids par les acteurs. Nous avons choisi cette modification de 50 % afin qu'il soit facile de s'en représenter l'importance, car cela semblait déjà être une valeur assez extrême (une erreur du simple au double de la part des acteurs ayant fixé les seuils peut être considérée comme importante et peu probable), et enfin car c'était l'approche proposée dans les analyses de sensibilité de certaines études d'aide à la décision multicritère (Roy and Bouyssou, 1993). Cela nous a permis de détailler la stabilité des classements initialement obtenus, en identifiant les protocoles dont la position dans le classement de préférence était sensible à des changements de seuils ou de poids importants, et, inversement, ceux qui conservaient leur rang de préférence malgré ces changements.

8.3. Résultats

8.3.1. Seuils d'indifférence et de préférence

Les réponses aux questionnaires ont permis de définir les seuils nécessaires à l'application de la méthode pour chacun des départements ciblés (tableau 52). Par exemple, en Dordogne les seuils d'indifférence et de préférence pour le critère sensibilité ont été fixés respectivement à 10 % et 25 %, ce qui signifie que la DDPP considérait que pour une différence de sensibilité de moins de 10 % entre deux protocoles, les protocoles étaient équivalents en terme de sensibilité ; alors que pour une différence supérieure à 25 %, le protocole le plus sensible était très fortement préféré. Pour la sensibilité, les seuils d'indifférence et de préférence étaient proches d'un département à l'autre. Les seuils d'indifférence et de préférence étaient plus élevés en Dordogne pour la spécificité (*i.e.* pour la probabilité de suspecter à tort un élevage indemne) que dans les autres départements. De même, le seuil d'indifférence y était plus élevé pour le pourcentage d'animaux abattus « pour rien », alors que le seuil de préférence était semblable à celui des autres départements. Une importante différence dans les seuils fixés pour les coûts (à la charge de l'État et à la charge de l'éleveur) a été constatée, avec des seuils plus élevés dans les départements à dominante allaitante (Nièvre et Dordogne). Les seuils d'indifférence et de préférence ont été fixés respectivement à 0 et 2 pour les critères de difficulté de mise en œuvre pour le vétérinaire, de difficulté de mise en œuvre pour l'éleveur et de difficulté de gestion administrative pour la DDPP, quel que soit le département.

Tableau 52. Seuils d'indifférence et de préférence de chaque critère définis avec les acteurs pour chacun des départements étudiés

Critère (acteur interrogé pour fixer le seuil)	Seuil	Dordogne	Nièvre	Manche	Maine-et-Loire
Sensibilité (DDPP)	Indifférence	10 %	10 %	5 %	10 %
	Préférence	25 %	30 %	20 %	25 %
Spécificité * (DDPP)	Indifférence	1,6 % (50 élevages)	0,24 % (5 élevages)	0,14 % (10 élevages)	0,2 % (8 élevages)
	Préférence	3,2 % (100 élevages)	0,47 % (10 élevages)	0,27 % (20 élevages)	0,51 % (20 élevages)
Animaux abattus pour rien * (GDS)	Indifférence	1,9 % (2 animaux)	0,9 % (2 animaux)	1,2 % (2 animaux)	1,3 % (2 animaux)
	Préférence	1,9 % (2 animaux)	2,4 % (5 animaux)	2,4 % (4 animaux)	2,6 % (4 animaux)
Coût Etat (€/troupeau) (DDPP)	Indifférence	400	200	300	100
	Préférence	600	1 000	500	250
Coût élevage (€/troupeau) (GDS)	Indifférence	500	1 000	300	700
	Préférence	1 000	2 000	500	700

* Les nombres d'élevages ou d'animaux indiqués entre parenthèse correspondent aux réponses fournies par les acteurs interrogés et qui ont permis, en les rapportant respectivement au nombre d'élevages dans le département ou à la taille moyenne d'un élevage dans le département, le calcul des pourcentages indiqués dans le tableau.

8.3.2. Poids des critères

Le questionnaire à l'intention des chefs de service adjoint santé animale des DDPP nous a permis d'attribuer des poids à chacun des critères (tableau 53), en fonction de leur importance perçue dans la prise de décision. Pour trois départements sur quatre, la sensibilité était le critère auquel les DDPP accordaient le plus d'importance (poids d'environ 27 % dans la prise de décision) ; la Manche dérogeait à cela en lui attribuant environ deux fois moins d'importance et en considérant comme le plus important le critère du coût pour l'élevage (poids de 21 %).

Le poids du pourcentage d'élevages faussement suspects (spécificité du protocole) était considéré plus important dans la Nièvre, la Manche et le Maine-et-Loire (poids de 14 % à 20 %) qu'en Dordogne (poids de 5 %). Le pourcentage d'animaux abattus « pour rien » avait deux fois moins de poids en Dordogne et dans le Maine-et-Loire que dans la Nièvre et dans la Manche.

Pour la Dordogne, la Nièvre et le Maine-et-Loire, l'importance accordée aux coûts pour l'État et aux coûts pour le monde de l'élevage était du même ordre de grandeur, autour de 15 %.

La difficulté de mise en œuvre du protocole pour le VS était considérée comme un critère plus important en Dordogne et dans le Maine-et-Loire que dans la Nièvre et la Manche. Dans les départements non infectés par la TB (Nièvre et Maine-et-Loire) un poids nul ou très faible était attribué à la difficulté de mise en œuvre du protocole par l'éleveur et à la difficulté de gestion administrative par la DDPP, contrairement aux autres départements dans lesquels ces deux critères avaient une importance plus grande du point de vue des DDPP.

Tableau 53. Poids des critères attribués par des chefs de service adjoint santé animale des DDPP des départements interrogés par la méthode de Rogers et Bruen (1997) pour le choix d'un protocole de dépistage périodique de la TB en élevage

Critère	Dordogne	Nièvre	Manche	Maine-et-Loire
Sensibilité	0,26	0,28	0,13	0,27
Spécificité	0,05	0,20	0,17	0,14
Animaux abattus pour rien	0,05	0,12	0,13	0,05
Coût État	0,11	0,16	0,08	0,18
Coût élevage	0,11	0,16	0,21	0,14
Difficulté de mise en œuvre vétérinaire	0,16	0,08	0,04	0,14
Difficulté de mise en œuvre éleveur	0,16	0	0,13	0
Difficulté de gestion administrative DDPP	0,11	0	0,13	0,09

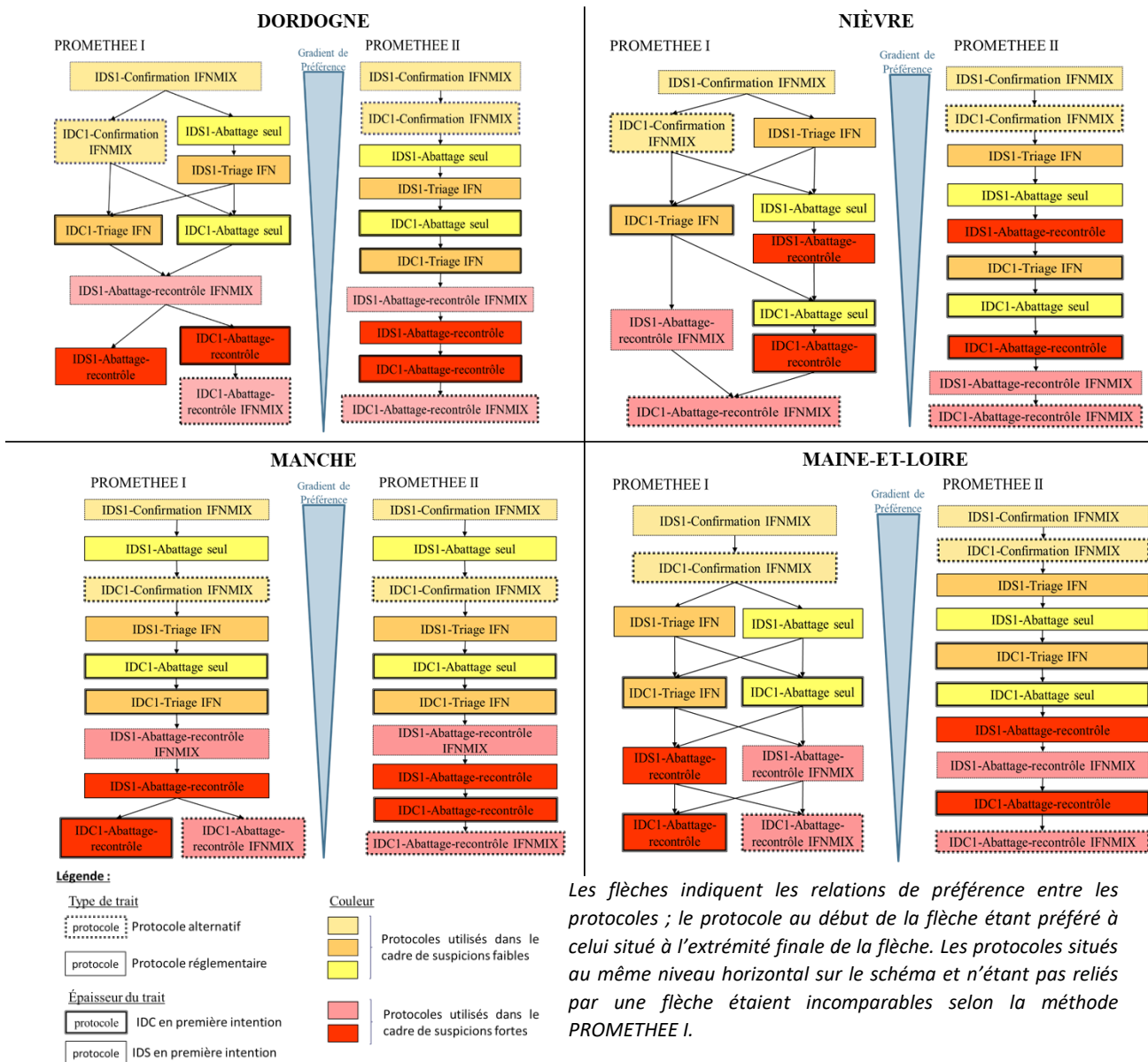
Remarque : Pour chaque département, la somme des poids des critères est égale à 1 ; par soucis de lisibilité, les valeurs ont ici été arrondies, ce qui explique que leur somme soit parfois supérieure à 1.

8.3.3. Classement final des protocoles de surveillance obtenu en fonction du département interrogé

L'application des méthodes PROMETHEE I et II a permis de classer les dix protocoles étudiés les uns par rapport aux autres, en fonction des préférences exprimées par les acteurs interrogés pour la Dordogne, la Nièvre, la Manche et le Maine-et-Loire. Les classements obtenus sont présentés sur la figure 44, dans laquelle les flèches indiquent les relations de préférence entre les protocoles ; le protocole au début de la flèche étant préféré à celui situé à l'extrémité finale de la flèche. Les protocoles situés au même niveau horizontal sur le schéma et n'étant pas reliés par une flèche étaient incomparables selon la méthode PROMETHEE I car les flux négatif et positif calculés fournissaient des résultats discordants. Quel que soit le département, les protocoles utilisés en cas de suspicion faible étaient en général préférés à ceux utilisés dans le cadre d'une suspicion forte. Pour un protocole donné, l'utilisation de l'IDS en première intention était la plupart du temps préférée à l'utilisation de l'IDC. Le protocole alternatif IDS1-confirmation IFNMIX était le premier du classement de préférence dans tous les départements, alors que le protocole alternatif IDC1-abattage-recontrôle IFNMIX était le dernier. Dans les départements infectés (Dordogne et Manche) les protocoles ID-abattage seuls

étaient préférés aux protocoles ID-triage IFN, ou ces deux protocoles étaient incomparables (méthode PROMETHEE I), et inversement dans les départements indemnes de TB (Nièvre et Maine-et-Loire).

Figure 44. Résultats du classement multicritère des protocoles étudiés pour chaque département, selon les méthodes PROMETHEE I et II



8.3.4. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a permis de déterminer l'intervalle dans lequel chaque seuil et chaque poids pouvaient varier, sans impliquer de changement dans le classement final des protocoles (intervalle de validité). Les résultats de cette analyse obtenus pour la méthode PROMETHEE I sont présentés ci-dessous (tableau 54). Les résultats étaient semblables pour la méthode PROMETHEE II. Par exemple, pour la Dordogne, le poids du critère sensibilité peut varier entre 0,17 et 0,35, sans que cela ne modifie le classement de préférence des protocoles. De la même façon, si un seuil de différence entre 0 % et 19 % est attribué à ce critère (tout poids et autres seuils égaux par ailleurs), le classement des protocoles est inchangé.

Quel que soit le département, ces intervalles étaient assez larges pour une grande partie des critères ; il fallait donc beaucoup modifier les seuils définis et poids définis pour entraîner une modification du

Contribution personnelle – Chapitre 8. Construction d'un outil d'aide à la décision multicritère appliqué au choix d'un protocole de surveillance par dépistage périodique

classement final, ce qui garantissait une assez bonne robustesse du classement obtenu. Toutefois, pour certains d'entre eux cet intervalle était plus étroit, en particulier pour les critères économiques. Afin d'avoir une idée encore plus précise de la robustesse des classements obtenus, nous avons donc testé une à une deux valeurs extrêmes pour chaque seuil et chaque poids dans chaque département : le double et la moitié de la valeur initialement fixée. L'utilisation de ces valeurs extrêmes entraînait l'inversion entre protocoles situés côte à côte dans le classement. Quel que soit le département, le protocole IDS1-confirmation IFNMIX était toujours en première place du classement de préférence et le protocole IDC1-abatage-recontrôle IFNMIX était toujours dans les deux dernières places du classement (et en dernière place pour la Nièvre). Pour la Dordogne, les relations de préférence entre les protocoles n'étaient modifiées qu'au sein des groupes formés par les protocoles utilisés en suspicion faible (protocoles en jaune-orange sur la figure 44) (à l'exception du protocole IDS1 confirmation IFNMIX) ou en suspicion forte (protocoles en rouge sur la figure 44).

Tableau 54. Valeurs fixées et leur intervalle de validité pour les paramètres de l'analyse multicritère (poids, seuil d'indifférence (q), seuil de préférence (p)), par département

DORDOGNE

Critère	Poids	q	p
Sensibilité	0,26 [0,17-0,35]	10 % [0-19]	25 % [16-34]
Spécificité	0,05 [0-0,14]	1,6 % [0-p]	3,2 % [1,6-22]
Animaux abattus pour rien	0,05 [0-0,14]	1,9 % [0-p]	0,019 [q-0,11]
Coût État	0,11 [0,015-0,20]	400 €/troupeau [271-p]	600 €/troupeau [q-798]
Coût élevage	0,11 [0,015-0,20]	500 €/troupeau [0-829]	1 000 €/troupeau [q-1858]
Difficulté de mise en œuvre vétérinaire	0,16 [0,067-0,25]	0 [0-0,59]	2 [1,9-2,1]
Difficulté de mise en œuvre éleveur	0,16 [0,067-0,25]	0 [0-0,89]	2 [0,31-4,49]
Difficulté de gestion administrative DDPP	0,11 [0,015-0,20]	0 [0-0,59]	2 [1,51-3,49]

NIÈVRE

Critère	Poids	q	p
Sensibilité	0,28 [0,19-0,37]	10 % [0-19]	30 % [21-59]
Spécificité	0,20 [0,11-0,29]	0,24 % [0-p]	0,47 % [q-9,5]
Animaux abattus pour rien	0,12 [0,03-0,21]	0,9 % [0-2,3]	2,4 % [q-11]
Coût État	0,16 [0,07-0,25]	200 €/troupeau [21-319]	1 000 €/troupeau [762-1278]
Coût élevage	0,16 [0,07-0,25]	1 000 €/troupeau [771-1409]	2 000 €/troupeau [1862-2300]
Difficulté de mise en œuvre vétérinaire	0,08 [0-0,17]	0 [0-0,59]	2 [1,9-2,1]
Difficulté de mise en œuvre éleveur	0 [0-0,09]	0 [0-2]	2 [q-12]
Difficulté de gestion administrative DDPP	0 [0-0,09]	0 [0-2]	2 [q-12]

MANCHE

Critère	Poids	q	p
Sensibilité	0,13 [0,035-0,32]	5 % [0-14]	20 % [11-29]
Spécificité	0,17 [0,077-0,26]	0,14 % [0-p]	0,27 % [q-9,3]
Animaux abattus pour rien	0,13 [0,035-0,22]	1,2 % [0-P]	2,4 % [q-11]
Coût État	0,08 [0-0,17]	300 €/troupeau [0-P]	500 €/troupeau [q-1598]
Coût élevage	0,21 [0,012-0,30]	300 €/troupeau [0-P]	500 €/troupeau [q-958]
Difficulté de mise en œuvre vétérinaire	0,04 [0-0,13]	0 [0-P]	2 [0,81-12]
Difficulté de mise en œuvre éleveur	0,13 [0,035-0,32]	0 [0-1,69]	2 [q-3,29]
Difficulté de gestion administrative DDPP	0,13 [0,035-0,32]	0 [0-0,49]	2 [1,21-2,69]

MAINE-ET-LOIRE

Critère	Poids	q	p
Sensibilité	0,27 [0,00-0,46]	10 % [0-p]	25 % [16-100]
Spécificité	0,14 [0,046-0,23]	0,2 % [0-p]	0,51 % [q-20]
Animaux abattus pour rien	0,05 [0-0,14]	1,3 % [0-p]	2,6 % [q-12]
Coût État	0,18 [0,092-0,27]	100 €/troupeau [0-p]	250 €/troupeau [q-408]
Coût élevage	0,14 [0,046-0,23]	700 €/troupeau [291-p]	700 €/troupeau [q-998]
Difficulté de mise en œuvre vétérinaire	0,14 [0,046-0,23]	0,00 [0-0,19]	2,00 [0,91-3,09]
Difficulté de mise en œuvre éleveur	0 [0-0,09]	0,00 [0-p]	2,00 [0-12]
Difficulté de gestion administrative DDPP	0,09 [0-0,18]	0,00 [0-0,29]	2,00 [0,61-3,69]

8.4. Discussion

8.4.1. Méthode utilisée

La méthode choisie pour classer des protocoles de dépistage périodique de la TB est une méthode d'agrégation partielle. Ce type d'approche est assez novateur en santé animale, domaine dans lequel sont plutôt appliquées des méthodes d'agrégation complètes, par exemple les moyennes pondérées, souvent utilisées en analyse de risque. Ces méthodes d'agrégation partielles présentent l'avantage d'éviter d'agréger directement entre eux des éléments ayant des unités très différentes (par exemple la sensibilité (en pourcentage) et le coût (en euros par troupeau)).

Nous avons choisi d'utiliser la méthode d'analyse multicritère PROMETHEE car elle permettait d'utiliser des pseudo-critères pour lesquels des seuils de préférence et d'indifférence sont utilisés, ce qui permet d'introduire plus de nuances dans la comparaison des protocoles. De plus, elle présentait l'avantage de proposer une méthode d'agrégation des comparaisons deux à deux des protocoles, qui ne nécessite pas de logiciel spécifique et payant (contrairement à la méthode ELECTRE) et qui est plus transparente. Ainsi, son éventuelle utilisation par des acteurs au niveau local semblait plus réaliste. Enfin, la méthode PROMETHEE est plus stable que la méthode ELECTRE, c'est-à-dire que son résultat final est moins sensible à de faibles variations des seuils définis (Brans *et al.*, 1986).

La méthode PROMETHEE peut être divisée en deux sous-méthodes : PROMETHEE I et II, qui diffèrent uniquement sur l'interprétation des flux calculés pour obtenir le classement final. Nous avons choisi d'exprimer les résultats pour ces deux approches afin de pouvoir les comparer. Dans la méthode PROMETHEE I, certains protocoles peuvent être classés comme « incomparables » lorsque leurs flux positifs et leurs flux négatifs sont discordants, c'est-à-dire lorsqu'un des deux protocoles a, à la fois, le flux positif et le flux négatif le plus grand. Cela se produit lorsque le premier protocole obtient un score élevé pour certains critères (valeur du critère élevée pour un critère à maximiser et faible pour un critère à minimiser) pour lesquels le second protocole a un score faible, et que l'inverse est vrai pour d'autres critères. L'approche PROMETHEE II permet d'éviter cela en calculant un flux net qui permet un classement final sans protocoles incomparables, et qui est donc plus simple et plus facile à utiliser lors de communication des résultats aux acteurs. Toutefois, cela se fait au prix d'une perte d'information, la méthode PROMETHEE I permettant d'identifier les protocoles difficilement comparables. Les deux approches semblent donc assez complémentaires. L'existence d'un package R fournissant automatiquement le résultat des deux approches permet d'envisager d'utiliser les résultats des deux approches simultanément en exploitant leurs avantages respectifs.

La méthode utilisée pour définir les poids de chaque critère est également originale pour une approche en santé animale. En effet, les poids des critères sont classiquement déterminés par des approches directes, dans lesquelles il est directement demandé aux experts d'attribuer un note ou un poids aux critères (Anses, 2012 ; Maïano, 2014), ce qui peut se révéler difficile pour les experts, en particulier lorsqu'un grand nombre de critères sont pris en compte, et par conséquent fournir des résultats qui peuvent sembler peu fiables. Des méthodes indirectes ont toutefois déjà été utilisées en santé animale (Guo *et al.*, 2016), mais la technicité des questionnaires utilisés les rendait peu souples et difficiles d'utilisation. La méthode que nous avons utilisée avait pour but d'obtenir, plus facilement qu'avec les méthodes indirectes déjà utilisées en santé animale, des résultats moins arbitraires qu'avec des méthodes directes. Bien que le questionnaire établi en ce sens semblait long (28 questions) au premier abord, nous avons constaté que les personnes interrogées s'étaient facilement positionnées dans les comparaisons des critères deux à deux et avaient pu répondre en un temps très raisonnable, entre 7 et 27 minutes (avec une moyenne à 16 minutes). De plus, les poids calculés à partir des réponses à ce

Contribution personnelle – Chapitre 8. Construction d'un outil d'aide à la décision multicritère appliqué au choix d'un protocole de surveillance par dépistage périodique

questionnaire semblaient cohérents avec le contexte de chaque département (cf. discussion des résultats ci-dessous).

Les questionnaires permettant de définir les seuils étaient quant à eux assez courts (temps de réponse entre 4 et 13 minutes pour les présidents de GDS et entre 16 et 40 minutes pour les DDPP) et ont permis d'obtenir des réponses cohérentes. Les difficultés de compréhension de la signification des seuils de préférence et d'indifférence constatées lors du testage du questionnaire ont pu être surmontées, en particulier en changeant l'appellation du seuil de préférence en seuil de différence. Une fois conçu, ce type de questionnaire semble donc rapide et efficace à administrer, ce qui rend envisageable l'utilisation de cette méthode sur le terrain et la réévaluation fréquente de ces seuils en fonction du contexte dans lequel la décision doit être prise. De plus, même si dans notre cas l'obtention des réponses aux questionnaires a nécessité de nombreuses relances et donc beaucoup de temps, il est raisonnable d'envisager qu'une telle étude, si elle était menée à une échelle plus locale et initiée par les acteurs de terrain, serait beaucoup plus rapide à mettre en place puisque les acteurs interrogés seraient directement impliqués dans la démarche.

Les seuils utilisés dans cette analyse ont été définis par les représentants des différents acteurs qui peuvent avoir une vision biaisée de l'opinion des personnes qu'ils représentent. Il aurait été possible d'adresser ces questionnaires à un échantillon plus représentatif des acteurs interrogés, afin d'être encore plus confiant dans le caractère « moyen » des seuils définis. Toutefois, cela aurait nécessité beaucoup plus de temps et elle n'était pas indispensable pour cette première approche qui visait principalement à évaluer la faisabilité des méthodes multicritères en santé animale. Ainsi, les classements obtenus ne sont valables que si les seuils définis sont valides dans le contexte dans lequel on souhaite les utiliser. Il est toutefois facile de modifier les seuils si l'on souhaite les adapter à un contexte particulier pour obtenir un classement y étant adapté, ce qui rend cette approche particulièrement intéressante.

Les scores que nous avons construits pour représenter la difficulté de mise en œuvre des protocoles pour les VS et pour les éleveurs et la difficulté de gestion pour les DDPP peuvent sembler artificiels. En effet, nous avons interrogé les acteurs en question sur la difficulté de mise en œuvre et/ou de gestion des tests pris individuellement (annexe 33, annexe 34 et annexe 35), puis nous avons agrégé leurs réponses pour chaque test en fonction de la fréquence à laquelle ces tests étaient réalisés dans chaque protocole. Cette méthode nous a permis d'estimer la facilité de réalisation de façon standardisée pour tous les protocoles, en particulier pour les protocoles alternatifs pour lesquels il était impossible d'interroger directement les acteurs sur leur facilité de mise en œuvre, puisqu'ils ne sont pas utilisés actuellement sur le terrain. Néanmoins, l'utilisation de la méthode PROMETHEE n'impose pas l'approche à utiliser pour estimer la valeur des critères ; ainsi la méthode d'estimation de la facilité des protocoles peut être adaptée en fonction des contraintes inhérentes à la maladie étudiée.

Le résultat des classements est soumis à l'incertitude que l'on peut éventuellement avoir sur les valeurs des critères pour chaque protocole. Par exemple, nous avons calculé la valeur de la plupart de ces critères grâce aux modèles que nous avons développés précédemment ; ces valeurs sont ainsi soumises aux biais discutés dans les chapitres précédents. En particulier, les classements obtenus placent systématiquement les protocoles utilisant l'IDS en première intention au-dessus de leur homologue utilisant l'IDC1, mais la prise en compte des pratiques de terrain n'avait pas permis de mettre en évidence ni de différence significative de pratiques de l'ID entre les départements (différence dont l'existence fait pourtant consensus parmi les gestionnaires de la TB), ni de différence nette de pratiques entraînant une meilleure sensibilité de l'IDC par rapport à l'IDS. Ce classement entre les protocoles utilisant l'IDS1 et ceux utilisant l'IDC1 est donc susceptible de ne pas être valable dans certains contextes de pratiques non réglementaires dans lesquels la sensibilité de l'IDC de terrain serait supérieure à celle de l'IDS.

8.4.2. Résultats obtenus

Les poids des critères utilisés pour comparer les protocoles de dépistage de la TB entre eux, calculés à partir des réponses des DDPP, semblaient cohérents avec le contexte de chaque département. La Manche était le département avec le profil de poids le plus différent des autres départements : un poids moins important était accordé à la sensibilité du protocole et un poids beaucoup plus important au coût pour l'élevage. Ce poids du coût pour l'élevage était cohérent avec la perception d'un contexte économique local « défavorable » exprimé par le DDPP. Les autres départements accordaient tous un poids important à la sensibilité du protocole traduisant leur conscience de l'importance de la surveillance de la TB. Par ailleurs, la Dordogne se démarquait par une importance moindre accordée à la spécificité, ce qui était cohérent avec sa situation épidémiologique. En effet, dans le contexte épidémiologique de la Dordogne, où une des prévalences de la TB les plus élevées de France est constatée, et qui rencontre des difficultés d'éradication de la TB depuis plusieurs années, l'objectif principal est de détecter au maximum les élevages infectés, quitte à supporter un nombre assez important d'élevages faussement positifs à l'ID de première intention, et afin de lutter le plus efficacement possible contre l'infection. De plus, dans les départements indemnes de TB qui ne sont pas confrontés au dépistage systématique de la TB, la difficulté de mise en œuvre des protocoles pour l'éleveur n'était pas considérée comme un critère de choix d'un protocole de dépistage.

Le poids le plus important pour la spécificité et pour la sensibilité du protocole était accordé par la Nièvre (respectivement 20 % et 28 %). Cela s'explique sans doute par le contexte particulier de ce département qui, bien qu'indemne de TB, jouxte un département historiquement infecté (la Côte-d'Or). Ainsi, la proximité d'une zone historiquement infectée pousserait la DDPP de la Nièvre à souhaiter une forte sensibilité des protocoles de dépistage afin de s'assurer que l'infection ne s'étend pas à partir du département voisin, et son statut indemne la pousserait à accorder également une importance notable à la spécificité du dépistage.

Les questionnaires administrés ont permis de fixer des seuils de préférence et d'indifférence qui semblaient cohérents. Pour deux critères, certains acteurs avaient choisi un seuil de préférence et d'indifférence égal, ce qui ne posait pas de problème pour l'application de la méthode. Les seuils d'indifférence et de préférence fixés en Dordogne pour la spécificité étaient plus élevés, traduisant une plus grande tolérance vis-à-vis du nombre d'élevages faussement suspects, concordante avec le poids plus faible accordé à ce critère dans ce département et s'expliquant certainement de la même manière par son contexte épidémiologique. Les seuils fixés pour les animaux abattus « pour rien » étaient semblables d'un département à l'autre (lorsqu'exprimé en nombre d'animaux), mais plus élevés dans les départements comptant principalement des élevages de petite taille lorsque rapporté en pourcentage.

Pour les critères de difficulté de mise en œuvre et de gestion, estimés par scores, nous avons fixé des seuils théoriques. En effet, ces scores étant construits, il nous a semblé difficile pour les acteurs de se positionner sur des seuils qui ne correspondait pour eux à rien de concret. Le seuil d'indifférence a donc été fixé à zéro, faisant ainsi l'hypothèse que la moindre différence de score de facilité traduisait une différence significative entre deux protocoles. Le seuil de préférence a été fixé à 2, ce qui correspondait à l'écart entre la réponse « neutre » et les réponses « tout à fait d'accord », ou « pas du tout d'accord » dans les questions sur la facilité de réalisation des tests, et donc à un écart sémantique important qui peut légitimement être considéré comme entraînant une préférence forte pour le protocole avec le score de facilité de réalisation le plus faible. L'analyse de sensibilité a ensuite permis de déterminer dans quelle mesure ces hypothèses avaient une influence sur le classement final obtenu. Dans la plupart des cas, leur intervalle de validité était assez étroit, mais leur modification

avait principalement un impact sur le bas du classement (c'est-à-dire sur le classement des protocoles les moins appréciés les uns par rapport aux autres).

Les classements obtenus pour les dix protocoles analysés plaçaient systématiquement le protocole alternatif IDS1-confirmation IFNMIX en première position quel que soit le département, et l'analyse de sensibilité a mis en évidence une grande robustesse de cette première place. Ainsi, ce protocole était celui qui, d'après les préférences exprimées par les DDPP et d'après les seuils fixés par les acteurs, serait le plus adapté. Cela s'explique par le très faible coût pour l'élevage et pour l'État de ce protocole, combiné à une facilité de réalisation importante. En effet, l'IDS et l'IFNy étaient considérés comme faciles à mettre en œuvre et le nombre de tests à réaliser est minimal dans ce protocole. De plus, alors que sa sensibilité est inférieure à celle des autres protocoles (excepté le protocole IDC1-confirmation IFNMIX) (annexe 32)), la différence de sensibilité ne dépassait le seuil d'indifférence fixé que pour un ou deux protocoles (IDS1-abattage-recontrôle IFNMIX et/ou IDS1-abattage-recontrôle), en restant deux fois inférieur au seuil de préférence. Ainsi, même en comparant le protocole IDS1-confirmation IFNMIX aux protocoles IDS1-abattage-recontrôle IFNMIX et IDS1-abattage-recontrôle selon le critère sensibilité, la préférence pour ces derniers n'est qu'une préférence faible, alors même qu'ils sont excessivement plus coûteux (plus de dix fois plus). Ce résultat est cohérent avec l'évaluation coût-efficacité présentée dans le chapitre 4 de ce manuscrit. Ainsi, le protocole IDS1-confirmation IFNMIX, actuellement non autorisé par l'UE, semble être un bon compromis pour obtenir un équilibre coût/efficacité/acceptabilité satisfaisant du dépistage périodique en élevage.

Dans le contexte actuel de la généralisation de l'IDC, la question de l'intérêt du protocole IDC1-confirmation IFNMIX se pose. Dans les quatre départements étudiés, ce protocole était en seconde ou troisième position dans le classement de préférence, il semble donc être également un assez bon candidat d'équilibre coût/efficacité/acceptabilité. Toutefois, sa place dans le classement était moins robuste que pour le protocole IDS1-confirmation IFNMIX. En effet, l'analyse de sensibilité a montré qu'en utilisant des valeurs « extrêmes » pour les seuils ou les poids des critères, le protocole IDC1-confirmation IFNMIX pouvait se voir interverti dans le classement de préférence avec les protocoles réglementaires utilisés en cas de suspicion faible. Dans certains contextes, il pourrait donc assurer une moins bonne balance coût-efficacité que ces protocoles réglementaires.

Par ailleurs, quel que soit le département, le protocole IDC1-abattage-recontrôle IFNMIX était systématiquement en dernière place du classement de préférence. Les analyses de sensibilité ont également mis en évidence la robustesse de ce résultat, qui est cohérent avec l'analyse coût-efficacité du chapitre 4. Ainsi ce protocole ne semble pas être une bonne alternative aux protocoles réglementaires.

Pour les protocoles de dépistage réglementaires, les protocoles habituellement utilisés dans le cadre de suspicions faibles étaient préférés à ceux utilisés en cas de suspicion forte. Toutefois, au sein de ces groupes, le classement variait d'un département à l'autre et l'analyse de sensibilité a montré que les classements de préférence y étaient moins robustes. La préférence d'un protocole réglementaire au sein de ce groupe, par rapport à un autre pourra donc plus facilement varier en fonction des seuils (et éventuellement des poids de chaque critère) imposés par un contexte particulier.

Bilan

Nous avons ainsi pu appliquer au domaine de la santé animale une méthode d'aide à la décision multicritère et l'appliquer au choix d'un protocole de dépistage périodique pour la TB.

La méthode PROMETHEE présente l'avantage de ne pas nécessiter l'achat d'un logiciel, puisqu'un package R existe, et d'être facile à utiliser une fois les questionnaires nécessaires à la détermination des poids et des seuils créés. Elle produit un classement des protocoles à comparer en fonction des préférences exprimées par les décideurs et des seuils fixés pour chaque critère. Nous avons choisi de fixer ces seuils avec les représentants des acteurs qu'ils concernaient directement. Ainsi, tous les acteurs impliqués dans les protocoles à comparer peuvent être consultés afin d'obtenir un classement le plus réaliste possible. De plus, un très grand nombre de protocoles peuvent être comparés selon un nombre important de critères. Enfin, une fois la valeur de chaque critère pour chacun des protocoles à comparer connue, il est facile de modifier les seuils et les poids des critères, afin de les adapter à des contextes socio-économiques locaux pour obtenir un classement spécifique.

L'application de cette méthode au classement des protocoles de dépistage périodique de la TB a permis de mettre en évidence l'intérêt du protocole alternatif « IDS1-confirmation IFNMIX », proposé et évalué en termes de coût-efficacité dans le chapitre 4 de ce travail de thèse.

Chapitre 9. Discussion générale et perspectives de la thèse

L'objectif principal de cette thèse était d'évaluer le système de surveillance *ante mortem* de la tuberculose bovine en élevage en France. Les travaux qui en sont issus ont tout d'abord fourni des éléments concrets pour l'amélioration de la surveillance de la TB en France. En effet, ils ont permis de mieux comprendre les freins à une surveillance *ante mortem* efficace, et donc de proposer des pistes pour son amélioration et ont apporté des données quantitatives d'aide à la décision pour les gestionnaires. Par ailleurs, ces travaux constituent un apport méthodologique par le développement d'une méthode permettant la prise en compte des pratiques des acteurs dans les évaluations coût-efficacité par arbre de scénario, et par l'application à la santé animale d'une méthode d'aide à la décision multicritère. En effet, ces deux méthodes sont applicables à d'autres domaines de la santé animale (lutte, biosécurité...) et à d'autres agents pathogènes. Nous discuterons donc dans ce dernier chapitre, en premier lieu des principales limites de notre travail, puis de ses apports opérationnels et méthodologiques. Une dernière partie de cette discussion sera consacrée à en décrire les perspectives.

9.1. Les principales limites de ce travail

Une des principales difficultés de ce travail fut le paramétrage des arbres de scénario. En effet, afin d'être le plus réaliste possible, les arbres devaient être paramétrés à partir des données françaises, puisque chaque pays est caractérisé par une situation différente vis-à-vis de la TB. Or, les données françaises centralisées dans SIGAL sont incomplètes voire erronées, en particulier les données précises sur les résultats de l'ensemble des tests de dépistage et des analyses *post mortem*, qui nous auraient été très utiles pour l'estimation de nombreux paramètres clefs. De plus, la très grande hétérogénéité des pratiques de surveillance et les différences d'interprétation de certains termes réglementaires, tels que les élevages « à risque », compliquaient encore la situation. Ces difficultés nous ont conduit à utiliser des lois de distributions reflétant l'incertitude sur les paramètres, mais ont aussi pu entraîner des biais, déjà présentés dans les parties « discussion » de chaque chapitre du manuscrit.

Ce problème de centralisation des données est identifié de longue date et certains aspects sont en cours de résolution par la DGAI. Par exemple, une application permettant la saisie des résultats des ID par le VS directement sur le terrain (sur un smartphone ou une tablette) est en cours de développement. Cela permettra une synchronisation automatique des résultats saisis avec la base de données SIGAL, ce qui améliorera l'exhaustivité et la fiabilité des données et présentera l'avantage de diminuer la charge de travail administratif des VS lors des campagnes de dépistage périodique. Ce projet semble très prometteur pour améliorer la qualité des données centralisées, mais il est probable que son déploiement soit long, compte tenu des contraintes à prendre en compte afin qu'il puisse être adopté par l'ensemble de la profession vétérinaire : usage ergonomique adapté à son utilisation par le VS ; problème de la disponibilité des appareils permettant cette saisie ; etc.

Cependant, l'outil même de centralisation des données (SIGAL) est très peu pratique et très compliqué d'utilisation pour les autorités sanitaires locales. Les DDPP préfèrent ainsi souvent utiliser leurs propres supports, classeurs Excel®, documents PDF® ou Word®, Access®... pour la gestion de la surveillance, et renseigner ensuite les données obligatoires dans la base SIGAL (communication personnelle F. Chevalier). Il est évident que procéder de cette façon entraîne non seulement un surplus de travail pour ces personnes, déjà débordées, mais aussi un sur-risque d'erreur. Ainsi, une amélioration de l'ergonomie de cet outil pourrait inciter les DDPP à travailler directement à partir de cette base, ce qui permettrait une amélioration notable de la qualité des données.

Malgré le temps consacré aux enquêtes qualitatives et quantitatives, il n'a pas été possible de mettre en évidence de différences significatives des pratiques des VS entre les différents départements, bien que les experts soient unanimes sur leur existence. Ainsi, la prise en compte des pratiques d'ID n'a pas

pu être spécifique de chaque département et/ou contexte local. Les comparaisons de l'efficacité de la surveillance *ante mortem* entre départements a donc été faite à « pratiques de VS » supposées égales, ce qui constitue une limite non négligeable de ce travail. Ce point mériterait d'être étudié plus en détail, dans les départements où la TB pose actuellement problème, mais aussi dans les autres départements où les VS peuvent manquer d'expérience vis-à-vis de la TB, afin d'avoir une vision plus exacte des pratiques des VS dans ces zones et de ce qui les motive pour pouvoir proposer des solutions d'amélioration concrètes et adaptées au contexte local.

L'incertitude sur les caractéristiques des tests de dépistage était également un facteur limitant : bien que nous ayons pris en compte une certaine incertitude pour les estimer, une meilleure connaissance de ces caractéristiques dans les conditions françaises améliorerait l'exactitude de nos résultats. Cependant, des études sur le terrain ont déjà été réalisées pour estimer ces caractéristiques et c'est l'utilisation de données de terrain qui a créé, de fait, des biais incontournables. Une étude contrôlée avec abattage de tous les animaux de l'étude permettrait d'éviter ces biais mais serait très coûteuse, très longue, et n'apporterait finalement qu'une plus-value minime, puisque cela ne prendrait pas en compte les conditions de terrain. Bien qu'elles soient biaisées, les nombreuses études sur les caractéristiques des ID permettent donc tout de même d'avoir une idée des caractéristiques des tests relativement réalistes, et ce n'est donc sans doute pas sur ce paramètre que les efforts de recherche à venir devraient porter. Par ailleurs, la modélisation de l'impact des pratiques d'IDC sur la sensibilité et la spécificité du test était très simplifiée, à la fois par manque de données et par nécessité pour l'intégration aux arbres de scénario. En effet, les pourcentages de diminution de la sensibilité et d'augmentation de la spécificité étaient théoriques et peuvent avoir été surévalués. Ainsi, bien que le choix de modélisation de la direction de l'influence des adaptations de pratiques sur les caractéristiques de l'ID soit logique, et qu'il semble donc légitime de considérer que la direction estimée de l'influence des pratiques des VS sur la sensibilité troupeau des protocoles réglementaires reflétait la réalité, l'importance chiffrée de cet impact ne peut pas être considérée comme très exacte. Des études complémentaires permettant de mettre en regard les pratiques d'un VS avec les résultats obtenus aux tests et le statut infectieux des animaux correspondant seraient donc nécessaires. Elles permettraient d'affiner la modélisation de l'impact des pratiques d'IDC sur les caractéristiques du test. Cela n'a pas pu être fait dans cette première approche. En effet, les données françaises centralisées sur les résultats de l'IDC ne sont pas encore suffisamment fiables et détaillées, et leur collecte à l'échelle locale aurait été très longue.

Enfin, certains facteurs épidémiologiques importants n'ont pas été pris en compte dans notre travail, comme la présence d'animaux sauvages infectés et l'existence de ZPR (notion introduite dans la réglementation du dispositif de surveillance après le début de cette thèse). La présence d'animaux sauvages infectés dans le département peut influencer à la fois les protocoles de dépistage utilisés et l'acceptabilité des mesures de surveillance mises en œuvre. En effet, dans certaines zones, la présence d'animaux sauvages infectés procure un sentiment d'impuissance aux VS, qui peut les décourager à s'impliquer totalement dans la surveillance car cela leur semble vain (Guillon *et al.*, 2018). De plus, la détection de foyers sauvages a un impact sur la surveillance mise en place dans la zone (le dépistage y devient annuel), et sur la probabilité pour un élevage de cette zone d'être infecté (qui est à priori supérieure à la prévalence apparente supposée pour les troupeaux bovins). Ainsi, la non prise en compte de cet aspect a pu entraîner, dans les départements où des animaux sauvages sont régulièrement détectés (Sud-Ouest par exemple), une probable sous-estimation des adaptations des pratiques des VS et une sous-estimation de la probabilité pour les élevages dépistés en prophylaxie d'être infectés, et donc *in fine* une sous-estimation de la sensibilité du dépistage périodique.

9.2. Optimisation de la surveillance *ante mortem*

9.2.1. Amélioration de la compréhension des interactions entre les freins épidémiologiques, économiques et sociaux

Tout d'abord, cette évaluation a permis de mieux comprendre les freins à l'éradication de la TB, identifiés en amont de ce travail de thèse. Bien que les facteurs épidémiologiques, économiques et sociologiques soient distingués les uns des autres dans le titre de la thèse, nos travaux ont mis en évidence leur enchevêtrement et la nécessité de les envisager en tant que facteurs interagissant entre eux, plutôt que comme des freins indépendants les uns des autres. Ainsi, si la faible prévalence de l'infection sur le territoire, couplée à la présence d'espèces sauvages infectées, et à des tests de dépistage *ante mortem* imparfaits, entrave certainement l'éradication de la TB, elle ne le fait pas uniquement par son impact purement technique / épidémiologique, mais également *via* son interaction avec les autres freins. En effet, ces paramètres entraînent une défiance des acteurs vis-à-vis des tests de dépistage, un sentiment de lassitude et d'inefficacité, qui est sans doute en partie à l'origine du frein sociologique (manque d'implication des acteurs, pratiques de terrains non réglementaires, problème de relation entre certains acteurs dans certains départements, enjeux d'intérêts entre vétérinaires et éleveurs qui peut pousser à une adaptation des mesures). À cela s'ajoute le frein économique : les budgets sont limités et doivent être alloués efficacement afin d'optimiser le rapport coût/bénéfice. Ainsi, la prévalence apparente de la TB dans une zone (facteur épidémiologique) a une influence sur les budgets alloués à la surveillance de cette infection. Dans une zone où la TB est très présente, ou était historiquement très présente, plus de moyens humains et financiers seront logiquement investis par la DDPP, par rapport à une zone avec une très faible prévalence et historiquement indemne. Par exemple, en Côte-d'Or, zone historique de forte prévalence de TB, des moyens humains et financiers importants ont été déployés afin de contrôler la TB. Ces moyens se sont révélés efficaces : ils ont permis une gestion plus fluide de la surveillance (car des personnes travaillent à temps plein sur la surveillance de la TB) et une bonne sensibilisation des acteurs de terrain (VS et éleveurs) *via* la formation, augmentant leur motivation ainsi que leurs connaissances vis-à-vis de la TB et des bonnes pratiques de tuberculination. De plus, l'ancienneté de l'infection dans ce département a pu ajouter à la motivation des éleveurs et des VS pour éradiquer la TB et a pu permettre aux VS et aux éleveurs de gagner en expérience sur respectivement la réalisation du geste technique d'ID et sur la contention des animaux dans le contexte du dépistage. Un fait épidémiologique nouveau (comme la présence d'individus de la faune sauvage infectés) peut grandement déséquilibrer cette motivation et réduire l'implication des acteurs, fragiliser le réseau et donc l'efficacité de la surveillance. C'est cette compréhension détaillée de l'interaction des facteurs entre eux qui permet d'entrevoir des solutions d'amélioration applicables sur le terrain.

9.2.2. Amélioration des protocoles de surveillance

L'évaluation coût-efficacité de chaque composante de surveillance, et de chacun de leurs protocoles réglementaires, a tout d'abord fourni des données quantitatives, inexistantes jusqu'à présent, et utiles pour les prises de décision des gestionnaires de la surveillance.

De plus, cette évaluation a permis d'identifier les points d'amélioration de chacun des protocoles, présentés de manière détaillée dans les chapitres correspondants. En effet, nous avons pu identifier les paramètres ayant le plus d'influence sur l'efficacité (adaptation des pratiques d'IDC et de déclaration des résultats non-négatifs, taille du troupeau contrôlé, etc.) et les coûts (délai entre chaque étape des protocoles qui augmente les coûts indirects à la charge de l'éleveur notamment) dont certains peuvent être améliorés. Leur identification nous a permis de proposer, pour la composante du dépistage périodique en élevage, des protocoles alternatifs utilisant l'IFN γ , qui permettraient de diminuer le délai entre les étapes des protocoles, de limiter l'impact des adaptations de pratiques d'IDC et, sans doute, *via* une amélioration de l'acceptabilité du protocole, d'augmenter le pourcentage de déclaration des suspicions. L'un des protocoles proposés, dans lequel l'utilisation du test IFN γ

permettrait de requalifier un élevage, sans avoir reconstruit le troupeau en IDC, a été estimée comme potentiellement plus efficace que tous les protocoles réglementaires, et était en tête du classement des protocoles suite à la réalisation de l'analyse multicritère mêlant des critères épidémiologiques, économiques et des critères représentant l'acceptabilité des protocoles. Ce protocole alternatif serait donc un levier potentiel pour permettre l'amélioration de la surveillance à moyen terme. Toutefois, l'utilisation de l'IFNy en série n'est pour l'instant autorisée par l'UE qu'à titre expérimental. Nos résultats pourront ainsi être utilisés pour appuyer, avec des données quantitatives (coût-efficacité du protocole) et qualitatives (classement des protocoles les uns par rapport aux autres en fonction des préférences des gestionnaires de la santé animale), une éventuelle demande qui pourrait être adressée à l'UE afin de soutenir l'utilisation de l'IFNy selon l'interprétation MIX en série, dans les protocoles de dépistage périodique en élevage de la TB. Cette partie de notre travail apporte donc des données quantitatives concrètes sur lesquelles la France pourra s'appuyer pour mener l'action 9 de l'objectif 2 du plan national de lutte contre la tuberculose bovine (Saidou, 2018) : « *faire évoluer le cadre réglementaire européen afin d'apporter des garanties sanitaires équivalentes sinon meilleures aux échanges commerciaux, en particulier en permettant le recours au test de dosage de l'interféron gamma pour alléger la gestion des suspicions* ».

L'évaluation coût-efficacité des protocoles d'investigation des liens épidémiologiques avuls nous a permis de mettre en évidence le protocole le plus efficace (abattage systématique de l'animal en lien), fournissant ainsi aux autorités sanitaires des arguments quantitatifs permettant d'encourager son utilisation systématique.

Nos travaux ont également permis d'avoir une première vision quantitative globale des pratiques d'IDC et de déclaration des VS, et de leur potentiel impact sur l'efficacité de la surveillance. Ils ont ainsi souligné l'importance des efforts de sensibilisation et de formation toujours en cours, ainsi que de l'aide que reçoivent ces VS sur le terrain lors de la réalisation des IDC. Nous avons, sans grande surprise, mis en évidence que l'efficacité du test de dépistage était un facteur clé de réussite de la surveillance de la TB. Malheureusement, l'ID est un test contraignant à réaliser et avec une efficacité très imparfaite, et les pistes pour mettre au point de nouveaux tests de dépistage plus faciles à mettre en œuvre et plus efficaces qui sont en cours (García *et al.*, 2019) sont encore loin d'aboutir pour le moment. Le système de surveillance actuel doit donc s'appuyer sur ces tests disponibles (ID et IFNy) et poursuivre les efforts d'amélioration des pratiques de terrain afin d'exploiter au mieux les capacités de dépistage de ces tests.

9.2.3. Amélioration du système de surveillance *ante mortem*

La complexité du système de surveillance de la TB et la grande variabilité de son application sur le terrain sont soulignées dans la réponse de l'Anses à la saisine du 2 Août 2018, n°2018-SA-0186, de la DGAL (Avis de l'Anses, 2019). En effet, cette complexité favorise les adaptations de pratiques et augmente le travail des gestionnaires sanitaires qui doivent évaluer individuellement chaque situation. Les résultats obtenus dans nos travaux sont cohérents avec les recommandations formulées par l'Anses et peuvent fournir à la DGAL des pistes de simplification du système de surveillance.

L'évaluation globale à l'échelle des départements a permis de mettre en évidence les composantes primordiales, par la sensibilité qu'elles apportent à la surveillance (dépistage périodique dans les zones infectées et investigation dans les élevages en lien épidémiologique avuls), et celles qui, telles qu'elles sont actuellement appliquées, ne jouent qu'un rôle limité dans l'efficacité de la surveillance, et pourraient même avoir un effet négatif en participant à la lassitude des acteurs, comme c'est le cas du dépistage aux mouvements. Nous avons en effet montré que le dépistage des animaux lors de leurs mouvements, tel qu'il est actuellement mis en œuvre, participe de façon négligeable à l'efficacité globale de la surveillance *ante mortem* de la TB. Ce constat apporte des éléments de réponses complémentaires aux autorités sanitaires qui, à la vue du très faible nombre de foyers détectés par cette composante (moins d'un foyer par an), s'interrogeaient sur la nécessité et l'intérêt de maintenir

ces mesures (saisine de l'Anses du 2 Août 2018, n° 2018-SA-0186). Les résultats de cette saisine suggéraient d'ailleurs que la suppression de cette composante ne diminuerait pas de façon significative l'efficacité de la surveillance, mais qu'il pourrait être utile de conserver cette obligation pour les élevages « à risque » et faisant partie d'une ZPR (Avis de l'Anses, 2019). Dans ce travail, par manque de données, nous n'avons pas pu prendre directement en compte les ZPR, mais nos résultats suggèrent que, dans les élevages « à risque », même en prenant en compte leur sur-risque d'infection, le dépistage aux mouvements ne serait pas un moyen de détection de la TB très efficace. L'Anses suggérerait d'ailleurs de conserver ce dépistage pour protéger les élevages indemnes de l'introduction d'un animal infecté, plus que pour détecter l'infection dans les élevages. Toutefois, la pression de surveillance est forte dans les ZPR et un animal vendu a, à priori (sauf s'il a moins de 24 mois), déjà été soumis à une IDC dans l'année précédant sa vente. Dans ce contexte, imposer un second dépistage aux éleveurs est discutable pour les animaux de plus de 24 mois, compte tenu de la faible prévalence intra-troupeau de l'infection et donc de la faible valeur prédictive positive du test. Toutefois, pour les animaux de moins de 24 mois et de plus de 6 semaines destinés à être conservés dans l'élevage en tant que reproducteurs, un dépistage aux mouvements pourrait être intéressant pour protéger l'élevage de l'introduction d'un bovin infecté. Pour cela, compte tenu de la difficulté technique de l'IDC sur les animaux jeunes, et de la moins bonne sensibilité de l'IFNy par rapport à une IDS de première intention, l'utilisation de l'IDS semblerait la plus indiquée.

9.3. Apports méthodologiques

9.3.1. Prise en compte des pratiques de terrain dans la modélisation par arbre de scénario

La méthode de modélisation par arbre de scénario avait déjà fait preuve de son utilité pour évaluer des systèmes de surveillance en santé animale. En effet, elle présente l'avantage de pouvoir utiliser des données d'origines variées pour une évaluation globale de la composante d'un système de surveillance et éventuellement du système de surveillance en entier. De plus, il est possible, grâce à cette méthode, de prendre en compte, avec une approche stochastique, la variabilité (par exemple l'hétérogénéité populationnelle des élevages) et/ou l'incertitude existante sur certains paramètres du système. Ainsi, cette méthode avait déjà été largement utilisée pour évaluer des systèmes de surveillance en santé animale dans les années précédant le début de ce travail de thèse, qui, de ce fait, n'apporte donc qu'une illustration supplémentaire de son intérêt dans l'évaluation d'un système de surveillance en santé animale. Néanmoins, jusqu'ici ces applications de la méthode ne prenaient pas en compte les pratiques des professionnels de terrain, ou les prenaient en compte de façon extrêmement succincte et simplifiée. Ainsi, lorsqu'elles étaient étudiées, ces pratiques étaient le plus souvent évaluées séparément et qualitativement (cf. I.1.5.2.3). Elles peuvent cependant avoir un impact important sur l'efficacité finale du système de surveillance (Pfeiffer, 2006). C'est pourquoi nous avons souhaité en tenir compte dans nos arbres de scénario. Ainsi, nos travaux ont permis de poser les bases d'une nouvelle méthodologie permettant la prise en compte, dans les évaluations quantitatives des systèmes de surveillance par arbre de scénario, des pratiques clés de la mise en œuvre sur le terrain des protocoles, en couplant une approche qualitative (entretiens semi-directifs) à des approches quantitatives (questionnaires et analyses par régressions). Nous avons développé cette méthode car la prise en compte des pratiques des acteurs, en particulier celles d'ID et de déclaration des résultats non-négatifs par les VS, était primordiale dans l'évaluation du système de surveillance *ante mortem* de la TB, vu les nombreuses adaptations existantes qui pouvaient avoir un impact négatif sur l'efficacité de la surveillance (Crozet *et al.*, 2019). Cette méthode a donc permis d'ajouter une plus-value à l'évaluation de l'efficacité de la surveillance *ante mortem* de la TB, en permettant la prise en compte d'un facteur clé de cette surveillance, et *in fine* l'identification, parmi ces facteurs, de leviers d'amélioration de la surveillance. Par ailleurs, cette méthode est généralisable. En effet, elle peut être

adaptée à l'évaluation de l'efficacité de la surveillance d'autres agents pathogènes, dans d'autres populations animales. Tous les types de système de surveillances en santé animale peuvent donc potentiellement tirer parti de cette méthode, puisque les pratiques des acteurs de la surveillance conditionnent forcément leur efficacité. Certains écueils rencontrés lors de l'application de cette méthode à la surveillance *ante mortem* de la TB permettent de formuler des recommandations pour son utilisation ultérieure pour d'autres évaluations de systèmes de surveillance. En particulier, pour la TB, nous n'avons pas réussi à mettre en évidence de différences significatives de pratiques entre les départements, bien que leur existence fasse consensus parmi les experts et les gestionnaires de la TB. Ainsi, certains facteurs importants, bien qu'identifiés au préalable au cours de l'approche qualitative, peuvent être négligés par manque de puissance statistique et il convient donc de s'assurer d'un nombre de réponses suffisant pour l'interprétation des résultats de l'enquête quantitative. Par ailleurs, les résultats de l'approche qualitative doivent être gardés à l'esprit lors de l'interprétation et de la discussion de l'évaluation réalisée. De plus, pour appliquer cette méthode à d'autres agents pathogènes et/ou dans d'autres populations animales, il est nécessaire d'avoir une bonne idée des points potentiellement critiques du système de surveillance à évaluer, en termes de pratiques (acteurs impliqués ; type de pratiques : réalisation technique du test sur le terrain, déclaration des suspicions, contention... ; existence de pratiques s'écartant de la réglementation ou des bonnes pratiques). Cette connaissance peut préexister empiriquement et être approfondie de façon plus ciblée à travers l'étape qualitative de la méthode, comme cela fut le cas pour la TB (ciblage des pratiques d'ID et de déclaration des VS), ou elle peut nécessiter la mise en œuvre d'enquêtes qualitatives à plus grande échelle, incluant un nombre plus important de personnes interrogées pour chaque catégorie d'acteurs et ciblant des départements très contrastés, afin d'identifier la variété des pratiques, et de pouvoir débiter l'enquête quantitative sur de bonnes hypothèses initiales.

9.3.2. Adaptation d'un outil d'aide à la décision multicritère

9.3.2.1. Un outil prometteur pour la santé animale

Un second outil méthodologique a également pu être expérimenté dans ce travail : une méthode d'aide à la décision multicritère, la méthode PROMETHEE, a pu être appliquée au domaine de la santé animale. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir comparer un grand nombre d'alternatives selon un grand nombre de critères. En santé animale, ces alternatives peuvent être des protocoles de surveillance ou de lutte mais aussi des maladies à prioriser par exemple. Les critères utilisés peuvent être de nature très différente : il est possible de prendre en compte simultanément des critères classiquement utilisés et pouvant être estimés quantitativement (sensibilité en pourcentage, coûts directs et indirects en euros, etc.), des critères binaires (par exemple le fait d'être une zoonose ou non pour une maladie) et des critères plus qualitatifs, comme par exemple la difficulté de mise en œuvre de protocoles ou leur acceptabilité par les acteurs. Ainsi, le choix des critères de comparaison n'est pas contraint par la méthode, et leur choix peut donc et doit donc être adapté spécifiquement au problème de décision à résoudre.

Nous avons appliqué cette méthode au choix d'un protocole de dépistage périodique de la TB, selon des critères reflétant leurs caractéristiques sur le plan technique, économique et leur acceptabilité pour plusieurs acteurs (VS, éleveurs, DDPP). Telle que nous l'avons appliquée, cette méthode présente l'avantage d'inclure tous les acteurs de la surveillance dans le processus. En effet, même si l'objectif est de classer les protocoles selon les préférences du gestionnaire qui va prendre la décision, les seuils de chacun des critères pris en compte sont définis par les acteurs concernés. Ainsi, si on prend l'exemple du coût du dépistage supporté par l'éleveur, c'est bien le gestionnaire qui va définir l'importance qu'il accorde à ce critère (*via* le poids attribué au critère), mais ce sont les représentants des éleveurs qui fixent les seuils d'indifférence et de préférence. Sous l'hypothèse que leurs représentants aient une vision assez représentative de l'opinion des éleveurs, leur point de vue, et donc leur acceptabilité (ou non) du protocole, est ainsi intégré dans le classement final. Le résultat de

l'analyse sera donc plus acceptable par l'ensemble des acteurs, puisque leur point de vue a été pris en compte.

De plus, une fois les questionnaires nécessaires à la détermination des poids et des seuils rédigés, et une fois que les valeurs de chaque critère pour chaque protocole à comparer ont été estimées, l'application de la méthode est facile et ne nécessite pas de logiciel spécifique ni de compétences poussées en mathématiques puisqu'un package R existe et fournit directement et rapidement les valeurs des indicateurs permettant le classement des protocoles entre eux. Ainsi, il est facile de modifier les seuils et/ou les poids et d'obtenir le classement des protocoles. Il serait donc possible d'utiliser cette approche à l'échelle locale en adaptant les seuils et les poids au contexte, et même, si nécessaire, de l'utiliser pour faire du cas par cas en adaptant les seuils (par exemple de coût pour l'éleveur), à un élevage en particulier. Cet outil est donc prometteur en santé animale car il pourrait être utilisé directement par les gestionnaires au niveau local.

Une autre approche pourrait être de fixer les poids des critères au niveau national par exemple, en fonction des situations épidémiologiques, et de n'adapter, au niveau local, que les seuils de différence ou d'indifférence au contexte local, afin de garantir une homogénéité des choix à l'échelle nationale mais en tenant tout de même compte des particularités locales.

Malgré tous ces avantages, et alors qu'elle est déjà utilisée dans d'autres domaines depuis de nombreuses années, cette méthode ne fait pour l'instant pas partie des méthodes largement utilisées en santé animale. Cela s'explique sans doute par la difficulté de compréhension de la méthode en première approche, notamment les notions de seuils de préférence et d'indifférence qui peuvent sembler obscures. L'estimation des valeurs des critères à prendre en compte pour chacune des alternatives à étudier, si elles ne préexistent pas, peut également être un frein à l'utilisation de cette méthode. De plus, la méthode d'agrégation des comparaisons est moins facile d'approche que les agrégations par somme pondérée ou les approches multiplicatives, inspirées de l'analyse de risque. Enfin, pour exploiter complètement les bénéfices de la méthode, il est nécessaire de recueillir des informations de la part de l'ensemble des acteurs du problème étudié (comme nous l'avons fait en faisant fixer les seuils de préférence et d'indifférence par des représentants d'éleveurs et par des responsables de DD(cs)PP et en recueillant l'avis des représentants de VS sur les tests de dépistage). L'avis de nombreux acteurs nécessite ainsi d'être recueilli, avec des questionnaires spécifiques pour chacun, et aucun ne doit manquer, ce qui peut complexifier la gestion de l'étude, par rapport à une approche où l'on utilise un panel d'expert identifiés au début de l'étude, qui se positionnent sur l'ensemble des poids et des critères.

9.3.2.2. Une nouvelle approche pour attribuer des poids à des critères

De plus, l'application de cette méthode d'analyse multicritère a permis de tester une nouvelle méthode d'attribution des poids à un ensemble de critères qui n'était, à notre connaissance, pas utilisée en santé animale. Or, la pondération des critères est une problématique assez fréquente en santé animale, par exemple pour la priorisation de maladies les unes par rapport aux autres. Les approches directes habituellement utilisées -dans lesquelles il est demandé aux experts, soit d'attribuer des points à chacun des critères pour obtenir un total de 100 points, soit d'attribuer directement un poids à chaque critère- peuvent se révéler un exercice fastidieux lorsqu'un grand nombre de critères sont pris en considération et ceci peut conduire à l'attribution de poids approximatifs avec des résultats non standardisés. La méthode que nous avons utilisée, issue de la discipline de l'aide à la décision multicritère, demande aux experts de se positionner sur des comparaisons binaires ce qui est plus facile. De plus, bien que la liste de questions nécessaires soit assez longue (du fait de la nécessité de comparaisons deux à deux des critères), l'application de cette méthode à l'aide à la décision pour le choix d'un protocole de dépistage de la TB a montré que les personnes interrogées répondaient assez rapidement et facilement au questionnaire. Ainsi, cette méthode de pondération pourrait être utilisée dans d'autres contextes, en santé animale, afin de faciliter le positionnement des experts et de standardiser l'attribution des poids.

9.4. Perspectives

9.4.1. Améliorer le modèle et les méthodes utilisées

Certaines perspectives de cette thèse découlent directement de ses limites.

Tout d’abord, comme nous l’avons souligné précédemment, l’amélioration de la centralisation des données est initiée par la DGAI, en collaboration avec des représentants des différents acteurs de la surveillance, mais devrait prendre un certain temps car le nouvel outil en développement doit être adapté aux conditions de terrain et acceptable par les VS. Toutefois, une fois la centralisation des données améliorée, il serait intéressant de ré-estimer les paramètres des arbres de scénarios, comme par exemple la proportion de chaque protocole appliqué sur le terrain, les caractéristiques de l’IDC, la proportion d’animaux reconstrués, etc., afin de pouvoir proposer un paramétrage plus adapté de nos modèles.

De plus, il pourrait être envisagé d’enquêter plus finement sur les pratiques des VS en ciblant quelques départements d’intérêts (par exemple ceux du Sud-Ouest où ont été détectés un nombre croissant de foyers ces dernières années), afin d’obtenir une estimation coût-efficacité plus réaliste et en phase avec les pratiques réelles de terrain. De nouvelles investigations des pratiques des VS pourraient également être envisagées, en sélectionnant de grands échantillons dans des départements contrastés en termes de contexte local et d’historique de la TB, afin d’essayer de mettre en évidence l’impact de ces paramètres sur les pratiques d’ID, influence qui semble faire consensus mais n’a pas pu être mise en évidence dans nos travaux.

L’amélioration des méthodes d’intégration des données sur les pratiques serait également nécessaire. Pour cela, l’impact des adaptations des pratiques sur les caractéristiques de l’IDC doit être précisé à l’aide d’études supplémentaires. Ceci nécessiterait de pouvoir mettre en parallèle, pour un grand nombre de VS, les pratiques de chaque VS, avec les résultats de tous les tests de dépistage qu’il a effectué et avec le statut infectieux des animaux correspondants, obtenu suite à la réalisation d’analyses de laboratoire (ou de pouvoir mener des expérimentations en laboratoire ce qui serait très coûteux). Malheureusement, les données françaises actuelles sur les résultats de l’IDC et sur les investigations dans les élevages suspects ne sont pas suffisamment détaillées et fiables, et leur collecte à l’échelle locale serait très longue. L’amélioration de cette prise en compte de l’impact des pratiques modifiées sur l’efficacité de l’ID permettrait d’avoir une vision plus détaillée de l’impact de chaque adaptation sur le coût et sur l’efficacité de la surveillance, et de potentiellement distinguer les pratiques avec un impact négatif fort sur l’efficacité de la surveillance –à proscrire absolument–, des pratiques avec peu ou pas d’impact négatif et même éventuellement avec un impact positif sur le coût et l’efficacité de la surveillance. En effet, les études déjà conduites pour mettre en évidence que des écarts aux pratiques recommandées étaient incompatibles avec une surveillance efficace ne permettaient pas ce niveau de détails (Bénet *et al.*, 2012 ; Lambert et Bénet, 2015).

La prise en compte du zonage (*i.e.* du dépistage annuel dans les élevages situés à proximité d’un foyer de TB domestique ou sauvage) dans nos modèles serait également très intéressante, d’autant plus que l’évolution actuelle de la surveillance en France tend à généraliser la mise en place des ZPR, et que Palisson *et al.* (2016) ont mis en évidence la proximité géographique de la plupart des élevages infectés. Pour pouvoir prendre en compte les ZPR dans nos modèles, il faudrait obtenir une liste des élevages en ZPR et être capable d’estimer le sur-risque d’infection de ces élevages par rapport à un élevage hors ZPR.

9.4.2. Compléter l’évaluation de la surveillance de la TB

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la surveillance *ante mortem* de la TB en élevage, c’est-à-dire aux composantes « dépistage périodique en élevage et investigation des

suspensions associées », « enquête auprès des élevages en liens épidémiologiques avec les foyers découverts » et « dépistage aux mouvements ». Deux composantes sont manquantes afin d’avoir une évaluation globale de l’ensemble de la surveillance de la TB en France : la surveillance de l’infection dans la faune sauvage et la surveillance *post-mortem* en abattoir.

La surveillance de la faune sauvage a déjà fait l’objet d’une évaluation coût-efficacité (Rivière *et al.*, 2015) et de nombreuses investigations (Bouchez-Zacria *et al.*, 2018 ; Rivière *et al.*, 2018). Ainsi, la composante faune sauvage de la surveillance *ante mortem* de la TB pourrait être prise en compte dans notre modèle. En effet, dans les départements encore infectés, la faune sauvage est un grand point d’inquiétude et un frein évident (ne serait-ce que par son impact sur la motivation des acteurs) du contrôle de la TB. Ainsi, il serait possible d’estimer la part de la surveillance de la faune sauvage dans l’efficacité de la surveillance de la TB en France. De plus, cela permettrait de modéliser l’efficacité de la surveillance ciblée des cheptels bovins en voisinage avec les foyers de faune sauvage.

En revanche, la surveillance reposant sur le dépistage à l’abattoir a été peu étudiée, malgré son rôle important dans la surveillance de la TB dans les départements où le dépistage périodique a été arrêté. Il serait donc nécessaire d’en faire une évaluation coût-efficacité, en y incluant les pratiques des techniciens et des vétérinaires d’abattoir. Pour cela, il sera possible d’utiliser la même méthode que pour la prise en compte des d’ID : commencer par une approche qualitative, à travers des entretiens semi-directifs de techniciens et de vétérinaires d’abattoir, dans des départements variés en termes de prévalence et d’historique de la TB, afin de comprendre le contexte d’application de ces mesures de surveillance et d’identifier les points de difficultés ainsi que les pratiques non réglementaires et les facteurs pouvant les influencer ; puis compléter par une approche quantitative *via* des questionnaires, permettant de quantifier la fréquence des pratiques et de leurs facteurs d’influence. Des travaux ont déjà été initiés en ce sens (Pujol-Dupuy, 2014 ; Balon, 2017) mais nécessiteraient un approfondissement conséquent. Une des principales difficultés de cette étude serait sans doute d’estimer le plus exactement possible la probabilité pour qu’une lésion évocatrice de tuberculose bovine soit effectivement détectée par le personnel d’abattoir.

Par ailleurs, un modèle mathématique prenant en compte le temps et la diffusion de l’infection, auquel seraient intégrées les mesures de surveillance, permettrait d’avoir une meilleure idée de l’efficacité de la surveillance dans l’éradication de la TB dans le temps. Cette approche serait complémentaire de notre approche par arbre de scénario : elle fournirait une vision plus dynamique de la surveillance et permettrait d’évaluer la capacité du système de surveillance à aboutir à l’éradication de la TB sur le territoire. La construction d’un tel modèle pourrait s’appuyer sur les modèles dynamiques déjà élaborés pour évaluer les mesures de lutte contre la TB en France (Ladreyt *et al.*, 2018). L’idéal serait de pouvoir y intégrer la faune sauvage en utilisant, là aussi, les travaux déjà réalisés à ce sujet (Rivière *et al.*, 2015 ; Bouchez-Zacria *et al.*, 2018).

9.4.3. Évaluer des systèmes de surveillance alternatifs

Le modèle construit pendant ce travail de thèse pourrait servir à la modélisation de systèmes de surveillance alternatifs. Dans d’autres pays officiellement indemnes, le dépistage périodique a été abandonné au profit d’une surveillance fondée sur le dépistage à l’abattoir, le dépistage chez les animaux importés et les investigations des liens épidémiologiques. De plus, en France, la tendance actuelle est à la généralisation de l’IDC et à l’allègement du dépistage périodique, avec un dépistage renforcé dans des zones ciblées (ZPR) dans lesquelles les élevages ont, a priori, plus de risque d’être infectés. L’adaptation de notre modèle pourrait, par exemple, permettre d’évaluer le rapport coût-efficacité d’un système de surveillance modifié, dans lequel ne seraient maintenus que les investigations des liens épidémiologiques et un dépistage périodique annuel uniquement en ZPR, avec application du protocole « abattage-recontrôle IDC » pour les élevages suspects dont la probabilité d’infection est très importante et l’investigation selon le protocole « confirmation IFNMIX » pour ceux

pour lesquels elle est faible. Ainsi, on pourrait évaluer « *in vitro* » des mesures d'allègement et de simplification du dispositif de surveillance afin d'estimer leur impact sur le coût et la sensibilité de la surveillance et donc l'opportunité de les mettre en œuvre.

9.4.4. Investiguer d'autres aspects du contrôle de la TB

L'éradication d'une infection ne peut être atteinte qu'en combinant surveillance, lutte et prévention, dont les modalités doivent être définies en s'appuyant sur des connaissances scientifiques. Dans le cas de la TB, les mesures de lutte ont déjà fait l'objet de plusieurs études (Hosteing, 2015 ; Poirier, 2017 ; Ladreyt *et al.*, 2018) mais de nombreux travaux restent à envisager concernant la prévention.

En particulier, la biosécurité est définie par l'UE (règlement UE 2016/429) comme l'ensemble des mesures de gestion et des mesures matérielles destinées à réduire le risque d'introduction, de développement et de propagation des infections à destination, au départ et au sein d'une population animale. C'est un point central du contrôle au sens large d'un grand nombre d'infections, notamment de la TB. En effet, la mise en place de mesures de biosécurité permet d'éviter la diffusion de l'infection à l'échelle inter-troupeau, en évitant les contacts entre animaux (domestiques ou sauvages) infectés et animaux sains et en limitant le risque de contamination par des vecteurs mécaniques par exemple. Pourtant, malgré les nombreuses études permettant la mise en évidence de facteurs de risque potentiels ou avérés pour la TB, les mesures de biosécurité associées ne sont pas systématiquement mises en place par les éleveurs. Ainsi, l'Irlande du Nord (O'Hagan *et al.*, 2016), la France (Oulhen, 2011 ; Renault *et al.*, 2018b), la Belgique (Sarrazin *et al.*, 2014 ; Renault *et al.*, 2018a) et de nombreux autres pays ont décrit un faible niveau de biosécurité dans les élevages bovins (contrairement à ce qui est constaté dans les élevages porcins et aviaires intensifs par exemple) (Sahlström *et al.*, 2014 ; Sarrazin *et al.*, 2014). Si la systématisation des mesures de biosécurité a commencé dans les élevages porcins et aviaires, les autorités sanitaires cherchent maintenant à l'étendre aux élevages bovins (Véron *et al.*, 2018). Ainsi, on constate que les études sur la biosécurité dans les élevages bovins sont récentes et encore relativement peu nombreuses. Dans les élevages bovins, les conduites d'élevage (plein air ou stabulations ouvertes sur l'extérieur, pas de conduite en bandes, etc.) impliquent des mesures de biosécurité souvent plus onéreuses et plus difficiles à appliquer que dans les élevages avicoles et porcins fermés, et donc moins acceptables par les éleveurs.

Pour la TB, les données manquent sur l'efficacité et la faisabilité de mesures de biosécurité concrètes. Ces données sont nécessaires pour identifier les mesures à promouvoir. Ainsi, il conviendrait d'évaluer des mesures de biosécurité concrètes en termes d'efficacité. Il faudrait pour cela mettre en place des indicateurs techniques simples et mesurables comme, par exemple, pour les mesures visant à réduire ou éviter les contacts entre animaux infectés et animaux indemnes, le nombre de contacts évités. L'évaluation de mesures de biosécurité visant à éviter le contact avec des blaireaux infectés avait été réalisée au Royaume-Uni, en mesurant simplement la diminution de la fréquentation des élevages par ces animaux, après la mise en place de mesures anti-blaireau (portes et clôtures pleines en métal ou clôture électrifiée) (Judge *et al.*, 2011). Toutefois, il existe peu d'autres publications mesurant directement l'efficacité des mesures de biosécurité (Véron *et al.*, 2018). En effet, leur efficacité est généralement estimée soit grâce à des avis d'experts (par exemple avec une méthode DELPHI (Kuster *et al.*, 2015), soit de façon globale en évaluant la corrélation entre le niveau de biosécurité des élevages et la présence d'une ou de plusieurs maladie(s) choisie(s) (Assié *et al.*, 2009 ; Cardwell *et al.*, 2016 ; Oliveira *et al.*, 2017 ; Renault *et al.*, 2020) ou le niveau de certains indicateurs de santé comme le taux de mortalité chez les adultes ou les veaux (Renault *et al.*, 2020). Ces approches globales sont intéressantes, car elles permettent de mettre en évidence les bienfaits généraux d'un haut niveau de biosécurité dans un élevage, et fournissent ainsi des arguments tangibles qui peuvent aider à encourager leur mise en place. Elles pourraient être envisagées, par exemple pour évaluer la corrélation entre l'infection des élevages bovins par la TB et la mise en place de mesures de biosécurité,

permettant de prévenir le contact entre les bovins et la faune sauvage, dans les zones où la faune sauvage est infectée. Toutefois, la TB étant une maladie chronique avec une évolution très lente, il faudrait inclure des élevages mettant en place ces mesures depuis de nombreuses années, ce qui serait sans doute difficile à trouver compte tenu de l'importance récente donnée à ces modalités de prévention. Pour la TB, l'évaluation quantitative de l'efficacité des mesures de biosécurité serait donc utile. Elle pourrait ainsi fournir des données quantitatives objectivant l'efficacité des mesures, ce qui permettrait d'aider à l'identification des mesures à promouvoir (réflexion en cours au niveau national (Véron *et al.*, 2018)). De plus, ces estimations d'efficacité pourraient permettre d'introduire les mesures de biosécurité dans les modèles dynamiques de diffusion de la TB, afin d'en estimer les bénéfices dans la lutte contre la TB dans le contexte français.

Parmi les mesures à étudier, celles permettant de réduire les contacts des bovins sains avec des bovins infectés pourraient être prioritaires (par exemple les doubles clôtures), une étude de réseau de pâtures ayant montré la vulnérabilité du cheptel français aux contacts entre animaux d'élevages différents (Dommergues *et al.*, 2012 ; Palisson *et al.*, 2017) ; tout comme celles permettant de limiter le contact avec la faune sauvage (Bouchez-Zacria *et al.*, 2018), par exemple : des clôtures électriques contre les sangliers, la surélévation des points d'eau, assurer « l'étanchéité » des stabulations contre les blaireaux grâce à des barrières pleines.

Toutefois, la seule évaluation de l'efficacité des mesures de biosécurité n'est pas suffisante. En effet, des mesures, même efficaces, ne seront pas appliquées si elles ne sont pas réalisables et/ou acceptables par les éleveurs (Renault *et al.*, 2018a). L'acceptabilité des mesures de biosécurité, en relation avec leur faisabilité et la perception de leur efficacité devra donc également être étudiée, aussi bien du point de vue des éleveurs que du point de vue des vétérinaires. En effet, il a été montré que les vétérinaires ruraux n'appliquaient pas systématiquement les mesures de biosécurité les concernant (Renault *et al.*, 2018b). De plus, ce sont des acteurs clé pour encourager l'application des mesures de biosécurité chez les éleveurs (Laanen *et al.*, 2014 ; Cardwell *et al.*, 2016 ; Shortall *et al.*, 2017) puisque ceux-ci les considèrent comme la première source d'information concernant ces mesures (Renault *et al.*, 2018b).

Pour cela, la méthode CAP (connaissance, attitude, pratique) (Tiongco *et al.*, 2011) pourrait être utilisée. Cette méthode permet de faire un état des lieux, chez les acteurs concernés -dans le cas de la biosécurité, les éleveurs et les VS- de : (i) la connaissance, qui correspond au degré de compréhension du sujet et des problèmes lui étant associés ; (ii) l'attitude, qui désigne les sentiments des acteurs vis-à-vis de ce sujet, ce qui inclue le jugement de son importance et de son influence sur la vie des personnes ; et (iii) des pratiques, c'est-à-dire des actions engagées en conséquences de l'attitude et de la perception vis-à-vis du sujet en question. L'objectif serait d'obtenir un état des lieux des mesures de biosécurité mises en œuvre dans les élevages bovins français et d'identifier les facteurs internes (caractéristiques sociodémographiques de l'éleveur, son expérience, sa formation, etc.) ou externes (coûts, temps nécessaire à l'application de la mesure, faisabilité de la mesure, etc.) freinant leur adoption et/ou leur observance. Cette méthode a déjà été utilisée dans la filière avicole afin d'évaluer le rôle de facteurs psychosociaux (caractéristiques sociodémographiques, attitudes, traits de personnalité) dans l'adoption des mesures de biosécurité contre l'influenza aviaire hautement pathogène, par les éleveurs de canards en France (Delpont *et al.*, 2020). Cette étude avait permis de dégager trois profils d'éleveurs, pour lesquels la motivation à appliquer les mesures de biosécurité était différente. Ainsi, si pour certains d'entre eux, la communication sur l'efficacité des mesures de biosécurité semblait être un moyen efficace pour les faire adopter, d'autres éleveurs ne semblaient pouvoir être motivés que par la peur de la sanction. Cette approche avait donc permis d'identifier les différents leviers permettant de promouvoir la mise en œuvre des mesures de biosécurité nécessaires. Elle avait également mis en évidence que, contrairement à ce que semblaient penser les VS interrogés lors de l'étude de Shortall et ses collaborateurs (2017), convaincre les éleveurs que des mesures de biosécurité peuvent avoir un impact sur la réduction de maladies présentes dans les élevages, n'est

pas toujours l'approche la plus efficace pour faire adopter des mesures de biosécurité. Appliquer la méthode CAP aux mesures de biosécurité de la TB pourrait donc permettre de faire un état des lieux des connaissances et pratiques des éleveurs bovins vis-à-vis de la biosécurité, mais aussi potentiellement d'identifier, en fonction de profils psychosociaux, les leviers (améliorer les connaissances par la formation, mise en place de subventions, réglementation, etc.) à la promotion des mesures de biosécurité préalablement jugées nécessaires.

9.4.5. Appliquer les méthodes à d'autres problèmes de santé animale

Les méthodes que nous avons développées dans ce travail sont généralisables et ainsi applicables à d'autres sujets de santé animale. Leur application à ces sujets serait une occasion de proposer des améliorations méthodologiques et de faire preuve de leur intérêt en santé animale.

Ainsi, la méthode de prise en compte des pratiques de terrain, dans l'évaluation d'un système de surveillance par arbre de scénario, pourrait être utilisée pour l'évaluation de la surveillance d'autres agents pathogènes. Les pratiques prises en compte pourront être celles d'autres acteurs comme par exemple les éleveurs, selon la pertinence pour le système de surveillance étudié. Par exemple, l'évaluation du système de détection précoce de l'influenza aviaire H5N1 en Thaïlande (Goutard *et al.*, 2012) aurait pu bénéficier de cette méthode. En effet, cette évaluation par arbre de scénario prenait en compte certaines pratiques de terrain (déclaration ou non des suspicions cliniques par les éleveurs, envoi ou non d'une équipe par les services sanitaires pour réaliser les prélèvements nécessaires) mais en évaluant leur probabilité d'occurrence selon des dires d'experts, en fonction des régions à faible ou fort risque. L'utilisation de la méthode de prise en compte des pratiques de terrain que nous avons développée aurait amélioré la connaissance des facteurs influençant ces pratiques et aurait permis de les prendre en compte de façon plus détaillée, dans l'évaluation, pour avoir une vision plus juste de l'efficacité réelle du système de surveillance. Dans cet exemple, la modélisation de pratiques adaptées (non déclaration et non envoi d'une équipe pour faire les prélèvements) aurait été plus aisée que dans le cas de l'ID pour la TB, puisqu'elles annulent clairement la probabilité de détection de l'infection par le système de surveillance.

L'analyse multicritère pourra également être appliquée à d'autres problématiques de santé animale. En effet, elle peut être utilisée pour le choix de protocoles de surveillance ou de lutte contre d'autres agents pathogènes, dans d'autres populations animales ; ou pour prioriser des maladies. Elle présente l'avantage de permettre la comparaison de protocoles existants entre eux mais également avec des protocoles alternatifs pas encore mis en places afin d'estimer l'opportunité de les adopter. De même, elle peut être utilisée pour comparer « *in vitro* » des protocoles, avant leur mise en place afin d'estimer le ou lesquels présenteraient le meilleur équilibre efficacité-coût-acceptabilité. Son application à d'autres problématiques de santé animale contribuera à faire preuve de son utilité dans ce secteur et à familiariser les parties prenantes avec cette approche, facilitant progressivement ses utilisations ultérieures.

Conclusion

Ces travaux ont permis d'évaluer en termes de coût-efficacité l'ensemble des protocoles composant le dispositif de surveillance *ante mortem* de la TB en élevage, et d'en dégager des recommandations et des pistes d'améliorations. Nous avons développé une méthode permettant de prendre en compte des pratiques de terrain dans la modélisation par arbre de scénario. Cette prise en compte des pratiques de terrain est primordiale dans l'évaluation des systèmes de surveillance, car ces pratiques ont une influence importante (positive ou négative) sur leur efficacité réelle. Toutefois, en santé animale, elles n'étaient auparavant que rarement et partiellement prises en compte, car elles étaient généralement évaluées séparément. Cette méthode est donc un premier pas nécessaire vers une prise en compte plus complète et plus fréquente des pratiques de terrain dans les évaluations quantitatives des systèmes de surveillance en santé animale. Les résultats de nos travaux pourront par ailleurs être utilisés pour appuyer des décisions d'évolution du système de surveillance *ante mortem* actuel, et, nous l'espérons, apporter un éclairage sur l'opportunité de faire évoluer la réglementation européenne concernant l'utilisation de l'IFN.

Enfin, l'utilisation d'une méthode d'aide à la décision multicritère en santé animale ouvre une nouvelle voie à explorer, afin de faciliter les prises de décisions des gestionnaires de la surveillance en santé animale. En effet, la combinaison de nombreux critères de nature très différente était jusqu'à présent difficile et cette approche, assez novatrice dans le domaine de la santé animale, facilite cette prise en compte tout en limitant la perte d'informations.

Ces travaux ouvrent de nombreuses perspectives de recherche, à la fois méthodologiques (prise en compte des pratiques de terrain dans les évaluations quantitatives des systèmes de surveillance et utilisation des méthodes d'aide à la décision multicritère dans le domaine de la santé animale), et de poursuite de l'évaluation de la surveillance et du contrôle de la TB dans un objectif d'amélioration du dispositif en place.

Références

- Abbas, A.K., Lichtman, A.H., 2009. Les bases de l'immunologie fondamentale et clinique, 3ème. ed. Elsevier Masson, Issy-les-Moulineaux.
- Amat, J.P., Vergne, T., Tapprest, J., Ferry, B., Hans, A., Hendriks, P., Dufour, B., Leblond, A., 2016. Estimating the incidence of equine viral arteritis and the sensitivity of its surveillance in the French breeding stock. *Veterinary Microbiology* 192, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2016.06.010>
- Anses, 2012. Rapport d'expertise collective, CES santé animale, Groupe de travail "Méthodologie de hiérarchisation des maladies animales.
- Anses, 2011. Tuberculose bovine et faune sauvage (Edition scientifique). 119p.
- Ashford, D.A., Whitney, E., Raghunathan, P., Cosivi, O., 2001. Epidemiology of selected mycobacteria that infect humans and other animals: -EN- -FR- -ES-. *Rev. Sci. Tech. OIE* 20, 325–337. <https://doi.org/10.20506/rst.20.1.1266>
- Assié, S., Bareille, N., Beaudou, F., Seegers, H., 2009. Management- and housing-related risk factors of respiratory disorders in non-weaned French Charolais calves. *Preventive Veterinary Medicine* 91, 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2009.06.003>
- Avis de l'Anses, 2019. Evaluation du risque dans le cadre du dispositif de surveillance de la tuberculose bovine (Rapport d'expertise collective). Anses.
- Babo Martins, S., Rushton, J., 2014. L'analyse coûts-efficacité : une valeur ajoutée apportée à l'évaluation de la santé, du bien-être et de la production des animaux. *Rev. Sci. Tech. OIE* 33, 681–689. <https://doi.org/10.20506/rst.33.3.2312>
- Bach, M., Jordan, S., Hartung, S., Santos-Hövenner, C., Wright, M.T., 2017. Participatory epidemiology: the contribution of participatory research to epidemiology. *Emerging Themes in Epidemiology* 14. <https://doi.org/10.1186/s12982-017-0056-4>
- Baisden, L., Larsen, A., Vardaman, T., 1951. Relative sensitivity of different skin areas of cattle to intradermal tests. *Am J Vet Res* 12, 273–275.
- Balon C., 2017. Estimation quantitative de l'efficacité de la surveillance de la tuberculose bovine à l'abattoir en France à l'aide d'une méthode de modélisation par arbres de scénario. Thèse vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort.
- Bana e Costa, C.A., De Corte, J.-M., Vansnick, J.-C., 2016. On the Mathematical Foundations of MACBETH, in: Greco, S., Ehrgott, M., Figueira, J.R. (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis*. Springer New York, New York, NY, pp. 421–463. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_11
- Bardsley, E.L., Thrusfield, M.V., 2014. Animal health studies using participatory epidemiology in the Mandrare Valley, Madagascar. *Tropical Animal Health and Production* 46, 133–137. <https://doi.org/10.1007/s11250-013-0463-7>
- Bekara, M.E.A., 2014. Impact de l'évolution du schéma de prophylaxie et des structures et pratiques d'élevage sur l'évolution de la tuberculose bovine en France entre les années 1965 et 2000: modélisation de l'incidence cheptel et de la dynamique de transmission intra-élevage de l'infection. Université Paris Sud-Paris XI.
- Bénet, J.-J., Boschioli, M.-L., Dufour, B., Garin-Bastuji, B., 2006. Lutte contre la tuberculose bovine en France de 1954 à 2004: analyse de la pertinence épidémiologique de l'évolution de la réglementation. *Epidémiologie et Santé Animale* 50, 127–143.
- Bénet, J.-J., Dufour, B., 2009. Etude historique du risque de résurgence de tuberculose bovine en France de 1992 à 2006. *Epidémiol. et santé anim* 56, 107–115.
- Bénet, J.-J., Philizot, S., Gane, J., Fediaevsky, A., 2012. Essai comparatif de matériels d'injection de tuberculine bovine. Rapport SNGTV.[https://www.sngtv.org/4DACTION/NS2013_INDEX/7/1028/1944] (consulté le 16/05/2018)
- Bénet, J.-J., Praud, A., et al, 2016. La tuberculose animale. Polycopié des Unité de maladies contagieuses des Ecoles Nationales Vétérinaires françaises, Mérial (Lyon), 100p.

Références

- Bessell, P.R., Orton, R., White, P.C., Hutchings, M.R., Kao, R.R., 2012. Risk factors for bovine tuberculosis at the national level in Great Britain. *BMC veterinary research* 8, 51.
- Boireau, C.M.L., 2015. Etude des caractéristiques intrinsèques du test à l'interféron gamma utilisé en série suite à une intradermotuberculination dans le cadre du dépistage de la tuberculose bovine en France et enquête sociologique auprès des acteurs locaux. Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort.
- Bollen, K.A., 1989. *Structural equations with Latent Variables*, New York: Wiley. ed.
- Bouchez-Zacria, M., Courcoul, A., Durand, B., 2018. The Distribution of Bovine Tuberculosis in Cattle Farms Is Linked to Cattle Trade and Badger-Mediated Contact Networks in South-Western France, 2007–2015. *Front. Vet. Sci.* 5, 173. <https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00173>
- Bouveret, A., 2017. Evaluation coût efficacité préliminaire de la composante de surveillance de la tuberculose bovine en élevage en France. Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort.
- Bouyssou, D., Roy, B., 1987. La Notion De Seuils De Discrimination En Analyse Multicritère. *INFOR: Information Systems and Operational Research* 25, 302–313. <https://doi.org/10.1080/03155986.1987.11732046>
- Brans, J.P., Vincke, Ph., Mareschal, B., 1986. How to select and how to rank projects: The Promethee method. *European Journal of Operational Research* 24, 228–238. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5)
- Brennan, M., Wright, N., Wapenaar, W., Jarratt, S., Hobson-West, P., Richens, I., Kaler, J., Buchanan, H., Huxley, J., O'Connor, H., 2016. Exploring Attitudes and Beliefs towards Implementing Cattle Disease Prevention and Control Measures: A Qualitative Study with Dairy Farmers in Great Britain. *Animals* 6, 61. <https://doi.org/10.3390/ani6100061>
- Brønner, A., Gay, E., Fortané, N., Palussière, M., Hendrikx, P., Hénaux, V., Calavas, D., 2015. Quantitative and qualitative assessment of the bovine abortion surveillance system in France. *Preventive Veterinary Medicine* 120, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2015.02.019>
- Brooks-Pollock, E., Conlan, A.J., Mitchell, A.P., Blackwell, R., McKinley, T.J., Wood, J.L., 2013. Age-dependent patterns of bovine tuberculosis in cattle. *Veterinary research* 44, 97.
- Broughan, J.M., Maye, D., Carmody, P., Brunton, L.A., Ashton, A., Wint, W., Alexander, N., Naylor, R., Ward, K., Goodchild, A.V., Hinchliffe, S., Eglin, R.D., Upton, P., Nicholson, R., Enticott, G., 2016. Farm characteristics and farmer perceptions associated with bovine tuberculosis incidents in areas of emerging endemic spread. *Preventive Veterinary Medicine* 129, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.05.007>
- Bryman, A., 1984. The Debate about Quantitative and Qualitative Research: A Question of Method or Epistemology? *The British Journal of Sociology* 35, 75. <https://doi.org/10.2307/590553>
- Buczinski, B., Reuillon, J.-L., 2015. Chiffrage des pertes économiques dans une exploitation d'élevage bovin lait ou bovin viande suite au blocage de ses ventes (No. 0015 502 034). L'institut de l'élevage.
- Buddle, B., Livingstone, P., de Lisle, G., 2009. Advances in ante-mortem diagnosis of tuberculosis in cattle. *New Zealand Veterinary Journal* 57, 173–180. <https://doi.org/10.1080/00480169.2009.36899>
- Calavas, D., Dominguez, M., Marcé, C., Rautureau, S., François, C., Lupo, C., 2012. Evaluation technique du dispositif de surveillance de la pathologie des mollusques (Repamo) selon la méthode OASIS (Rapport d'évaluation). Anses. [https://www.plateforme-esa.fr/sites/default/files/Rapport%20evaluation%20TB%20national_final-10-05-2012.pdf] (consulté le 26/05/2020)
- Calba, C., Goutard, F.L., Hoinville, L., Hendrikx, P., Lindberg, A., Saegerman, C., Peyre, M., 2015. Surveillance systems evaluation: a systematic review of the existing approaches. *BMC Public Health* 15. <https://doi.org/10.1186/s12889-015-1791-5>
- Calba, C., Goutard, F.L., Vanholme, L., Antoine-Moussiaux, N., Hendrikx, P., Saegerman, C., 2016. The Added-Value of Using Participatory Approaches to Assess the Acceptability of Surveillance Systems: The Case of Bovine Tuberculosis in Belgium. *PLoS ONE* 11.

Références

- Cardwell, J.M., Van Winden, S., Beauvais, W., Mastin, A., De Glanville, W.A., Hardstaff, J., Booth, R.E., Fishwick, J., Pfeiffer, D.U., 2016. Assessing the impact of tailored biosecurity advice on farmer behaviour and pathogen presence in beef herds in England and Wales. *Preventive Veterinary Medicine* 135, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.10.018>
- Casal, C., Alvarez, J., Bezos, J., Quick, H., Díez-Guerrier, A., Romero, B., Saez, J.L., Liandris, E., Navarro, A., Perez, A., Domínguez, L., Juan, L. de, 2015. Effect of the inoculation site of bovine purified protein derivative (PPD) on the skin fold thickness increase in cattle from officially tuberculosis free and tuberculosis-infected herds. *Preventive Veterinary Medicine* 121, 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2015.07.001>
- CDC, 2001. Updated guidelines for evaluating public health surveillance systems : recommendations from the Guidelines Working Group. *Morbidity and mortality weekly report of the Center and Disease Control and Prevention, U.S. department of Health and Human Services*; 50, 1-35
- Christensen, J., Stryhn, H., Vallières, A., Allaki, F.E., 2011. A scenario tree model for the Canadian Notifiable Avian Influenza Surveillance System and its application to estimation of probability of freedom and sample size determination. *Preventive Veterinary Medicine* 99, 161–175. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2011.01.005>
- Churchill, G.A., 1979. A paradigm for developing better measures of marketing constructs. *Journal of Marketing Research*, 16, 64–73. <https://doi.org/10.1177/002224377901600110>
- Ciaravino, G., Ibarra, P., Casal, E., Lopez, S., Espluga, J., Casal, J., Napp, S., Allepuz, A., 2017. Farmer and Veterinarian Attitudes towards the Bovine Tuberculosis Eradication Programme in Spain: What Is Going on in the Field? *Frontiers in Veterinary Science* 4. <https://doi.org/10.3389/fvets.2017.00202>
- Claridge, J., Diggle, P., McCann, C.M., Mulcahy, G., Flynn, R., McNair, J., Strain, S., Welsh, M., Baylis, M., Williams, D.J.L., 2012. *Fasciola hepatica* is associated with the failure to detect bovine tuberculosis in dairy cattle. *Nature Communications* 3, 853. <https://doi.org/10.1038/ncomms1840>
- Clegg, T.A., Duignan, A., Whelan, C., Gormley, E., Good, M., Clarke, J., Toft, N., More, S.J., 2011. Using latent class analysis to estimate the test characteristics of the γ -interferon test, the single intradermal comparative tuberculin test and a multiplex immunoassay under Irish conditions. *Veterinary Microbiology* 151, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2011.02.027>
- Clemen, R.T., Winkler, R.L., 1999. Combining Probability Distributions From Experts in Risk Analysis. *Risk Anal.* 187–203.
- Coad, M., Clifford, D., Rhodes, S.G., Hewinson, R.G., Vordermeier, H.M., Whelan, A.O., 2010. Repeat tuberculin skin testing leads to desensitisation in naturally infected tuberculous cattle which is associated with elevated interleukin-10 and decreased interleukin-1 beta responses. *Veterinary Research* 41, 14. <https://doi.org/10.1051/vetres/2009062>
- Condorcet, J.A.M.C., 1785. *Essai sur l'application de l'analyse de la probabilité des décisions rendues. La pluralité des voix*, Imprimerie Royale. ed. Paris.
- Corner, L.A., 1994. Post mortem diagnosis of *Mycobacterium bovis* infection in cattle. *Vet Microbiol* 40, 53–63.
- Courcoul, A., Boschioli, M.-L., 2013. Demande d'Appui Scientifique sur le protocole de diagnostic de la tuberculose bovine par PCR. Rapport d'appui scientifique et technique, réponse à la saisine n°00372 du 23 Mai 2012, Anses, 40p.
- Courcoul, A., Moyen, J.-L., Brugère, L., Faye, S., Hénault, S., Gares, H., Boschioli, M.-L., 2014. Estimation of Sensitivity and Specificity of Bacteriology, Histopathology and PCR for the Confirmatory Diagnosis of Bovine Tuberculosis Using Latent Class Analysis. *PLoS ONE* 9, e90334. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090334>
- Cox, E.P., 1980. The Optimal Number of Response Alternatives for a Scale: A Review. *Journal of Marketing Research* 17, 407–422. <https://doi.org/10.1177/002224378001700401>
- Crano, W., Brewer, M., Lac, A., 2015. *Principles and Methods of Social Research*, New York : Routledge. ed.
- Cronbach, L.J., 1951. Coefficient alpha and the internal structure of tests. *psychometrika* 16, 38.

Références

- Crozet, G., 2018. Les contraintes de terrain rencontrées par les vétérinaires sanitaires ruraux lors de la réalisation des tests de dépistage : un frein à l'éradication de la tuberculose bovine en France ? (Thèse professionnelle - spécialisation : risque infectieux). École Nationale Vétérinaire d'Alfort / Anses.
- Crozet, G., Dufour, B., Rivière, J., 2019. Investigation of field intradermal tuberculosis test practices performed by veterinarians in France and factors that influence testing. *Research in Veterinary Science* 124, 406–416. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2019.05.001>
- de la Rua-Domenech, R., Goodchild, A.T., Vordermeier, H.M., Hewinson, R.G., Christiansen, K.H., Clifton-Hadley, R.S., 2006. Ante mortem diagnosis of tuberculosis in cattle: A review of the tuberculin tests, γ -interferon assay and other ancillary diagnostic techniques. *Research in Veterinary Science* 81, 190–210. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2005.11.005>
- Declich, S., Carter, A.O., 1994. Public health surveillance: historical origins, methods and evaluation 72, 20.
- Delabouglise, A., Antoine-Moussiaux, N., Tatong, D., Chumkaeo, A., Binot, A., Fournié, G., Pilot, E., Phimpraphi, W., Kasemsuwan, S., Paul, M.C., Duboz, R., Salem, G., Peyre, M., 2017. Cultural Practices Shaping Zoonotic Diseases Surveillance: The Case of Highly Pathogenic Avian Influenza and Thailand Native Chicken Farmers. *Transboundary and Emerging Diseases* 64, 1294–1305. <https://doi.org/10.1111/tbed.12506>
- Delavenne, C., Pandolfi, F., Girard, S., Réveillaud, É., Boschioli, M.-L., Dommergues, L., Garapin, F., Keck, N., Martin, F., Moussu, M., Philizot, S., Rivière, J., Tourette, I., Dupuy, C., Dufour, B., Chevalier, F., 2019. Tuberculose bovine : bilan et évolution de la situation épidémiologique entre 2015 et 2017 en France métropolitaine. Publication anticipée du bulletin épidémiologique de l'Anses 22.
- Delpont, M., Racicot, M., Durivage, A., Fornili, L., Guerin, J., Vaillancourt, J., Paul, M.C., 2020. Determinants of biosecurity practices in French duck farms after a H5N8 Highly Pathogenic Avian Influenza epidemic: The effect of farmer knowledge, attitudes and personality traits. *Transbound Emerg Dis* tbed.13462. <https://doi.org/10.1111/tbed.13462>
- Dijkhuizen, A.A., Morris, R.S., 1997. Animal health economics principles and applications. Post Graduate Foundation in Veterinary Science, université de Sydney. [<https://edepot.wur.nl/333322>]
- Doherty M.L., Monaghan M.L., Bassett H.F., Quinn P.J., 1995. Effect of a recent injection of purified protein derivative on diagnostic tests for tuberculosis in cattle infected with *Mycobacterium bovis* 58, 217–221.
- Domingo, M., Vidal, E., Marco, A., 2014. Pathology of bovine tuberculosis. *Research in Veterinary Science* 97, S20–S29. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2014.03.017>
- Dommergues, L., Rautureau, S., Petit, E., Dufour, B., 2012. Network of Contacts between Cattle Herds in a French Area Affected by Bovine Tuberculosis in 2010. *Transboundary and Emerging Diseases* 59, 292–302. <https://doi.org/10.1111/j.1865-1682.2011.01269.x>
- Doyle, L.P., Gordon, A.W., Abernethy, D.A., Stevens, K., 2014. Bovine tuberculosis in Northern Ireland: Risk factors associated with time from post-outbreak test to subsequent herd breakdown. *Preventive Veterinary Medicine* 116, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.06.010>
- Drewe, J.A., Hoinville, L.J., Cook, A.J.C., Floyd, T., Gunn, G., Stärk, K.D.C., 2015. SERVAL: A New Framework for the Evaluation of Animal Health Surveillance. *Transboundary and Emerging Diseases* 62, 33–45. <https://doi.org/10.1111/tbed.12063>
- Drewe, J.A., Hoinville, L.J., Cook, A.J.C., Floyd, T., Stärk, K.D.C., 2012. Evaluation of animal and public health surveillance systems: a systematic review. *Epidemiol. Infect.* 140, 575–590. <https://doi.org/10.1017/S0950268811002160>
- Drummond, M.F., Sculpher M.J., Torrance G.W., Bernie J.O., Stoddart G.L., 2005. Methods for the evaluation of health care programmes, 3rd ed. ed. Oxford University Press, Oxford.
- Dubois, B., Quaghebeur, A., 1997. Les consommateurs font-ils ce qu'ils disent ?, in: Actes Du 13ème Congrès de l'AFM. Presented at the 13ème congrès international de l'AFM, AFM, Toulouse.

Références

- Dufour, B., 1999. Technical and economic evaluation method for use in improving infectious animal disease surveillance networks. *Veterinary Research, BioMed Central*, 30 (1), pp.27-37. [hal-00902554].
- Dufour, B., Bénet, J.-J., 2015. L'infection à *Mycobacterium bovis* en France en 2014: recrudescence et inquiétudes. *Revue Francophone des Laboratoires* 472, 67–75.
- Dufour, B., Durand, B., 2020. Tuberculose bovine : bilan et évolution de la situation épidémiologique 2018 en France métropolitaine. *Bulletin épidémiologique*, en cours de parution.
- Dufour, B., Hendriks, P., 2011. Surveillance épidémiologique en santé animale, 3ème édition. ed. Association pour l'étude de l'épidémiologie des maladies animales et Editions Quae.
- Dufour, B., Hendriks, P., Toma, B., 2006. Élaboration et mise en place de systèmes de surveillance épidémiologique des maladies à haut risque dans les pays développés. *Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz.* 25(1), 187-198
- Dufour, B., La Vieille, S., 2000. Epidemiological surveillance of infectious diseases in France. *Vet. Res.* 31, 169–185. <https://doi.org/10.1051/vetres:2000116>
- El Allaki, F., Harrington, N., Howden, K., 2016. Assessing the sensitivity of bovine tuberculosis surveillance in Canada's cattle population, 2009–2013. *Preventive Veterinary Medicine* 134, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.10.012>
- Ellis-Iversen, J., Cook, A.J.C., Watson, E., Nielen, M., Larkin, L., Wooldridge, M., Hogeveen, H., 2010. Perceptions, circumstances and motivators that influence implementation of zoonotic control programs on cattle farms. *Preventive Veterinary Medicine* 93, 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2009.11.005>
- Fine, A.E., Bolin, C.A., Gardiner, J.C., Kaneene, J.B., 2011. A Study of the Persistence of *Mycobacterium bovis* in the Environment under Natural Weather Conditions in Michigan, USA. *Veterinary Medicine International* 2011, 1–12. <https://doi.org/10.4061/2011/765430>
- Fitzgerald, S.D., Hollinger, C., Mullaney, T.P., Bruning-Fann, C.S., Tilden, J., Smith, R., Averill, J., Kaneene, J.B., 2016. Herd outbreak of bovine tuberculosis illustrates that route of infection correlates with anatomic distribution of lesions in cattle and cats. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation* 28, 129–132.
- Foddai, A., Stockmarr, A., Boklund, A., 2016. Evaluation of temporal surveillance system sensitivity and freedom from bovine viral diarrhoea in Danish dairy herds using scenario tree modelling. *BMC Veterinary Research* 12. <https://doi.org/10.1186/s12917-016-0744-2>
- Garber, A.M., Phelps, C.E., 1997. Economic foundations of cost-effectiveness analysis. *Journal of Health Economics* 16, 1–31. [https://doi.org/10.1016/S0167-6296\(96\)00506-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6296(96)00506-1)
- García, J.I., Kelley, H.V., Meléndez, J., de León, R.A.A., Castillo, A., Sidiki, S., Yusoof, K.A., Nunes, E., Téllez, C.L., Mejía-Villatoro, C.R., Ikeda, J., García-Basteiro, A.L., Wang, S.-H., Torrelles, J.B., 2019. Improved Alere Determine Lipoarabinomannan Antigen Detection Test for the Diagnosis of Human and Bovine Tuberculosis by Manipulating Urine and Milk. *Sci Rep* 9, 18012. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54537-9>
- Gardner, I.A., Stryhn, H., Lind, P., Collins, M.T., 2000. Conditional dependence between tests affects the diagnosis and surveillance of animal diseases. *Preventive veterinary medicine* 45, 107–122.
- Giamalva, J., 2008. Global Beef Trade: Effects of Animal Health, Sanitary, Food Safety, and Other Measures on U.S. Beef Exports 279.
- Gilbert, M., Mitchell, A., Bourn, D., Mawdsley, J., Clifton-Hadley, R., Wint, W., 2005. Cattle movements and bovine tuberculosis in Great Britain. *Nature* 435, 491–496. <https://doi.org/10.1038/nature03548>
- Gilbert, W.H., Häslér, B.N., Rushton, J., 2014. Influences of farmer and veterinarian behaviour on emerging disease surveillance in England and Wales. *Epidemiol. Infect.* 142, 172–186. <https://doi.org/10.1017/S0950268813000484>
- Gopal R., Goodchild A., Hewinson G., De la, Rua-Domenech R., Clifton-Hadley R., 2006. Introduction of bovine tuberculosis to north-east England by bought-in cattle. *Vet. Rec.* 159, 265–271.
- Gorecki, S., 2012. Évaluation du dispositif national de surveillance épidémiologique de la tuberculose bovine en France à l'aide de la méthode OASIS. *Bulletin épidémiologique, santé animale et alimentation*, 51, 9-12.

Références

- Goutard, F.L., Paul, M., Tavoranpanich, S., Houisse, I., Chanachai, K., Thanapongtharm, W., Cameron, A., Stärk, K.D.C., Roger, F., 2012. Optimizing early detection of avian influenza H5N1 in backyard and free-range poultry production systems in Thailand. *Preventive Veterinary Medicine* 105, 223–234. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2011.12.020>
- Gramig, B.M., Horan, R.D., 2011. Jointly determined livestock disease dynamics and decentralised economic behaviour. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 55, 393–410. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8489.2011.00543.x>
- Griffin, J.M., Martin, S.W., Thorburn, M.A., Eves, J.A., Hammond, R.F., 1996. A case-control study on the association of selected risk factors with the occurrence of bovine tuberculosis in the Republic of Ireland. *Preventive Veterinary Medicine* 27, 75–87.
- Griffin, J.M., Williams, D.H., Kelly, G.E., Clegg, T.A., O'Boyle, I., Collins, J.D., More, S.J., 2005. The impact of badger removal on the control of tuberculosis in cattle herds in Ireland. *Preventive Veterinary Medicine* 67, 237–266. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2004.10.009>
- Guillon, V., Gully S., Hamelin E., Jeandaux M.L., Khelifa L., Rabault A., Tadiello C., Veyer E., 2018. Lutte contre la tuberculose bovine : construction d'une pratique de la prophylaxie par le vétérinaire sanitaire. Rapport GEPP, ENSV.
- Gully, S., 2018. Etude des pratiques et modèles décisionnels mis en oeuvre par les vétérinaires sanitaires lors du dépistage de la tuberculose bovine en élevage bovin en France. (Mémoire pour l'obtention du Certificat d'Etudes Approfondies Vétérinaires en Santé Publique Vétérinaire).
- Gully, S., Hamelin, E., Rivière, J., 2018. L'acceptabilité, par les vétérinaire sanitaires de quatre départements français, de l'intradermotuberculation comme méthode de dépistage de la tuberculose bovine. *Epidémiol. et santé anim.* 73, 35–47.
- Guo, X., Claassen, G.D.H., Oude Lansink, A.G.J.M., Saatkamp, H.W., 2016. A conceptual framework for economic optimization of an animal health surveillance portfolio. *Epidemiology and Infection* 144, 1084–1095. <https://doi.org/10.1017/S0950268815002022>
- Hadorn, D.C., Racloz, V., Schwermer, H., Stärk, K.D.C., 2009. Establishing a cost-effective national surveillance system for Bluetongue using scenario tree modelling. *Veterinary Research* 57. <https://doi.org/10.1051/vetres/2009040>
- Hars, J., Boschiroli, M.-L., Duvauchelle, A., Garin-Bastuji, B., 2006. La tuberculose à *Mycobacterium bovis* chez le cerf et le sanglier en France. Émergence et risque pour l'élevage bovin. *Bul. de l'Ac. Vét. de France* 389. <https://doi.org/10.4267/2042/58198>
- Heffernan, C., Nielsen, L., Thomson, K., Gunn, G., 2008. An exploration of the drivers to bio-security collective action among a sample of UK cattle and sheep farmers. *Preventive Veterinary Medicine* 87, 358–372. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2008.05.007>
- Hénaux, V., Calavas, D., 2017. Evaluation of the cost-effectiveness of bovine brucellosis surveillance in a disease-free country using stochastic scenario tree modelling. *PLOS ONE* 12, e0183037. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183037>
- Hénaux, V., Ngwa-Mbot, D., Memeteau, S., Touratier, A., Bronner, A., Calavas, D., 2017. Première estimation des coûts vétérinaires et de laboratoire de la surveillance et de la lutte vis-à-vis des maladies réglementées chez les ruminants en France en 2014. *Bulletin épidémiologique, santé animale et alimentation*, 79, 2-11.
- Hendriks, P., Dufour, B., 2004. Méthode d'élaboration des indicateurs de performance des réseaux de surveillance épidémiologique des maladies animales. *Epidemiol. et santé anim.* 46, 71–85.
- Hendriks, P., Gay, E., Chazel, M., Moutou, F., Danan, C., Richomme, C., Boue, F., Souillard, R., Gauchard, F., Dufour, B., 2011. OASIS: an assessment tool of epidemiological surveillance systems in animal health and food safety. *Epidemiology and Infection* 139, 1486–1496. <https://doi.org/10.1017/S0950268811000161>
- Hoinville, L.J., Alban, L., Drewe, J.A., Gibbens, J.C., Gustafson, L., Häslér, B., Saegerman, C., Salman, M., Stärk, K.D.C., 2013. Proposed terms and concepts for describing and evaluating animal-health surveillance systems. *Preventive Veterinary Medicine* 112, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2013.06.006>

Références

- Hokkanen, J., Salminen, P., 1997. Choosing a solid waste management system using multicriteria decision analysis. *European Journal of Operational Research* 98, 19–36. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00325-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00325-8)
- Horst, H.S., De Vos, C.J., Tomassen, F.H.M., Stelwagen, J., 1999. The economic evaluation of control and eradication of epidemic livestock diseases: -EN- -FR- -ES-. *Rev. Sci. Tech. OIE* 18, 367–379. <https://doi.org/10.20506/rst.18.2.1169>
- Hosteing, S., 2015. Élevages foyers de tuberculose bovine en Côte-D’OR soumis à un abattage partiel ou total : typologie des foyers et évaluation d’un protocole diagnostique appliqué entre 2009 et 2013. *Ecole Nationale Vétérinaire d’Alfort*.
- Hueston, W.D., 1993. Assessment of national systems for the surveillance and monitoring of animal health. *Rev. sci. tech. Off. int. Epiz.* 4, 1187–1196.
- Hueston, W.D., Yoe, C.E., 2000. Estimating the overall power of complex surveillance systems. Presented at the Ninth International Symposium on Veterinary Epidemiology and Economics, Breckenridge (Colorado), pp. 758–760.
- Humblet, M.-F., Boschioli, M.L., Saegerman, C., 2009. Classification of worldwide bovine tuberculosis risk factors in cattle: a stratified approach. *Veterinary Research* 40, 50. <https://doi.org/10.1051/vetres/2009033>
- Humblet, M.-F., Gilbert, M., Govaerts, M., Fauville-Dufaux, M., Walravens, K., Saegerman, C., 2010. New Assessment of Bovine Tuberculosis Risk Factors in Belgium Based on Nationwide Molecular Epidemiology. *Journal of Clinical Microbiology* 48, 2802–2808. <https://doi.org/10.1128/JCM.00293-10>
- Humblet, M.-F., Walravens, K., Salandre, O., Boschioli, M.L., Gilbert, M., Berkvens, D., Fauville-Dufaux, M., Godfroid, J., Dufey, J., Raskin, A., Vanholme, L., Saegerman, C., 2011. Monitoring of the intra-dermal tuberculosis skin test performed by Belgian field practitioners. *Research in Veterinary Science* 91, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2010.12.004>
- Institut de l’élevage, Confédération Nationale de l’Elevage, 2018. Les chiffres clés du Groupe Economie du Bétail, bovins 2018, production lait et viande. 12p. [<http://idele.fr/filieres/publication/idelesolr/recommends/chiffres-cles-bovins-2018.html>] (consulté le 22/08/2019)
- Jacques, J., 2011. Pratique de l’analyse de sensibilité : comment évaluer l’impact des entrées aléatoires sur la sortie d’un modèle mathématique. Université de Lille, 14p. [<http://eric.univ-lyon2.fr/~jjacques/Download/Publi/Intro-SA.pdf>] (consulté le 26/05/2020)
- Jacques, J., 2005. Contributions à l’analyse de sensibilité et à l’analyse discriminante généralisée. Thèse d’université, spécialité Mathématiques appliquées, Université Joseph Fourier – Grenoble 1 210p. [<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011169v2>]
- Jacques, J., Lavergne, C., Devictor, N., 2006. Sensitivity analysis in presence of model uncertainty and correlated inputs. *Reliability Engineering & System Safety* 91, 1126–1134. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.047>
- Judge, J., McDonald, R.A., Walker, N., Delahay, R.J., 2011. Effectiveness of Biosecurity Measures in Preventing Badger Visits to Farm Buildings. *PLoS ONE* 6, e28941. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028941>
- Julio Álvarez, Andrés Perez, Sergio Marqués, Javier Bezos, Anna Grau, Maria Luisa de la Cruz, Beatriz Romero, Jose Luis Saez, Maria del Rosario Esquivel, Maria del Carmen Martínez, Olga Mínguez, Lucía de Juan, Lucas Domínguez, 2014. Risk factors associated with negative in-vivo diagnostic results in bovine tuberculosis-infected cattle in Spain. *BMC Veterinary Research* 10, 14.
- Kuster, K., Cousin, M.-E., Jemmi, T., Schüpbach-Regula, G., Magouras, I., 2015. Expert Opinion on the Perceived Effectiveness and Importance of On-Farm Biosecurity Measures for Cattle and Swine Farms in Switzerland. *PLoS ONE* 10, e0144533. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144533>
- Laanen, M., Maes, D., Hendriksen, C., Gelaude, P., De Vlieghe, S., Rosseel, Y., Dewulf, J., 2014. Pig, cattle and poultry farmers with a known interest in research have comparable perspectives on disease prevention and on-farm biosecurity. *Preventive Veterinary Medicine* 115, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.03.015>

Références

- Ladreyt, H., Saccareau, M., Courcoul, A., Durand, B., 2018. In silico Comparison of Test-and-Cull Protocols for Bovine Tuberculosis Control in France. *Frontiers in Veterinary Science* 5. <https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00265>
- Lahuerta-Marin, A., Gallagher, M., McBride, S., Skuce, R., Menzies, F., McNair, J., McDowell, S.W.J., Byrne, A.W., 2015. Should they stay, or should they go? Relative future risk of bovine tuberculosis for interferon-gamma test-positive cattle left on farms. *Veterinary Research* 46. <https://doi.org/10.1186/s13567-015-0242-8>
- Lahuerta-Marin, A., McNair, J., Skuce, R., McBride, S., Allen, M., Strain, S.A.J., Menzies, F.D., McDowell, S.J.W., Byrne, A.W., 2016. Risk factors for failure to detect bovine tuberculosis in cattle from infected herds across Northern Ireland (2004–2010). *Research in Veterinary Science* 107, 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2016.06.014>
- Lambert, O., Benet, J.-J., 2015. Evaluation du protocole alternatif de mesure du pli de peau lors de la tuberculination chez les bovins. *Epidémiologie et Santé Animale* 129–138.
- Lhubert M., Réveillaud É., Cavalerie L., Hendrikx P., 2015. Évaluation du dispositif de surveillance de la tuberculose bovine dans la faune sauvage en France à l'aide de la méthode OASIS « flash » et recommandations. *Épidémiol. et santé anim.*, 68, 105-119
- Liebana, E., Johnson, L., Gough, J., Durr, P., Jahans, K., Clifton-Hadley, R., Spencer, Y., Hewinson, R.G., Downs, S.H., 2008. Pathology of naturally occurring bovine tuberculosis in England and Wales. *The Veterinary Journal* 176, 354–360. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.07.001>
- Mackay, I.M., 2004. Real-time PCR in the microbiology laboratory. *Clinical Microbiology and Infection* 10, 190–212. <https://doi.org/10.1111/j.1198-743X.2004.00722.x>
- Maïano, J., 2014. Revue bibliographique des méthodes de priorisation des maladies animales en Europe. Thèse vétérinaire, École Nationale Vétérinaire de Toulouse, 95p.
- Mariner, J.C., Jeggo, M.H., Van't Klooster, G.G.M., Geiger, R., Roeder, P.L., 2003. Rinderpest surveillance performance monitoring using quantifiable indicators: -EN- -FR- -ES-. *Rev. Sci. Tech. OIE* 22, 837–847. <https://doi.org/10.20506/rst.22.3.1439>
- Martel, J.-M., 1999. L'aide multicritère à la décision: méthodes et applications. *Canadian Operational Research Society – SCRO 1999 annual conference, Windsor, Ontario.* [https://www.cors.ca/sites/default/files/bulletin/v33n1_1f.pdf] (consulté le 26/05/2020)
- Martin, P.A.J., Cameron, A.R., Greiner, M., 2007. Demonstrating freedom from disease using multiple complex data sources. *Preventive Veterinary Medicine* 79, 71–97. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2006.09.008>
- Martínez-López, B., Barasona, J.A., Gortázar, C., Rodríguez-Prieto, V., Sánchez-Vizcaíno, J.M., Vicente, J., 2014. Farm-level risk factors for the occurrence, new infection or persistence of tuberculosis in cattle herds from South-Central Spain. *Preventive Veterinary Medicine* 116, 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2013.11.002>
- Maystre, L.Y., Pictet, J., Simos, J., 1994. Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale. PPUR presses polytechniques.
- McGill, J.L., Sacco, R.E., Baldwin, C.L., Telfer, J.C., Palmer, M.V., Ray Waters, W., 2014. The role of gamma delta T cells in immunity to *Mycobacterium bovis* infection in cattle. *Veterinary Immunology and Immunopathology* 159, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2014.02.010>
- McKay, M.D., 1995. Evaluating prediction uncertainty. Rapport technique NUREG/CR—6311, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Los Alamos National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/29432>
- Meskeel, P., Devitt, C., More, S.J., 2013. Challenges to quality testing for bovine tuberculosis in Ireland; perspectives from major stakeholders: TABLE 1. *Veterinary Record* 173, 94.1-94. <https://doi.org/10.1136/vr.101676>
- Meskens, N., Roubens, M., 2011. *Advances in decision analysis*. Springer, Dordrecht; London.
- Michelet, L., Durand, B., Boschiroli, M.L., 2019. Tuberculose bovine : bilan génotypique de *M. bovis* à l'origine des foyers bovins entre 2015 et 2017 en France métropolitaine. Publication anticipée du bulletin épidémiologique, 9.

Références

- Miller, G.A., 1956. The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review* 63, 81–97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
- Monaghan, M.L., Doherty, M.L., Collins, J.D., Kazda, J.F., Quinn, P.J., 1994. The tuberculin test. *Veterinary microbiology* 40, 111–124.
- Monjardet, B., 2012. Jean-Pierre Barthélemy et le principe de Pareto. *Mathématiques et sciences humaines. Mathematics and social sciences* 9–17. <https://doi.org/10.4000/msh.12151>
- Mouine, M., 2011. Combinaison de deux méthodes d'analyse de sensibilité. Mémoire, Faculté des études supérieures de l'Université Laval, département d'informatique et de génie logiciel, Québec. 91p.
- Mousseau, V., 1995. Eliciting information concerning the relative importance of criteria, in: *Advances in Multicriteria Analysis. Nonconvex Optimisation and Its Applications*. Zopounidis C., Boston, pp. 17–43.
- Munroe, F.A., Dohoo, I.R., McNab, W.B. 2000. Estimates of within-herd incidence rates of *Mycobacterium bovis* in Canadian cattle and cervids between 1985 and 1994 45, 247–256.
- Munroe, F.A., Dohoo, I.R., McNab, W.B., Spangler, L., 1999. Risk factors for the between-herd spread of *Mycobacterium bovis* in Canadian cattle and cervids between 1985 and 1994. *Preventive veterinary medicine* 41, 119–133.
- Narrod, C., Zinsstag, J., Tiongco, M., 2012. A One Health Framework for Estimating the Economic Costs of Zoonotic Diseases on Society. *EcoHealth* 9, 150–162. <https://doi.org/10.1007/s10393-012-0747-9>
- Neill, S.D., Cassidy, J.P., Hanna J, Mackie DP, Pollock JM, Clements A, Walton E, Bryson DG, 1994. Detection of *Mycobacterium bovis* infection in skin test-negative cattle with an assay for bovine interferon gamma. 135 134–135.
- Nuñez-Garcia, J., Downs, S.H., Parry, J.E., Abernethy, D.A., Broughan, J.M., Cameron, A.R., Cook, A.J., de la Rua-Domenech, R., Goodchild, A.V., Gunn, J., More, S.J., Rhodes, S., Rolfe, S., Sharp, M., Upton, P.A., Vordermeier, H.M., Watson, E., Welsh, M., Whelan, A.O., Woolliams, J.A., Clifton-Hadley, R.S., Greiner, M., 2018. Meta-analyses of the sensitivity and specificity of ante-mortem and post-mortem diagnostic tests for bovine tuberculosis in the UK and Ireland. *Preventive Veterinary Medicine* 153, 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.02.017>
- Nunnally, J.C., 1967. *Psychometric theory*, McGraw-Hill. ed.
- Observatoire national démographique de la profession vétérinaire, 2017. *Atlas démographique de la profession vétérinaire 2017*.
- O'Hagan, M.J.H., Matthews, D.I., Laird, C., McDowell, S.W.J., 2016. Herd-level risk factors for bovine tuberculosis and adoption of related biosecurity measures in Northern Ireland: A case-control study. *The Veterinary Journal* 213, 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2016.03.021>
- OIE, 2015. La tuberculose bovine, in: *Manuel Terrestre de l'OIE. International Union Against Tuberculosis and Lung Disease*.
- OIE, 2005. *Handbook on import risk analysis for animals and animals products*. OIE, Paris.
- Oliveira, V.H.S., Sørensen, J.T., Thomsen, P.T., 2017. Associations between biosecurity practices and bovine digital dermatitis in Danish dairy herds. *Journal of Dairy Science* 100, 8398–8408. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12815>
- Olsen, I., Boysen, P., Kulberg, S., Hope, J.C., Jungersen, G., Storset, A.K., 2005. Bovine NK Cells Can Produce Gamma Interferon in Response to the Secreted Mycobacterial Proteins ESAT-6 and MPP14 but Not in Response to MPB70. *Infection and Immunity* 73, 5628–5635. <https://doi.org/10.1128/IAI.73.9.5628-5635.2005>
- Oulhen, C., 2011. *Perceptions, freins et motivations à l'application des mesures de biosécurité par les éleveurs de bovin du grand-ouest*. Oniris Nantes.
- Palisson, A., Courcoul, A., Durand, B., 2017. Analysis of the Spatial Organization of Pastures as a Contact Network, Implications for Potential Disease Spread and Biosecurity in Livestock, France, 2010. *PLoS ONE* 12, e0169881. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169881>
- Palisson, A., Courcoul, A., Durand, B., 2016. Role of cattle movements in bovine tuberculosis spread in France between 2005 and 2014. *PLoS one* 11, e0152578.

Références

- Palmer, M.V., Waters, W.R., Thacker, T.C., 2007. Lesion development and immunohistochemical changes in granulomas from cattle experimentally infected with *Mycobacterium bovis*. *Veterinary pathology* 44, 863–874.
- Perrin, J.-B., Hendrickx, Vinard, J.L., Ducrot, C., Calavas, D., 2011. Surveillance of cattle population through real-time mortality monitoring. *Epidemiol. et santé animale* 59–60.
- Perry, B., McDermott, J., Randolph, T., 2001. Can epidemiology and economics make a meaningful contribution to national animal-disease control? *Preventive Veterinary Medicine* 48, 231–260. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(00\)00203-8](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(00)00203-8)
- Peterson, H.H., Chen, Y.-J. (Kelly), 2005. The impact of BSE on Japanese retail meat demand. *Agribusiness* 21, 313–327. <https://doi.org/10.1002/agr.20050>
- Pfeiffer, D.U., 2006. Communicating risk and uncertainty in relation to development and implementation of disease control policies. *Veterinary Microbiology* 112, 259–264. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2005.11.020>
- Pham, H.T.T., Peyre, M., Trinh, T.Q., Nguyen, O.C., Vu, T.D., Rukkwamsuk, T., Antoine-Moussiaux, N., 2017. Application of discrete choice experiment to assess farmers' willingness to report swine diseases in the Red River Delta region, Vietnam. *Preventive Veterinary Medicine* 138, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.01.002>
- Phillips, C.J.C., Foster, C.R.W., Morris, P.A., Teverson, R., 2003. The transmission of *Mycobacterium bovis* infection to cattle. *Research in Veterinary Science* 74, 1–15.
- Pitter, J.G., Vokó, Z., Józwiak, Á., Berkics, A., 2018. Campylobacter control measures in indoor broiler chicken: critical re-assessment of cost-utility and putative barriers to implementation. *Epidemiol. Infect.* 146, 1433–1444. <https://doi.org/10.1017/S0950268818001528>
- Poirier, V., 2017. Elevages foyers de tuberculose bovine concernés par l'abattage partiel en France depuis son autorisation sur tout le territoire en 2014 : typologie des élevages concernés, efficacité du dispositif. Thèse vétérinaire, Ecole nationale vétérinaire d'Alfort.
- Pollock, J.M., McNair, J., Welsh, M.D., Girvin, R.M., Kennedy, H.E., Mackie, D.P., Neill, S.D., 2001. Immune responses in bovine tuberculosis. *Tuberculosis* 81, 103–107. <https://doi.org/10.1054/tube.2000.0258>
- Pollock, J.M., Neill, S.D., 2002. *Mycobacterium bovis* Infection and Tuberculosis in Cattle. *The Veterinary Journal* 163, 115–127. <https://doi.org/10.1053/tvjl.2001.0655>
- Pollock, J.M., Rodgers, J.D., Welsh, M.D., McNair, J., 2006. Pathogenesis of bovine tuberculosis: The role of experimental models of infection. *Veterinary Microbiology* 112, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2005.11.032>
- Porphyre, T., Stevenson, M.A., McKenzie, J., 2008. Risk factors for bovine tuberculosis in New Zealand cattle farms and their relationship with possum control strategies. *Preventive Veterinary Medicine* 86, 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2008.03.008>
- Praud, A., Boireau, C., Dufour, B., 2016. Sensitivity of γ -interferon test used in series after tuberculin test to detect bovine tuberculosis. *Veterinary Record* 179, 174.2-174. <https://doi.org/10.1136/vr.103803>
- Praud, A., Bourély, C., Boschioli, M.-L., Dufour, B., 2019. Assessment of the specificity of a gamma-interferon test performed with specific antigens to detect bovine tuberculosis, after non-negative results to intradermal tuberculin testing. *Veterinary Record Open* 6, e000335. <https://doi.org/10.1136/vetreco-2019-000335>
- Praud, A., Dufour, B., 2016. Rapport sur l'analyse des données collectées dans le cadre du protocole expérimental d'évaluation de l'IFN pour le dépistage de la tuberculose bovine et dans les élevages en suivi renforcé de 2013 à 2015.
- Praud Anne, Boschioli M.-L., Meyer L., Garin-Bastuji B., Dufour B., 2015. Assessment of the sensitivity of the gamma-interferon test and the single intradermal comparative cervical test for the diagnosis of bovine tuberculosis under field conditions. *Epidemiology and infection* 143, 157–166.
- Pucken, V.-B., Knubben-Schweizer, G., Döpfer, D., Groll, A., Hafner-Marx, A., Hörmansdorfer, S., Sauter-Louis, C., Straubinger, R.K., Zimmermann, P., Hartnack, S., 2017. Evaluating diagnostic

Références

- tests for bovine tuberculosis in the southern part of Germany: A latent class analysis. *PLoS one* 12, e0179847.
- Pujol-Dupuy C., 2014. Analyse et modélisation des données d'inspection en abattoir dans l'objectif de contribuer à la surveillance épidémiologique de la population bovine. Thèse, Université Claude Bernard-Lyon I.
- Radunz, B., 2006. Surveillance and risk management during the latter stages of eradication: Experiences from Australia. *Veterinary Microbiology* 112, 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2005.11.017>
- Ramírez-Villaescusa, A.M., Medley, G.F., Mason, S., Green, L.E., 2010. Risk factors for herd breakdown with bovine tuberculosis in 148 cattle herds in the south west of England. *Preventive Veterinary Medicine* 95, 224–230. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2010.03.009>
- Rangen, S.A., Surujballi, O.P., Lutze-Wallace, C., Lees, V.W., 2009. Is the gamma interferon assay in cattle influenced by multiple tuberculin injections? *Can Vet J* 270–274.
- Reilly, L.A., Courtenay, O., 2007. Husbandry practices, badger sett density and habitat composition as risk factors for transient and persistent bovine tuberculosis on UK cattle farms. *Preventive Veterinary Medicine* 80, 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2007.02.002>
- Renault, V., Damiaans, B., Sarrazin, S., Humblet, M.-F., Dewulf, J., Saegerman, C., 2018a. Biosecurity practices in Belgian cattle farming: Level of implementation, constraints and weaknesses. *Transbound Emerg Dis* 65, 1246–1261. <https://doi.org/10.1111/tbed.12865>
- Renault, V., Humblet, M.F., Moons, V., Bosquet, G., Gauthier, B., Cebrián, L.M., Casal, J., Saegerman, C., 2018b. Rural veterinarian's perception and practices in terms of biosecurity across three European countries. *Transboundary and Emerging Diseases* 65, e183–e193. <https://doi.org/10.1111/tbed.12719>
- Renault, V., Lomba, M., Delooz, L., Ribbens, S., Humblet, M.-F., Saegerman, C., 2020. Pilot study assessing the possible benefits of a higher level of implementation of biosecurity measures on farm productivity and health status in Belgian cattle farms. *Transboundary and Emerging Diseases* 67, 769–777. <https://doi.org/10.1111/tbed.13396>
- Réveillaud, E., Boschiroli, M.-L., Cavalerie, L., Chevalier, F., Faure, E., Fediaevsky, A., Hendrikx, P., Poliak, S., Richomme, C., Rossi, S., Tourette, I., Van De Wiele, A., 2017. Surveillance de la tuberculose bovine dans la faune sauvage en France : dispositif SYLVATUB (Bilan fonctionnel et sanitaire 2015-2016).
- RISKSUR, 2013. The EVA tool: an integrated approach for evaluation of animal health surveillance systems. Projet RISKSUR financé par l'Union Européenne, rapport pour le livrable 1.4. [https://www.fp7-risksur.eu/sites/default/files/documents/Deliverables/RISKSUR%20%28310806%29_D1.4.pdf] (consulté le 26/05/2020).
- Rivière, J., 2016. Evaluation du dispositif de surveillance de la tuberculose bovine dans la faune sauvage en France à l'aide de méthodes épidémiologique, économique et sociologique (Santé publique et épidémiologie). Université Paris Saclay.
- Rivière, J., Le Strat, Y., Dufour, B., Hendrikx, P., 2015. Sensitivity of Bovine Tuberculosis Surveillance in Wildlife in France: A Scenario Tree Approach. *PLoS ONE* 10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141884>
- Rivière, J., Le Strat, Y., Hendrikx, P., Dufour, B., 2018. Perceptions and acceptability of some stakeholders about the bovine tuberculosis surveillance system for wildlife (Sylvatub) in France. *PLOS ONE* 13, e0194447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194447>
- Robert, J., Boulahbal, F., Trystram, D., Truffot-Pernot, C., De Benoist, A.C., Vincent, V., Jarlier, V., Grosset, J., others, 1999. A national survey of human *Mycobacterium bovis* infection in France. *The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease* 3, 711–714.
- Roberts, J.L., 1998. Terminology : a glossary of technical terms on the economics and finance of health services. Organisation mondiale de la santé. [http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0014/102173/E69927.pdf] (téléchargé le 28/08/2019)

Références

- Rogers, M., Bruen, M., 1997. A new system for weighting environmental criteria for use within ELECTRE III. *European Journal of Operational Research* 552–563.
- Romano, D., Stefani, G. (Eds.), 2006. How safe is eating chicken? A study on the impact of trust and food risk communication on consumer behaviour in the European Union. Firenze Univ. Press.
- Rothel, J.S., Jones, S.L., Corner, L.A., Cox, J.C., Wood, P.R., 1990. A sandwich enzyme immunoassay for bovine interferon- γ and its use for the detection of tuberculosis in cattle. *Australian veterinary journal* 67, 134–137.
- Roy, B., 2007. La robustesse en recherche opérationnelle et aide à la décision: une préoccupation multi facettes. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00180549>.
- Roy, B., 2002. Robustesse de qui et vis-à-vis de quoi mais aussi robustesse pourquoi en aide à la décision ? Bulletin d'information de l'Euro Working Group on Multicriteria Decision Aiding. [<http://www.cs.put.poznan.pl/ewgmcd/pdf/OpRoy2.pdf>] (consulté le 26/05/2020)
- Roy, B., Bouyssou, D., 1993. Aide multicritère à la décision : méthodes et cas, Gestion. Economica, Collection Gestion, série : Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion. 690p.
- Rüegg, S.R., Welby, S., Yassin, H., Van der Stede, Y., Nafzger, R., Saatkamp, H., Schüpbach-Regula, G., Stärk, K.D.C., 2018. Optimising cost-effectiveness of freedom from disease surveillance—Bluetongue Virus Serotype 8 as an example. *Preventive Veterinary Medicine*. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2018.02.009>
- Rushton, J., Thornton, P.K., Otte, M.J., 1999. Methods of economic impact assessment: -EN- -FR- -ES-. *Rev. Sci. Tech. OIE* 18, 315–342. <https://doi.org/10.20506/rst.18.2.1172>
- Saaty, T.L., 1986. Axiomatic foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science* 32, 741.
- Saaty, T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15, 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Sahlström, L., Virtanen, T., Kyyrö, J., Lyytikäinen, T., 2014. Biosecurity on Finnish cattle, pig and sheep farms – results from a questionnaire. *Preventive Veterinary Medicine* 117, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.07.004>
- Saidou, C., 2018. Plan national de lutte contre la tuberculose bovine. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 12p [<https://agriculture.gouv.fr/le-plan-national-de-lutte-contre-la-tuberculose-bovine-2017-2022>] (consulté le 26/05/2020)
- Salman, M.D., Stärk, K.D.C., Zepeda, C., 2003. Quality assurance applied to animal disease surveillance systems: -EN- -FR- -ES-. *Revue Scientifique et Technique de l'OIE* 22, 689–696. <https://doi.org/10.20506/rst.22.2.1431>
- Santé Canada, 2004. Cadre et outils d'évaluation des systèmes de surveillance de la santé. Rapport du Comité de coordination de la surveillance de la santé Direction générale de la santé de la population et de la santé publique, gouvernement du Canada. [<http://publications.gc.ca/site/eng/260337/publication.html>] (consulté le 26/05/2020)
- Sarrazin, S., Cay, A.B., Laureyns, J., Dewulf, J., 2014. A survey on biosecurity and management practices in selected Belgian cattle farms. *Preventive Veterinary Medicine* 117, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.07.014>
- Sayers, R.G., Good, M., Sayers, G.P., 2014. A survey of biosecurity-related practices, opinions and communications across dairy farm veterinarians and advisors. *The Veterinary Journal* 200, 261–269. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2014.02.010>
- Schiller, I., Oesch, B., Vordermeier, H.M., Palmer, M.V., Harris, B.N., Orloski, K.A., Buddle, B.M., Thacker, T.C., Lyashchenko, K.P., Waters, W.R., 2010. Bovine Tuberculosis: A Review of Current and Emerging Diagnostic Techniques in View of their Relevance for Disease Control and Eradication. *Transboundary and Emerging Diseases* 57, 205–220. <https://doi.org/10.1111/j.1865-1682.2010.01148.x>
- Schulz, K., Calba, C., Peyre, M., Staubach, C., Conraths, F.J., 2016. Hunters' acceptability of the surveillance system and alternative surveillance strategies for classical swine fever in wild boar - a participatory approach. *BMC Veterinary Research* 12. <https://doi.org/10.1186/s12917-016-0822-5>

Références

- Scott, A.E., Forsythe, K.W., Johnson, C.L., 2012. National animal health surveillance: Return on investment. *Preventive Veterinary Medicine* 105, 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2012.01.007>
- Shortall, O., Green, M., Brennan, M., Wapenaar, W., Kaler, J., 2017. Exploring expert opinion on the practicality and effectiveness of biosecurity measures on dairy farms in the United Kingdom using choice modeling. *Journal of Dairy Science* 100, 2225–2239. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11435>
- Sicard, O., 2013. La loi normale asymétrique, définition, premières propriétés, estimation des paramètres. Ressource mathématique de l’IREM de la réunion. 14p.[<http://irem.univ-reunion.fr/spip.php?article633>] (consulté le 19/02/2018)
- Sichewo, P.R., Michel, A.L., Musoke, J., Etter, E.M.C., 2019. Risk Factors for Zoonotic Tuberculosis at the Wildlife–Livestock–Human Interface in South Africa. *Pathogens* 8, 101. <https://doi.org/10.3390/pathogens8030101>
- Simos, J., 1990. Evaluer l’impact sur l’environnement, Presse polytechnique et universitaires Romandes. ed. Lausanne.
- Stärk, K.D., Regula, G., Hernandez, J., Knopf, L., Fuchs, K., Morris, R.S., Davies, P., 2006. Concepts for risk-based surveillance in the field of veterinary medicine and veterinary public health: Review of current approaches. *BMC Health Services Research* 6. <https://doi.org/10.1186/1472-6963-6-20>
- Stärk, K.D.C., Salman, M., Tempelman, Y., Kihm, U., 2002. A review of approaches to quality assurance of veterinary systems for health-status certification. *Preventive Veterinary Medicine* 56, 129–140. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(02\)00156-3](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(02)00156-3)
- Tefka, N., 1986. Contribution à l’étude de la valeur des techniques d’intradermotuberculinations dans le diagnostic de la tuberculose bovine selon le contexte épidémiologique. Miliana, Algérie, Service de maladies contagieuses à l’école nationale vétérinaire d’Alfort.
- Teutsch, S.M.D., Churchill, R.E., Churchill, S.P.C.E.P.O.R.E., 2000. Principles and Practice of Public Health Surveillance. Oxford University Press.
- Thoen, C., LoBue, P., de Kantor, I., 2006. The importance of *Mycobacterium bovis* as a zoonosis. *Veterinary Microbiology* 112, 339–345. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2005.11.047>
- Thompson, D.K., Muriel, P., Russell, D., Osborne, P., Bromley, A., Rowland, M., Creigh-Tyte, S., Brown, C., 2002. Economic costs of the foot and mouth disease outbreak in the United Kingdom in 2001: -EN- -FR- -ES-. *Rev. Sci. Tech. OIE* 21, 675–687. <https://doi.org/10.20506/rst.21.3.1353>
- Tiongco, M., Narrod, C., Kobayashi, M., Scott, R., 2011. Understanding knowledge, attitude, perceptions, and practices for Highly Pathogenic Avian Influenza risks and management options among Indonesian small-scale poultry producers. 7^{ème} conférence internationale de l’ASAE (Asian Society of Agricultural Economists), 13-15 Octobre, Hanoi, Vietnam. DOI: 10.22004/ag.econ.290611
- Tisdell, C.A., Harrison, S.R., Ramsay, G.C., 1999. The economic impacts of endemic diseases and disease control programmes: -EN- -FR- -ES-. *Rev. Sci. Tech. OIE* 18, 380–398. <https://doi.org/10.20506/rst.18.2.1168>
- Tran, A., Roger, F., 2018. Renforcer les décisions en santé sur un territoire : l’appui opérationnel de l’évaluation multicritère spatialisée. *Perspective, le policy brief du Cirad*, 46, 4p.
- Van der Heijden, E.M.D.L., Jenkins, A.O., Cooper, D.V., Rutten, V.P.M.G., Michel, A.L., 2016. Field application of immunoassays for the detection of *Mycobacterium bovis* infection in the African buffalo (*Syncerus caffer*). *Veterinary Immunology and Immunopathology* 169, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2015.12.003>
- Vanderpooten, D., 2008. Aide multicritère à la décision Concepts, méthodes et perspectives.
- Varello, K., Pezzolato, M., Mascarino, D., Ingravalle, F., Caramelli, M., Bozzetta, E., 2008. Comparison of histologic techniques for the diagnosis of bovine tuberculosis in the framework of eradication programs. *Journal of veterinary diagnostic investigation* 20, 164–169.
- Vergne, T., Del Rio Vilas, V.J., Cameron, A., Dufour, B., Grosbois, V., 2015. Capture–recapture approaches and the surveillance of livestock diseases: A review. *Preventive Veterinary Medicine* 120, 253–264. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2015.04.003>

Références

- Véron, L., Cavalerie, L., Chevalier, F., Jabert, P., Tourette, I., Bronner, A., 2018. Biosécurité en élevage bovin vis-à-vis de la tuberculose en France : revue des facteurs de risque de contamination des élevages et des mesures de prévention disponibles. *Bulletin épidémiologie, santé animale et alimentation* 9–15.
- Vordermeier, H.M., Brown, J., Cockle, P.J., Franken, W.P.J., Arend, S.M., Ottenhoff, T.H.M., Jahans, K., Hewinson, R.G., 2007. Assessment of Cross-Reactivity between *Mycobacterium bovis* and *M. kansasii* ESAT-6 and CFP-10 at the T-Cell Epitope Level. *Clinical and Vaccine Immunology* 14, 1203–1209. <https://doi.org/10.1128/CVI.00116-07>
- Vose, D., 2010. Risk analysis: a quantitative guide, 3. ed., Repr. ed. Wiley, Chichester.
- Vose, D., 2000. Defining distributions from expert opinion, in: Risk Analysis: A Quantitative Guide. Chichester, England, pp. 263–290.
- Waters, W.R., Nonnecke, B.J., Olsen, S.C., Palmer, M.V., 2007. Effects of pre-culture holding time and temperature on interferon- γ responses in whole blood cultures from *Mycobacterium bovis*-infected cattle. *Veterinary Microbiology* 119, 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2006.08.014>
- Waters, W.R., Palmer, M.V., Thacker, T.C., Bannantine, J.P., Vordermeier, H.M., Hewinson, R.G., Greenwald, R., Esfandiari, J., McNair, J., Pollock, J.M., Andersen, P., Lyashchenko, K.P., 2006. Early Antibody Responses to Experimental *Mycobacterium bovis* Infection of Cattle. *Clinical and Vaccine Immunology* 13, 648–654. <https://doi.org/10.1128/CVI.00061-06>
- Waters, W.R., Whelan, A.O., Lyashchenko, K.P., Greenwald, R., Palmer, M.V., Harris, B.N., Hewinson, R.G., Vordermeier, H.M., 2010. Immune Responses in Cattle Inoculated with *Mycobacterium bovis*, *Mycobacterium tuberculosis*, or *Mycobacterium kansasii*. *Clinical and Vaccine Immunology* 17, 247–252. <https://doi.org/10.1128/CVI.00442-09>
- WHO, 1997. Protocol for the evaluation of epidemiological surveillance systems. Site internet de l'organisation mondiale de la santé (WHO), surveillance et contrôle des maladies émergentes et de autres maladies transmissibles [http://whqlibdoc.who.int/hq/1997/WHO EMC DIS_97.2.pdf] (consulté le 28/08/2019)
- Winkler, B., Mathews, F., 2015. Environmental risk factors associated with bovine tuberculosis among cattle in high-risk areas. *Biology Letters* 11, 20150536. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.0536>
- Wood, P.R., Corner, L.A., Rothel, J.S., Baldock, C., Jones, S.L., Cousins, D.B., McCormick, B.S., Francis, B.R., Creeper, J., Tweddle, N.E., 1991. Field comparison of the interferon-gamma assay and the intradermal tuberculin test for the diagnosis of bovine tuberculosis. *Australian veterinary journal* 68, 286–290.
- Wood, P.R., Jones, S.L., 2001. BOVIGAMTM: an in vitro cellular diagnostic test for bovine tuberculosis. *Tuberculosis* 81, 147–155. <https://doi.org/10.1054/tube.2000.0272>

Textes réglementaires

Arrêté ministériel du **14 Mai 1999** modifiant l'arrêté du 16 mars 1990 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective de la tuberculose bovine et le complétant en matière de tuberculose caprine.

Arrêté ministériel du **17 Juin 2009** fixant les mesures financières relatives à la lutte contre la brucellose bovine et à la lutte contre la tuberculose bovine et caprine, Version consolidée au 11 août 2018.

Arrêté ministériel du **19 Août 2009** modifiant l'arrêté du 15 septembre 2003 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la tuberculose des bovinés et des caprins. Version consolidée au 16 Janvier 2017.

Arrêté ministériel du **29 Juillet 2013** relatif à la définition des dangers sanitaires de première et deuxième catégorie pour les espèces animales. Version consolidée au 20 Janvier 2017.

Arrêté ministériel du **15 Septembre 2003** fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la tuberculose des bovinés et des caprins. Version consolidée au 20 Janvier 2017.

Références

Décision **2001/26/CE** de la Commission du 27 décembre 2000 *modifiant pour la quatrième fois la décision 1999/467/CE établissant le statut de troupeau officiellement indemne de tuberculose dans certains États membres ou régions d'États membres.*

Directive européenne **64/432/CEE** du Conseil du 26 juin 1964 *relative à des problèmes de police sanitaire en matière d'échanges intracommunautaires d'animaux des espèces bovine et porcine.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**N2005-8076** du 07 mars 2005, *Troupeaux bovins présentant un risque sanitaire particulier exclus des dérogations aux tests de dépistage individuels lors de mouvements entre exploitations.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2006-8051** du 21 février 2006, *Dérogation aux tests de dépistage brucellose et tuberculose lors de mouvements de bovins.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2011-8209** du 15 Septembre 2011, *Modification de la note DGAL/SDSPA/N2006-8051 relative aux dérogations aux tests de dépistage brucellose et tuberculose lors de mouvements de bovins.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/SDSSA/**N2013-8123** du 23 juillet 2013, *Tuberculose bovine : Dispositions techniques à mettre en œuvre à l'abattoir en application de l'arrêté du 15 Septembre 2003 modifié.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2014-108** du 13 février 2014 *Modification de la note de service DGAL/SDSPA/N2013-8202 relative au diagnostic de laboratoire post-mortem de tuberculose bovine.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2014-223** du 24 Mars 2014 *Modification de la note de service DGAL/SDSPA/N2012-8215 relative aux modalités techniques de gestion des suspicions de tuberculose bovine.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2014-541** du 04 Juillet 2014 *relative à la dérogation à l'abattage total de certains troupeaux de bovins infectés de tuberculose.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2015-803** du 23 Septembre 2015, *Tuberculose bovine : Dispositions techniques relatives au dépistage sur animaux vivants.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2016-1001** du 22 Décembre 2016 *relative aux modalités techniques de gestion des suspicions de tuberculose bovine (mise à jour pour la campagne de prophylaxie 2016-2017).*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2017-333** du 12 Avril 2017, *Protocole d'enquête épidémiologique à mettre en œuvre lors de la découverte de foyer de tuberculose bovine.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2017-841** du 23 Octobre 2017, *Modalités techniques et financières de mise en œuvre de la campagne de prophylaxie 2017-2018 concernant la tuberculose bovine en régions Nouvelle-Aquitaine et Occitanie.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2017-863** du 30 Octobre 2017, *Modification de la note DGAL/SDSPA/N2006-8051 relative aux dérogations aux tests de dépistage brucellose et tuberculose lors de mouvements de bovins afin d'allonger la durée de validité de l'IDC dans les cheptels à risque.*

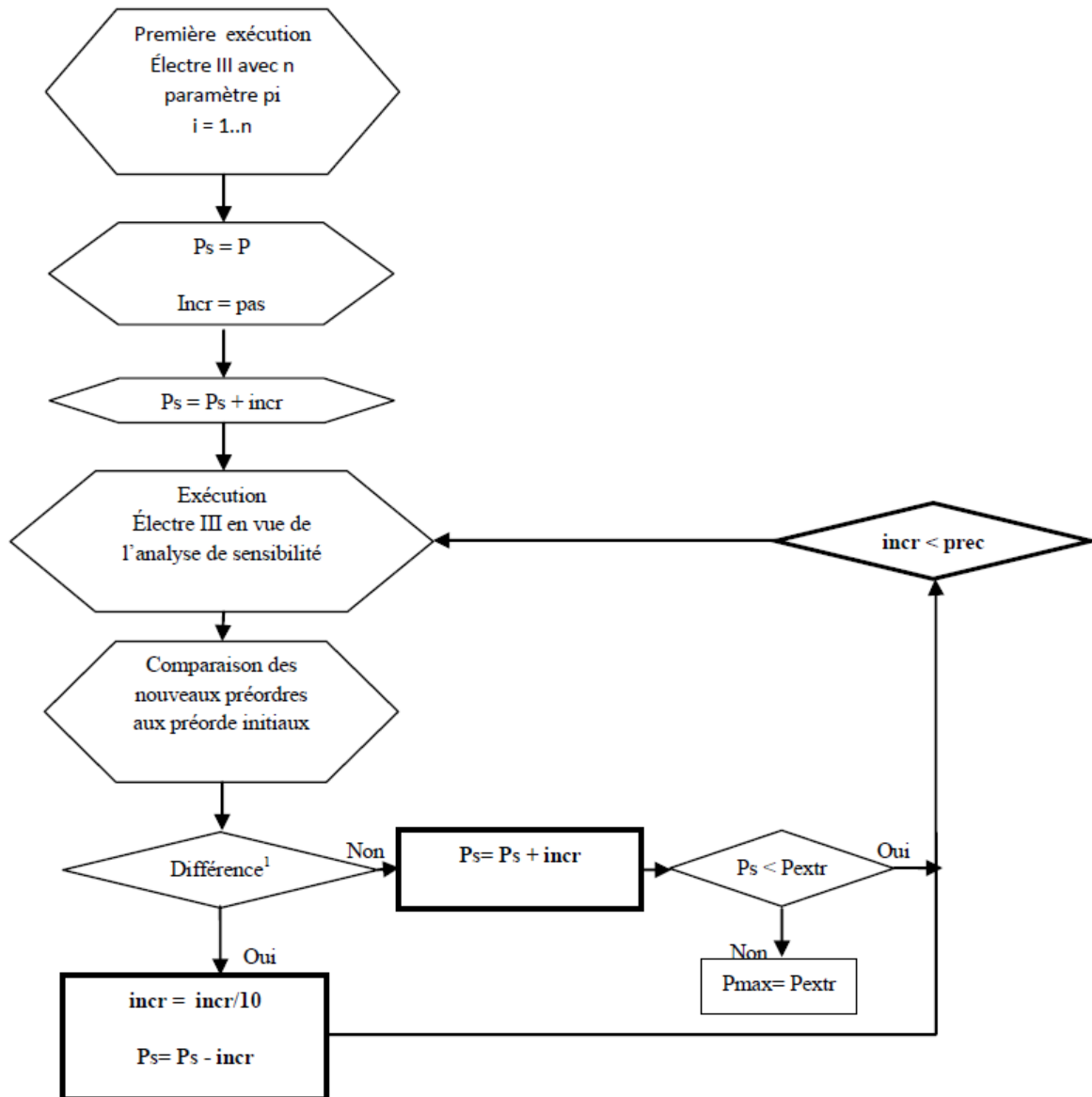
DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2018-598** du 6 Août 2018, *Modalités techniques et financières de mise en œuvre de la campagne de surveillance de la tuberculose bovine 2018-2019.*

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2018-708** du 24 Septembre 2018, *Surveillance épidémiologique de la tuberculose dans la faune sauvage en France : dispositif Sylvatub.*

Règlement **UE 2016/429** du parlement européen et du conseil du 9 mars 2016 *relatif aux maladies animales transmissibles.*

Annexes

Annexe 1. Schéma de l'algorithme permettant l'estimation des valeurs minimale et maximale que peuvent prendre un paramètre donné de l'analyse multicritère sans modifier le résultat de l'analyse (Mouine, 2011)



Légende

P: le paramètre étudié.

P_s : le paramètre utilisé.

Pas : le pas trouvé par la méthode

Incr: la variable d'incrémement.

Prec : le nombre de chiffres après la virgule (à préciser par l'utilisateur).

P_{extr} : la valeur extrême que le paramètre P ne peut dépasser.

P_{max} : la valeur maximale que le paramètre P peut atteindre sans qu'une variation apparaisse dans le pré-ordre établi par Électre III.

Annexes

Annexe 2. Protocole de réalisation et interprétation du test de dosage de l'interféron gamma pour dépister la tuberculose bovine (adapté de Poirier, 2017)

Le test de dosage de l'interféron gamma se déroule selon les étapes suivantes :

- 10 mL de sang sont prélevés sur tube hépariné ;
- Le prélèvement est ensuite acheminé **dans les six à huit heures** au laboratoire qui doit être formé et agréé pour cette technique par le LNR ;
- Stimulation des lymphocytes vivants : le sang est placé dans des plaques de puits cellulaires et est mis à incuber pendant 24 heures à 37 °C dans une atmosphère de 5 % de CO₂ en présence de différents antigènes (un seul type d'antigène par puits).

Les antigènes utilisés sont :

- les PPD aviaires et bovines Lelystad (commercialisées par Prionics® sous la dénomination Bovigam®) ;
 - un mélange de peptides PC-EC (Prionics®) composé des antigènes recombinants ESAT-6 et CFP-10 ;
 - un tampon phosphate salin (PBS), témoin négatif de la stimulation cellulaire (PBS) ;
 - du mitogène PWM (Pokeweed mitogen), un témoin positif d'immunocompétence cellulaire.
- Récupération du plasma par centrifugation.
 - Transfert du plasma dans des microplaques pour le dosage de la quantité d'IFN γ produite. Ce dosage est réalisé par la technique Elisa en sandwich en utilisant le kit Bovigam® avec quantification par mesure de la densité optique (DO).

L'interprétation du résultat du test se fait à partir des mesures des densités optiques.

Le test est contrôlé grâce à l'utilisation d'un témoin positif (TP) et d'un témoin négatif (TN). Un témoin positif d'immunocompétence cellulaire noté PWM (*poke weed mitogen* en anglais) est également utilisé. Le tampon phosphate salin (PBS pour *phosphate buffered saline* en anglais) est utilisé comme témoin négatif de la stimulation cellulaire.

Avant d'interpréter les résultats de DO obtenus pour un échantillon, la qualité de l'échantillon et la **validité de la technique ELISA** doivent être vérifiées.

Pour cela, les ratios suivants sont calculés :

$$\text{Ratio PBS} = \text{DO}_{\text{PBS}} / [3 \times (\text{DO}_{\text{TP}} - \text{DO}_{\text{TN}})]$$

$$\text{Ratio PWM} = (\text{DO}_{\text{PWM}} - \text{DO}_{\text{PBS}}) / [3 \times (\text{DO}_{\text{TP}} - \text{DO}_{\text{TN}})]$$

avec DO_{TN} = moyenne des trois DO obtenues pour les témoins négatifs

et DO_{TP} = moyenne des trois DO obtenues pour les témoins positifs

Les résultats ne sont considérés comme interprétables que si les DO répondent aux critères de validation fixés par le LNR (Anses, Laboratoire de Santé Animale de Maisons-Alfort), présentés dans le tableau A.

Tableau A : Critères de validation de la qualité de l'échantillon et de la technique ELISA utilisée, fixés par le LNR et autorisant l'interprétation des résultats du test de dosage de l'interféron gamma

Critères de validation	
Qualité de l'échantillon	Ratio PBS < 0,125 Ration PWM > 0,2
Technique ELISA	DO _{TN} < 0,130 et écarts entre les 3 DO des témoins négatifs < 0,040 DO _{TP} > 0,55 et écarts entre les 3 DO des témoins positifs < 0,3

Lorsque les critères de validation du test présentés ci-dessus sont vérifiés, trois ratios sont calculés à partir des résultats de DO obtenus par stimulation avec les antigènes PPD bovines et aviaires et les antigènes recombinants (MIX-EC, anciennement notés ESAT6 et CFP10). Pour se conformer à la norme NF U47-019 fixée par le Comité Français d'accréditation (Cofrac) concernant la mise en œuvre des techniques ELISA en santé animale, l'absorbance des témoins est prise en compte dans le calcul de ces ratios afin de lisser des variations de DO qui pourraient être dues aux variations des conditions d'analyse.

Les trois ratios calculés sont les suivants (Boireau, 2015) :

$$\text{Ratio PPD} = (\text{DO}_{\text{PPDB}} - \text{DO}_{\text{PPDA}}) / [3 \times (\text{DO}_{\text{TP}} - \text{DO}_{\text{TN}})]$$

$$\text{Ratio PPDB} = (\text{DO}_{\text{PPDB}} - \text{DO}_{\text{PBS}}) / [3 \times (\text{DO}_{\text{TP}} - \text{DO}_{\text{TN}})]$$

$$\text{Ratio MIX-EC} = (\text{DO}_{\text{MIX-EC}} - \text{DO}_{\text{PBS}}) / [3 \times (\text{DO}_{\text{TP}} - \text{DO}_{\text{TN}})]$$

L'interprétation du test de dosage de l'interféron gamma se fait en combinant l'interprétation des valeurs de ces trois ratios.

Les seuils d'interprétation, initialement fixés par le LNR pour le protocole expérimental d'évaluation de l'utilisation du test de dosage de l'interféron gamma associé en série à l'ID (NS DGAL/2013-8162), ont été réajustés, sur la base de l'analyse des données obtenues dans le cadre de ce protocole lors de la campagne 2013/2014, ceci afin d'améliorer la spécificité du schéma de dépistage sans détériorer la sensibilité du dispositif (NS DGAL/2014-864). Depuis, c'est sur ces seuils ajustés que s'appuie l'interprétation du test de dosage de l'interféron gamma.

Dans un premier temps, les trois ratios sont interprétés séparément selon les grilles présentées dans le tableau B.

Tableau B : Grilles d'interprétation des ratios calculés dans le cadre du test de dosage de l'interféron gamma, test Bovigam® (d'après l'annexe V de la note de service DGAL/SDSPA/2015-803)

Ratio	Valeurs des seuils
PPD	0,05
PPD fort	0,3
MIX-EC	0,03
MIX-EC fort	0,1
PPD Bov	0,7

Interprétation	Ratio PPD	Ratio MIX- EC	Ratio PPDB
Négatif	< 0,05	< 0,03	≤ 0,7
Positif	0,05 ≤ PPD ≤ 0,3	0,03 ≤ MIX-EC < 0,1	> 0,7
Positif fort	≥ 0,3	≥ 0,1	Sans objet

Puis, ces résultats sont croisés entre eux selon le tableau C afin d'obtenir l'interprétation finale du résultat du test.

Annexes

Tableau C : Grille d'interprétation générale du test de dosage de l'interféron gamma, test Bovigam® par croisement des interprétations des trois ratios calculés (ratio PPD, PPDB et MIX-EC) (d'après l'annexe V de la note de service DGAL/SDSPA/2015-803)

Ratio PPD	Ratio MIX- EC	Ratio PPDB	Interprétation finale du test
Négatif	Négatif	Sans objet	Négatif
Positif	Positif	Sans objet	Positif
Positif	Positif fort	Sans objet	
Positif fort	Positif fort	Sans objet	
Positif fort	Positif	Sans objet	
Négatif	Positif	Négatif	Non conclusif
Négatif	Positif	Positif	Positif
Positif	Négatif	Sans objet	Non conclusif
Positif fort	Négatif	Sans objet	Positif
Négatif	Positif fort	Sans objet	
Ininterprétable*	Ininterprétable*	Sans objet	Ininterprétable

*Si le ratio PBS présenté dans le tableau A n'est pas valide, les ratios PPD, MIX-EC et PPDB sont considérés « ininterprétables »

Si le ratio PWM est en-dessous du seuil présenté dans le tableau A : si l'échantillon est positif vis-à-vis des ratios PPD, MIX-EC et PPDB (cf. tableau B), alors le résultat doit être interprété comme positif. En revanche, si l'échantillon est négatif ou non conclusif sur la base des ratios PPD, MIX-EC et PPDB (cf. tableau B), alors le résultat est ininterprétable.

Dans le cas de résultats ininterprétables, les prises de sang correspondantes doivent être répétées pour réaliser une nouvelle analyse de dosage de l'IFN_γ.

Annexes

Annexe 3. Paramètres des lois de distributions utilisées pour décrire la proportion d'animaux adultes et de jeunes en fonction du type de troupeau (type de production, taille et taux de rotation), estimés à partir des données des élevages du Cantal (15)

Type de production	Taille	Taux de rotation	Âge	
			≥ 24 mois	< 24 mois
Laitier	petit	< 40 %	N(0,659 ; 0,00207)	Complémentaire à un
		≥ 40 %	N(0,473 ; 0,0127)	Complémentaire à un
	grand	< 40 %	N(0,625 ; 0,00248)	Complémentaire à un
		≥ 40 %	N(0,581 ; 0,0296)	Complémentaire à un
Allaitant	petit	< 40 %	N(0,578 ; 0,00180)	Complémentaire à un
		≥ 40 %	N(0,491 ; 0,00683)	Complémentaire à un
	grand	< 40 %	N(0,546 ; 0,00122)	Complémentaire à un
		≥ 40 %	N(0,212 ; 0,00719)	Complémentaire à un
Mixte	petit	< 40 %	N(0,617 ; 0,00212)	Complémentaire à un
		≥ 40 %	N(0,553 ; 0,0116)	Complémentaire à un
	grand	< 40 %	N(0,581 ; 0,00246)	Complémentaire à un
		≥ 40 %	N(0,537 ; 0,0144)	Complémentaire à un

Légende : N(;)=Normal(moyenne ; écart type)

Annexe 4. Description de la loi de distribution normale (Sicard, 2013)

Si X suit une loi normale asymétrique N(m,s,t), alors l'intervalle contenant 95 % des valeurs de X est [m-1,96*s ; m+1,96*t].

De plus, si U suit une loi de distribution de Bernoulli de paramètre s/(s+t), Xs une loi normale N(0,s) et Xt une loi normale N(0,t), alors $X' = U * |Xs| + (1-U) * |Xt|$ suit une loi normale asymétrique N(0,s,t) et $X = X' + m$ suit une loi normale asymétrique N(m,s,t).

Une fonction R, décrite par l'extrait de script ci-dessous, a été créée à partir de cette définition pour simuler une loi normale asymétrique.

```

rnorm_asym=function (n,m,min,max){
  #min =minimum of the confidence interval (CI)
  #max : maximum of CI
  # m : mean
  #n: numbers of value from the asymmetric normal law we want
  X=c()
  for (i in 1:n){
    s=(m-min)/1.96

    u=rbern(1,s/(s+t))#u follows a bernouilli distribution law of parameter (s/(s+t))
    xs=rnorm(1,0,s)
    xt=rnorm(1,0,t)
    X=c(X,m+(-u*abs(xs)+(1-u)*abs(xt)))}
  result=X #(-u*abs(xs)+(1-u)*abs(xt)) follows a normal asymmetric law of parameters 0, s et t
  #so the result will be from a normal asymmetric law of parameters m,s et t
  result}

```

Annexe 5. Calcul de la proportion d'animaux présentant des lésions détectables et évocatrices de TB en fonction du statut infectieux de l'animal

Nous avons utilisé les données d'une étude française (Courcoul *et al.*, 2014) sur les résultats des abattages diagnostiques réalisés dans les élevages infectés de Dordogne entre 2008 et 2012. Le tableau A présente les résultats de présence de lésions évocatrices de TB et les résultats des analyses PCR et des bactériologies des 5 211 animaux non-négatifs au dépistage par IDC et ayant subi un abattage diagnostique.

Tableau A: Présence de lésions évocatrices de TB détectables et résultats à la PCR et à la bactériologie des animaux ayant subi un abattage diagnostique en Dordogne entre 2008 et 2012 (Courcoul *et al.* 2014).

	Confirmé infecté (C+) (PCR + et/ou bactériologie +)	Non confirmé (C-)	Total
Présence de lésions détectables (L+)	305 (70,4 %)	392 (8,2 %)	697
Absence de lésions détectables (L-)	128 (29,6 %)	4 386 (91,8 %)	4 514
Total	433 (100 %)	4 778 (100 %)	5 211

Nous avons utilisé ces données et les caractéristiques de la PCR et de la bactériologie pour estimer la proportion d'animaux présentant des lésions évocatrices détectables parmi les animaux infectés et parmi les animaux indemnes afin de les utiliser pour paramétrer nos arbres de scénario.

Tout d'abord, nous avons estimé la proportion d'animaux infectés dans les données, $p(I+|L+)$ et $p(I+|L-)$:

D'après (Gardner *et al.*, 2000), nous avons :

$Se_{L+} = 1 - (1 - Se_{PCR|L+}) * (1 - Se_{culture|L+}) - \gamma_{Se|L+}$, avec Se_{L+} la sensibilité de l'utilisation en parallèle de la PCR et de la bactériologie sur des animaux présentant des lésions, $Se_{PCR|L+}$ la sensibilité de la PCR en présence de lésions, $Se_{culture|L+}$ la sensibilité de la bactériologie en présence de lésions, $\gamma_{Se|L+}$ la covariance de sensibilité entre ces deux test en présence de lésions.

$Sp_{L+} = Sp_{PCR|L+} * Sp_{culture|L+} + \gamma_{Sp|L+}$, avec Sp_{L+} la spécificité de l'utilisation en parallèle de la PCR et de la bactériologie sur des animaux présentant des lésions, $Sp_{PCR|L+}$ la spécificité de la PCR en présence de lésions, $Sp_{culture|L+}$ la spécificité de la bactériologie en présence de lésions et $\gamma_{Sp|L+}$ la covariance de spécificité entre ces deux test en présence de lésions.

$Se_{L-} = 1 - (1 - Se_{PCR|L-}) * (1 - Se_{culture|L-}) - \gamma_{Se|L-}$, avec Se_{L-} la sensibilité de l'utilisation en parallèle de la PCR et de la bactériologie sur des animaux ne présentant pas de lésions, $Se_{PCR|L-}$ la sensibilité de la PCR en l'absence de lésions, $Se_{culture|L-}$ la sensibilité de la bactériologie en l'absence de lésions et $\gamma_{Se|L-}$ la covariance de sensibilité entre ces deux tests en l'absence de lésions.

$Sp_{L-} = Sp_{PCR|L-} * Sp_{culture|L-} + \gamma_{Sp|L-}$, with Sp_{L-} la spécificité de l'utilisation en parallèle de la PCR et de la bactériologie sur des animaux ne présentant pas de lésions, $Sp_{PCR|L-}$ la spécificité de la PCR en l'absence de lésions, $Sp_{culture|L-}$ la spécificité de la bactériologie en l'absence de lésions et $\gamma_{Sp|L-}$ la covariance de spécificité entre ces deux tests en l'absence de lésions.

Et, d'après le tableau A :

$$p(C+|L+) = 305/697 = 0,44$$

$$p(C+|L-) = 128/4,514 = 0,028$$

$$p(L+) = 697/5,211 = 0,13$$

$$p(L-) = 4,514/5,211 = 0,87$$

Ainsi,

$$p(I+|L+) = (p(C+|L+) - (1 - Sp_{L+})) / (Se_{L+} + Sp_{L+} - 1) \text{ et } p(I+|L-) = (p(C+|L-) - (1 - Sp_{L-})) / (Se_{L-} + Sp_{L-} - 1)$$

De plus, nous pouvons estimer la prévalence de l'infection dans l'échantillon :

$$p(I+) = p(I+|L+) * p(L+) + p(I+|L-) * p(L-)$$

$$p(I+) = ((p(C+|L+) - (1 - Sp_{L+})) / (Se_{L+} + Sp_{L+} - 1)) * 0,13 + ((p(C+|L-) - (1 - Sp_{L-})) / (Se_{L-} + Sp_{L-} - 1)) * 0,87$$

$$p(I-) = 1 - p(I+)$$

D'après ces équations et par application du théorème de Bayes, nous avons calculé pour chaque itération du modèle la probabilité de présenter des lésions détectable pour un animal infecté ($p(L+|I+)$) et pour un animal indemne ($p(L+|I-)$) :

$$p(L+|I+) = p(I+|L+) * p(L+) / p(I+)$$

$$p(L+|I-) = p(I-|L+) * p(L+)/p(I-)$$

Finallement, pour 10 000 itérations, la moyenne de la proportion calculée d'animaux présentant des lésions évocatrices de TB détectables parmi les animaux infectés et indemnes était respectivement de 73 % (IC95 %: [71,3 %-76,1 %]) et 8,1 % (IC95 %: [7,6 %-8,5 %]).

Annexe 6. Covariance de sensibilité et de spécificité de deux tests dépendants utilisés en parallèle (Gardner et al., 2000)

Soit deux tests de sensibilité respective, Se1 et Se2, et de spécificité, Sp1 et Sp2, leurs covariances de sensibilité (γ_{se}) et de spécificité (γ_{sp}) doivent vérifier respectivement les inéquations (1) et (2).

$$(1) \max(-(-1-Se1)(1-Se2), -Se1*Se2) \leq \gamma_{se} \leq \min(Se1*(1-Se2), Se2*(1-Se1))$$

$$(2) \max(-(-1-Sp1)(1-Sp2), -Sp1*Sp2) \leq \gamma_{sp} \leq \min(Sp1*(1-Sp2), Sp2*(1-Sp1))$$

Annexe 7. Résultats de l'estimation des coûts journaliers d'entretien des différents types d'animaux en fonction du type de production (Buczinski et Reuillon, 2015) (tableau A) et méthode utilisée pour regrouper certains de ces résultats en des catégories de type d'animaux plus larges.

Tableau A. Résultats de l'estimation des coûts journaliers d'entretien des différents types d'animaux en fonction du type de production, en euros par jour (Buczinski et Reuillon, 2015)

Type d'animal	Type de production			
	Laitier			
	Laitier de plaine	Laitier de montagne		
Femelle ≥ 24 mois	3,18	4,18		
Femelle < 24 mois	2,87	3,79		
Veau laitier mâle *	103,66	122,06		
	Allaitant			
	Naisseur	Naisseur/engraisseur		
	Vache ≥ 24 mois	3,68	3,70	
	Génisse gestante de 3 ans	3,29	3,68	
	Femelle < 24 mois	Génisse ≤ 1 an	1,92	1,88
		Génisse > 1 an	2,39	2,33
	Mâle < 6 mois	1,30	1,42	
Mâle ≥ 6 mois	3,14	3,32		

Pour les élevages allaitants, nous avons regroupé l'estimation pour les vaches de plus de 24 mois et celle pour les génisses gestantes de trois ans dans la catégorie « femelle de plus de 24 mois ». Nous avons choisi les paramètres de la loi uniforme pour décrire les coûts d'entretien journalier de ce groupe comme étant la valeur minimale et maximale parmi les quatre estimations.

Nous avons également regroupé les estimations pour les génisses âgées de un et deux ans dans la catégorie « femelle de moins de 24 mois ». Une analyse des données de la BDNI a montré que, dans la plupart des élevages allaitants naisseurs ou naisseurs/engraisseurs français, il y a plus de génisses de moins d'un an que de génisses âgées de un à deux ans : la proportion moyenne de génisses de moins d'un an chez les génisses plus jeunes que deux ans était de 64 %. Nous avons donc estimé le coût d'entretien journalier des femelles de moins de 24 mois comme la moyenne pondérée de ce coût pour une génisse âgée d'un an et une génisse âgée de deux ans, avec des coefficients de 0,64 pour les génisses âgés de un an et de 0,36 pour celles de deux ans. Nous avons obtenu des frais d'entretien journalier de 2,09 € HT pour les femelles de moins de 24 mois dans les élevages allaitants naisseurs et de 2,04 € HT pour la même catégorie d'animaux dans les élevages allaitants naisseurs/engraisseurs.

Annexes

Annexe 8. Moyenne (tableau A) et écart type (tableau B) des lois de distribution normales s'ajustant le mieux au nombre de chaque type d'animal vendu chaque mois de l'année 2016 en France pour chaque type de troupeau (source: BDNI)

Légende: Fsup24: femelle de plus de 24 mois, Finf24: femelle de moins de 24 mois, Msup6: mâle de plus de 6 mois, Minf6: mâle de moins de 6 mois, Veulaitier : veau laitier ;

Lpsup: petit troupeau laitier avec un taux de rotation supérieur ou égal à 40 %, Lpinf: petit troupeau laitier avec un taux de rotation inférieur à 40 %, Lgsup: grand troupeau laitier avec un taux de rotation supérieur ou égal à 40 %, Lginf: grand troupeau laitier avec un taux de rotation inférieur à 40 % ;

Apsup: petit troupeau allaitant avec un taux de rotation supérieur ou égal à 40 %, Apinf: petit troupeau allaitant avec un taux de rotation inférieur à 40 %, Agsup: grand troupeau allaitant avec un taux de rotation supérieur ou égal à 40 %, Aginf: grand troupeau allaitant avec un taux de rotation inférieur à 40 % ;

Mpsup: petit troupeau mixte avec un taux de rotation supérieur ou égal à 40 %, Mpinf: petit troupeau mixte avec un taux de rotation inférieur à 40 %, Mgsup: grand troupeau mixte avec un taux de rotation supérieur ou égal à 40 %, Mginf: grand troupeau mixte avec un taux de rotation inférieur à 40 %.

Tableau A: Moyenne des lois de distribution s'ajustant le mieux au nombre de chaque type d'animal vendu chaque mois de l'année 2016 en France pour chaque type de troupeau (source: BDNI)

Type d'animal et de troupeau	Mois											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fsup24_Lpsup	2,02	3,63	4,72	1,58	7,32	2,75	17,22	14,31	3,39	20,10	0,00	0,00
Finf24_Lpsup	2,33	4,12	6,58	1,97	6,59	1,84	13,13	2,34	2,75	22,73	0,00	0,00
Mpup6_Lpsup	2,00	4,59	1,56	2,62	7,82	2,61	9,56	2,75	17,22	14,31	0,00	0,00
Minf6_Lpsup	1,50	4,67	1,67	6,39	6,36	3,39	20,10	1,84	13,13	0,00	0,00	0,00
Veulaitier_Lpsup	2,40	3,80	1,93	5,38	2,34	2,75	22,73	2,61	9,56	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Lpinf	1,30	1,64	2,51	0,54	1,58	0,33	1,27	1,94	0,33	1,23	0,20	1,99
Finf24_Lpinf	1,43	2,65	2,58	0,65	1,22	0,34	1,45	0,25	0,32	1,50	0,28	1,44
Mpup6_Lpinf	1,13	2,82	0,66	0,78	1,35	0,25	1,67	0,33	1,27	1,94	0,42	1,36
Minf6_Lpinf	0,94	2,41	0,69	1,59	1,58	0,33	1,23	0,34	1,45	0,00	0,16	1,65
Veulaitier_Lpinf	1,40	1,95	0,65	1,77	0,25	0,32	1,50	0,25	1,67	0,19	0,00	1,70
Fsup24_Lgsup	5,01	6,50	8,36	2,84	12,17	7,25	14,30	23,38	7,61	20,12	0,00	0,00
Finf24_Lgsup	5,68	9,24	10,32	2,41	8,24	8,46	20,73	5,97	8,76	21,32	0,00	0,00
Mpup6_Lgsup	4,79	10,27	2,79	4,12	5,03	6,91	22,34	7,25	14,30	23,38	0,00	0,00
Minf6_Lgsup	4,16	8,85	2,78	8,67	9,76	7,61	20,12	8,46	20,73	0,00	0,00	0,00
Veulaitier_Lgsup	5,12	8,44	4,15	7,67	5,97	8,76	21,32	6,91	22,34	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Lginf	3,14	3,41	4,07	0,85	2,96	1,08	2,76	2,92	1,08	3,05	0,64	2,61
Finf24_Lginf	3,21	4,46	4,13	1,03	1,98	1,16	3,28	0,86	0,95	3,09	0,83	2,51
Mpup6_Lginf	2,66	5,74	1,03	1,28	2,04	0,96	3,75	1,08	2,76	2,92	1,08	2,34
Minf6_Lginf	2,14	5,13	1,05	2,20	2,45	1,08	3,05	1,16	3,28	0,06	0,51	2,79
Veulaitier_Lginf	2,95	3,47	1,02	3,24	0,86	0,95	3,09	0,96	3,75	0,50	2,45	2,81
Fsup24_Apsup	1,75	3,00	5,50	1,49	7,91	4,42	19,84	17,08	4,71	21,92	0,00	0,00
Finf24_Apsup	1,74	4,09	6,15	1,87	6,45	4,96	19,37	4,39	5,00	20,27	0,00	0,00
Mpup6_Apsup	2,31	4,09	1,55	3,04	9,03	4,15	21,74	4,42	19,84	17,08	0,00	0,00
Minf6_Apsup	2,04	5,54	1,80	7,17	10,64	4,71	21,92	4,96	19,37	0,00	0,00	0,00
Veulaitier_Apsup	2,41	5,00	2,09	6,46	4,39	5,00	20,27	4,15	21,74	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Apinf	0,67	0,94	1,87	0,41	1,87	0,91	2,36	2,90	1,05	1,88	0,00	0,00
Finf24_Apinf	0,78	2,03	2,48	0,62	1,26	0,89	2,29	1,04	1,44	2,51	0,00	0,00
Mpup6_Apinf	0,77	2,15	0,66	0,90	1,73	0,64	2,26	0,91	2,36	2,90	0,00	0,00
Minf6_Apinf	0,49	2,05	0,77	1,84	2,19	1,05	1,88	0,89	2,29	0,00	0,00	0,00
Veulaitier_Apinf	0,66	1,42	0,71	1,95	1,04	1,44	2,51	0,64	2,26	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Agsup	10,84	11,50	20,62	3,29	11,95	11,09	32,08	37,44	12,84	22,33	0,00	0,00
Finf24_Agsup	11,32	19,47	20,80	4,67	9,25	12,58	26,63	11,01	13,40	29,50	0,00	0,00
Mpup6_Agsup	14,46	20,08	4,10	4,39	13,11	9,85	33,09	11,09	32,08	37,44	0,00	0,00

Type d'animal et de troupeau	Mois											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Minf6_Agsup	12,47	26,86	3,77	11,98	9,64	12,84	22,33	12,58	26,63	0,00	0,00	0,00
Veaulaitier_Agsup	11,06	23,14	4,95	9,97	11,01	13,40	29,50	9,85	33,09	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Aginf	2,13	2,46	3,75	1,01	4,30	3,36	5,92	6,31	3,87	5,37	0,00	0,00
Finf24_Aginf	2,62	3,93	4,50	1,57	2,79	3,31	5,80	3,41	4,06	6,47	0,00	0,00
Mpup6_Aginf	2,90	4,68	1,53	1,95	3,66	2,61	5,88	3,36	5,92	6,31	0,00	0,00
Minf6_Aginf	1,88	5,44	1,95	3,56	4,11	3,87	5,37	3,31	5,80	0,00	0,00	0,00
Veaulaitier_Aginf	2,15	3,37	1,85	4,18	3,41	4,06	6,47	2,61	5,88	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Mpsup	2,99	4,69	7,58	2,61	6,24	4,86	13,68	8,32	5,89	29,59	0,00	0,00
Finf24_Mpsup	4,55	4,61	8,05	3,21	8,85	4,73	11,95	5,15	5,11	19,24	0,00	0,00
Mpup6_Mpsup	3,87	9,42	2,38	2,07	9,41	6,50	12,37	4,86	13,68	8,32	0,00	0,00
Minf6_Mpsup	3,59	6,72	3,46	6,33	2,75	5,89	29,59	4,73	11,95	0,00	0,00	0,00
Veaulaitier_Mpsup	4,02	7,88	2,56	8,51	5,15	5,11	19,24	6,50	12,37	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Mpinf	2,01	2,41	3,26	0,83	2,22	1,39	2,86	3,29	1,52	2,64	0,00	1,71
Finf24_Mpinf	2,11	3,07	3,33	1,08	1,44	1,51	3,03	1,34	1,82	3,03	0,16	0,00
Mpup6_Mpinf	1,99	3,02	1,07	1,36	1,88	1,14	3,74	1,39	2,86	3,29	0,22	1,54
Minf6_Mpinf	1,49	3,34	1,21	2,01	2,25	1,52	2,64	1,51	3,03	0,00	0,00	1,95
Veaulaitier_Mpinf	2,00	2,40	1,20	2,05	1,34	1,82	3,03	1,14	3,74	0,04	0,00	0,00
Fsup24_Mgsup	15,85	15,11	31,38	4,56	15,42	14,71	13,85	52,24	13,56	16,62	0,00	0,00
Finf24_Mgsup	14,54	24,20	31,29	3,53	6,42	12,88	45,05	9,00	19,31	27,77	0,00	0,00
Mpup6_Mgsup	14,29	21,66	5,53	5,93	7,05	10,53	22,60	14,71	13,85	52,24	0,00	0,00
Minf6_Mgsup	16,01	20,88	4,10	12,56	14,68	13,56	16,62	12,88	45,05	0,00	0,00	0,00
Veaulaitier_Mgsup	16,71	25,60	6,48	6,93	9,00	19,31	27,77	10,53	22,60	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Mginf	4,54	4,81	4,56	1,22	3,43	3,60	5,40	6,23	3,71	5,47	0,28	2,70
Finf24_Mginf	4,78	4,56	5,34	1,59	2,43	3,88	6,01	3,21	3,81	5,80	0,46	2,66
Mpup6_Mginf	4,34	5,70	1,54	1,92	2,68	3,29	6,17	3,60	5,40	6,23	0,78	2,28
Minf6_Mginf	3,46	4,98	1,81	2,66	3,06	3,71	5,47	3,88	6,01	0,00	0,23	2,75
Veaulaitier_Mginf	4,11	4,02	1,73	3,75	3,21	3,81	5,80	3,29	6,17	0,15	0,00	2,70

Tableau B. Écart type des lois de distribution s'ajustant le mieux au nombre de chaque type d'animal vendu chaque mois de l'année 2016 en France pour chaque type de troupeau (source: BDNI)

Type d'animal et de troupeau	Mois											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fsup24_Lpsup	1,89	2,71	4,94	1,58	6,02	2,24	12,41	12,27	3,98	18,12	0,00	0,00
Finf24_Lpsup	1,90	3,78	6,61	2,07	5,03	3,11	12,03	2,20	2,39	21,30	0,00	0,00
Mpup6_Lpsup	1,94	4,03	1,33	2,03	6,28	3,33	19,19	2,24	12,41	12,27	0,00	0,00
Minf6_Lpsup	2,21	4,34	1,68	3,80	7,85	3,98	18,12	3,11	12,03	0,00	0,00	0,00
Veaulaitier_Lpsup	2,68	5,03	1,64	5,41	2,20	2,39	21,30	3,33	19,19	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Lpinf	1,29	1,43	2,47	0,63	1,31	0,35	1,33	1,16	0,30	1,46	0,27	1,43
Finf24_Lpinf	1,29	2,36	2,99	0,71	1,23	0,32	1,95	0,27	0,23	1,37	0,32	1,42
Mpup6_Lpinf	1,11	2,71	0,63	0,71	1,51	0,32	1,64	0,35	1,33	1,16	0,32	1,60
Minf6_Lpinf	1,26	2,27	0,69	1,37	1,64	0,30	1,46	0,32	1,95	0,13	0,20	1,70
Veaulaitier_Lpinf	1,46	2,33	0,56	1,87	0,27	0,23	1,37	0,32	1,64	0,13	1,48	1,41
Fsup24_Lgsup	5,07	5,85	8,01	2,78	10,97	7,57	15,09	18,65	7,30	18,00	0,00	0,00
Finf24_Lgsup	4,97	7,82	10,68	3,93	6,88	7,53	23,69	6,00	6,47	20,10	0,00	0,00
Mpup6_Lgsup	4,75	9,12	2,54	3,90	9,89	7,60	26,89	7,57	15,09	18,65	0,00	0,00
Minf6_Lgsup	4,66	9,22	3,29	5,95	13,07	7,30	18,00	7,53	23,69	0,00	0,00	0,00

Annexes

Type d'animal et de troupeau	Mois											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Veulaitier_Lgsup	5,33	8,80	3,22	7,86	6,00	6,47	20,10	7,60	26,89	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Lginf	2,97	3,07	4,39	0,99	2,60	1,10	3,39	2,91	1,01	3,39	0,77	2,33
Finf24_Lginf	2,87	3,94	4,43	1,13	1,69	1,12	3,84	0,92	0,79	3,19	0,86	2,35
Mpup6_Lginf	2,62	5,57	0,97	1,21	2,41	1,16	3,31	1,10	3,39	2,91	0,85	2,67
Minf6_Lginf	2,77	4,55	1,06	1,98	2,47	1,01	3,39	1,12	3,84	0,41	0,55	2,82
Veulaitier_Lginf	3,01	3,80	0,91	3,63	0,92	0,79	3,19	1,16	3,31	0,44	2,52	2,55
Fsup24_Apsup	1,69	2,59	6,58	1,85	7,34	4,32	14,87	19,19	5,85	21,52	0,00	0,00
Finf24_Apsup	1,95	3,98	6,11	2,50	7,78	4,93	19,19	3,68	4,62	29,48	0,00	0,00
Mpup6_Apsup	1,91	4,58	1,49	2,17	9,43	5,44	22,18	4,32	14,87	19,19	0,00	0,00
Minf6_Apsup	2,88	5,02	2,09	5,59	8,12	5,85	21,52	4,93	19,19	0,00	0,00	0,00
Veulaitier_Apsup	2,73	7,55	1,63	8,27	3,68	4,62	29,48	5,44	22,18	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Apinf	0,66	0,82	2,11	0,46	1,53	0,90	2,28	2,30	1,26	2,30	0,00	0,00
Finf24_Apinf	0,82	1,91	2,48	0,73	1,43	0,82	2,31	0,99	0,94	2,80	0,00	0,00
Mpup6_Apinf	0,58	2,27	0,70	0,67	1,95	0,84	2,40	0,90	2,28	2,30	0,00	0,00
Minf6_Apinf	0,59	1,52	0,83	1,82	1,91	1,26	2,30	0,82	2,31	0,00	0,00	0,00
Veulaitier_Apinf	0,75	1,66	0,52	2,09	0,99	0,94	2,80	0,84	2,40	0,00	0,00	0,00
Fsup24_BApup	10,85	13,10	21,50	3,98	12,22	10,81	41,19	24,72	11,98	24,11	0,00	0,00
Finf24_BApup	12,73	21,41	25,83	3,67	10,08	11,59	29,97	12,14	10,12	28,43	0,00	0,00
Mpup6_BApup	11,18	24,09	4,34	3,84	7,92	11,83	29,51	10,81	41,19	24,72	0,00	0,00
Minf6_BApup	13,75	20,75	5,36	14,05	11,90	11,98	24,11	11,59	29,97	0,00	0,00	0,00
Veulaitier_BApup	11,57	25,71	4,00	11,24	12,14	10,12	28,43	11,83	29,51	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Aginf	2,21	2,32	3,99	1,26	3,33	3,18	5,80	5,30	4,03	6,33	0,00	0,00
Finf24_Aginf	2,69	4,68	4,72	1,69	3,23	3,22	5,89	3,32	2,92	6,46	0,00	0,00
Mpup6_Aginf	2,24	5,28	1,64	1,53	3,80	3,53	6,18	3,18	5,80	5,30	0,00	0,00
Minf6_Aginf	2,26	3,63	2,11	3,92	3,74	4,03	6,33	3,22	5,89	0,00	0,00	0,00
Veulaitier_Aginf	2,27	3,77	1,31	4,61	3,32	2,92	6,46	3,53	6,18	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Mpsup	3,47	4,26	8,37	2,02	4,91	3,59	8,01	15,32	6,74	14,63	0,00	0,00
Finf24_Mpsup	4,13	5,72	7,31	2,39	5,86	6,60	9,46	3,56	5,55	19,43	0,00	0,00
Mpup6_Mpsup	3,76	6,97	2,08	2,14	4,62	5,81	24,06	3,59	8,01	15,32	0,00	0,00
Minf6_Mpsup	4,81	6,37	2,35	4,19	4,64	6,74	14,63	6,60	9,46	0,00	0,00	0,00
Veulaitier_Mpsup	4,48	10,00	2,11	4,65	3,56	5,55	19,43	5,81	24,06	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Mpinf	1,99	2,12	2,76	0,98	1,91	1,41	2,89	2,85	1,65	3,06	0,13	0,00
Finf24_Mpinf	2,08	2,91	3,17	1,22	1,63	1,41	3,04	1,40	1,27	3,20	0,15	1,60
Mpup6_Mpinf	1,78	3,52	1,16	1,14	2,01	1,43	2,95	1,41	2,89	2,85	0,13	1,79
Minf6_Mpinf	1,84	2,86	1,29	1,92	1,96	1,65	3,06	1,41	3,04	0,00	0,08	1,90
Veulaitier_Mpinf	2,03	2,65	0,96	2,41	1,40	1,27	3,20	1,43	2,95	0,00	0,00	1,63
Fsup24_MApup	13,27	18,58	32,32	4,42	3,81	15,38	20,87	21,36	13,26	23,53	0,00	0,00
Finf24_MApup	13,71	18,14	35,23	3,78	6,27	10,45	49,08	11,70	11,02	43,00	0,00	0,00
Mpup6_MApup	12,36	22,28	5,03	3,15	6,37	14,62	16,06	15,38	20,87	21,36	0,12	0,00
Minf6_MApup	22,75	14,16	4,93	15,27	6,24	13,26	23,53	10,45	49,08	0,00	0,00	2,87
Veulaitier_MApup	19,38	40,56	2,90	8,09	11,70	11,02	43,00	14,62	16,06	0,00	0,00	0,00
Fsup24_Mginf	4,44	4,46	5,50	1,45	2,76	3,46	5,69	5,39	3,48	6,09	0,45	2,30
Finf24_Mginf	4,19	6,13	5,47	1,70	3,03	3,71	5,96	3,41	3,02	5,60	0,60	2,33
Mpup6_Mginf	3,95	5,69	1,58	1,78	2,99	3,86	5,92	3,46	5,69	5,39	0,49	2,76
Minf6_Mginf	4,33	4,31	1,89	3,35	3,19	3,48	6,09	3,71	5,96	0,02	0,30	2,69
Veulaitier_Mginf	4,22	4,76	1,39	4,27	3,41	3,02	5,60	3,86	5,92	0,19	2,32	2,35

Annexes

Annexe 9. Coût moyen pour l'État et pour l'élevage de chaque protocole estimé par la méthode des arbres de scénario pour chaque type de troupeau, pour un troupeau suspect jusqu'à confirmation ou infirmation de la suspicion (en euros par troupeau)

Type de production	Catégorie de taille	Taux de rotation	Protocole « triage IFN »		Protocole « abattage seul »		Protocole « abattage-recontrôle IDC »	
			Coût État ([IC _{95%}])	Coût élevage ([IC _{95%}])	Coût État ([IC _{95%}])	Coût élevage ([IC _{95%}])	Coût État ([IC _{95%}])	Coût élevage ([IC _{95%}])
Élevage laitier	petit (< 74 adultes)	< 40 %	1 247 [1 219-1 274]	1 147 [1130-1163]	1 743 [1 711-1 774]	959 [953-966]	2 884 [2 833-2 936]	1 595 [1 584-1 607]
		≥ 40 %	521 [508-534]	1 938 [1910-1967]	870 [852-888]	2 338 [2 320-2 357]	1 385 [1 356-1 414]	4 207 [4 172-4 241]
	grand (≥ 74 adultes)	< 40 %	3 607 [3 537-3 678]	3 381 [3327-3434]	4 056 [3 988-4124]	1 849 [1 838-1 860]	5 820 [5 726-5 913]	3 130 [3 108-3 152]
		≥ 40 %	2 364 [2 319-2 409]	6 899 [6783-7015]	2 897 [2 850-2 944]	4 051 [4 021-4 082]	4 372 [4 303-4 441]	7 611 [7 553-7 670]
Élevage allaitant	petit (< 66 adultes)	< 40 %	459 [448-471]	752 [739-764]	583 [570-597]	772 [766-777]	986 [963-1 008]	1 400 [1 388-1 412]
		≥ 40 %	327 [318-335]	2 025 [1985-2064]	438 [427-449]	2 495 [2 472-2518]	726 [708-743]	5 149 [5 101-5 198]
	grand (≥ 66 adultes)	< 40 %	1 663 [1 624-1 701]	3 707 [3632-3783]	1 677 [1 640-1 715]	1 892 [1 878-1 906]	2 407 [2 357-2 457]	3 614 [3 584-3 644]
		≥ 40 %	538 [5 26-551]	6 931 [6782-7080]	667 [652-681]	6 282 [6 221-6 342]	939 [919-959]	13 112 [12 985-13 238]
Élevage mixte	petit (< 124 adultes)	< 40 %	2 131 [2 082-2 180]	2 819 [2769-2868]	2 541 [2 490-2 593]	1 761 [1 749-1 774]	3 863 [3 788-3 938]	3 185 [3 161-3 209]
		≥ 40 %	1 539 [1 501-1 577]	6 021 [5909-6133]	1 957 [1 916-1 998]	4 212 [4 179-4 245]	3 037 [2 976-3 098]	8 176 [8 110-8 242]
	grand (≥ 124 adultes)	< 40 %	5 242 [5 132-5 351]	7 824 [7685-7962]	5 372 [5 267-5 476]	3 320 [3 298-3 343]	7 147 [7 013-7 282]	6 031 [5 986-6 076]
		≥ 40 %	4 644 [4 547-4 741]	28 044 [27 509-28 579]	4 840 [4 746-4 934]	1 1150 [1 1058-1 1241]	6 443 [6 322-6 564]	22 176 [21 995-22 357]

Annexes

Annexe 10. Départements sélectionnés pour l'enquête qualitative des pratiques d'ID des VS et leurs caractéristiques (Gully et al., 2018)

Département	Code Insee	Région	Catégorie de prévalence TB	Type de production et races majoritaires	Fréquence du dépistage en 2016
Pyrénées-Atlantiques	64	Nouvelle-Aquitaine	≥ 10 foyers entre 2012 et 2016	Allaitant blonds	Zonage
Landes	40			Très petits élevages blonds	Biennal
Dordogne	24			Allaitant Limousins	Zonage
Côte d'Or	21	Bourgogne-	Entre 1 et 5 foyers avant 2015	Allaitant charolais	Annuel
Yonne	89	Franche-Comté		Allaitant charolais	Zonage
Vendée	85	Pays-de-la-Loire		Allaitant charolais	Arrêt
Vienne	86	Nouvelle-Aquitaine	0	Allaitant limousins	Quadriennal + Zonage

Annexe 11. Résultats des régressions linéaires simples expliquant le score de réalisation de l'IDC (n=115)

Variable explicative	Valeur p	Remarque sur la variable explicative
Score de perception	0,00043**	Continue
Sexe du VS	0,525	Binaire (H/F)
Âge du VS	0,358	Catégorielle (moins de 30, 31-40, 41-50, 51-60, plus de 60)
	0,439 ^F	Catégorielle (<50 ans, ≥50 ans)
Expérience en rurale du VS (durée d'activité en rurale)	0,813	Continue
Ecole de formation	0,03566*	Catégorielle (étranger, Nantes, Toulouse, Lyon, Alfort)
Statut du VS	0,50	Catégorielle (libéral/salarié)
Nombre d'ID réalisées	0,882	Continue
Proportion d'IDS parmi les ID réalisées par le VS	0,0151*	Continue
Proportion d'activité rurale	0,2827	Catégorielle (≤20%,]20-40],]40-60],]60-80],]80-100])
Fréquence des cornadis dans les élevages	0,0494*	Catégorielle (très fréquent (n=40)/ moins fréquent (n=75))
Fréquence des couloirs	0,011*	Catégorielle (très fréquent (n=62) / Moins fréquent (n=53))
Aide à la contention	0,379 ^F	Catégorielle (<2 personnes, ≥2 personnes)
Type de production	0,107*	Catégorielle (Laitier/allaitant/mixte)
Taille élevage	0,856	Continue
Rythme de prophylaxie maximal dans les départements où le VS exerce	0,312 ^F	Catégorielle (annuel, biennal ou triennal, arrêt ou zonage)
Prévalence de la tuberculose bovine dans les départements où le VS exerce	0,581	Catégorielle (pas infecté ou 1 à 5 foyers anciens, infecté (1 à 5 foyers récents), très infecté >10 foyers)

**significatif avec un risque d'erreur accepté $\alpha=0,01$, inclus dans l'analyse multicritère

*non significatif mais $p<0,25$ donc inclusion dans l'analyse multivariée

^F Variables forcées dans le premier modèle multivarié (avant simplification par la méthode automatisée)

¹ Les quatre écoles vétérinaires françaises

IDS: intradermotuberculination cervicale simple

IDC: intradermotuberculination cervicale comparative

ID: intradermotuberculination cervicale

Annexe 12. Résultats des régressions linéaires simples expliquant le score de perception

Variable explicative	Valeur p	Remarque sur la variable explicative
Score id	0,00043**	Continue
Sexe du VS	0,229*	Binaire (H/F)
Âge du VS	0,024*	Continue
Expérience en rurale du VS (durée d'activité en rurale)	0,103*	Continue
Ecole de formation	0,187*	Catégorielle (étranger, Nantes, Toulouse, Lyon, Alfort)
Statut du VS	0,329	Catégorielle (libéral/salarié)
Proportion d'IDS parmi les ID réalisées par le VS	0,12*	Continue
Nombre d'ID	0,523	Continue
Proportion d'activité rurale	0,078*	Catégorielle ($\leq 20\%$,]20-40],]40-60],]60-80],]80-100])
Aide à la contention	0,00081**	Catégorielle (moins de 2 personnes, au moins deux personnes)
Fréquence des cornadis dans les élevages	0,017*	Catégorielle (très fréquent/moins fréquent)
Fréquence des couloirs	0,997	Catégorielle (très fréquent/moins fréquent)
Taille élevage	0,277	Continue
Rythme de prophylaxie maximal dans les départements où le VS exerce	0,2029*	Catégorielle (annuel, biennal ou triennal, arrêt ou zonage)
Prévalence de la tuberculose bovine dans les départements où le VS exerce	0,522	Catégorielle (pas infecté ou 1 à 5 foyers anciens, infecté (1 à 5 foyers récents), très infecté >10 foyers)
Type de production	0,1413*	Catégorielle (Laitier/allaitant/mixte)

**significatif avec un risque d'erreur accepté $\alpha=0,01$, inclus dans l'analyse multivariée

*non significatif mais $p < 0,25$ donc inclusion dans l'analyse multivariée

¹ Les quatres écoles vétérinaires françaises

IDS: intradermotuberculination cervicale simple

IDC: intradermotuberculination cervicale comparative

ID: intradermotuberculination cervicale

Annexe 13. Résultats de la régression logistique expliquant le score de perception par l'âge du VS, le nombre de personnes en général présentes pour aider à la contention des animaux et la fréquence des cornadis dans sa clientèle

R² ajusté = 0,1587

Statistique F = 8,171

Valeur p du modèle < 0,001

Écart type résiduel = 0,1105 (degrés de liberté =111)

	Coefficient estimé	Écart type	Valeur p	Catégorie de référence
Constante	0,38	0,019	< 2, 10 ⁻¹⁶ **	/
Âge du VS (< 50, ≥ 50)	-0,049	0,021	0,019	< 50 ans
Fréquence des cornadis (Fréquent / moins fréquent)	-0,057	0,022	0,0098**	Moins fréquent
Aide à la contention (<2 personnes / ≥2 personnes)	-0,069	0,021	0,0013**	< 2 personnes

** $p \leq 0,01$, association significative

Annexes

Annexe 14. Résultats des régressions logistiques simples avec comme variable à expliquer le nombre de personnes présentes le plus souvent pour aider à la contention

Variable explicative	Valeur p	Remarque sur la variable explicative
Sexe du VS	0,169*	Binaire (H/F)
Âge du VS	0,4144 ^F	Catégorielle (<50 ans, ≥50 ans)
Expérience en rurale du VS (durée d'activité en rurale)	0,851	Continue
Ecole de formation	0,274	Catégorielle (étranger, Nantes ¹ , Toulouse ¹ , Lyon ¹ , Alfort ¹)
Statut du VS	0,812	Catégorielle (libéral/salarié)
Nombre d'ID réalisées	0,939	Continue
Proportion d'IDS parmi les ID réalisées par le VS	0,0446*	Continue
Proportion d'activité rurale	0,851	Catégorielle (≤20%,]0-40],]40-60],]60-80],]80-100])
Fréquence des cornadis dans les élevages	0,705	Catégorielle (très fréquent (n=40)/ moins fréquent (n=75))
Fréquence des couloirs	0,0846*	Catégorielle (très fréquent (n=62) / Moins fréquent (n=53))
Type de production	0,9493	Catégorielle (Laitier/allaitant charolais/ allaitant autre/mixte)
Taille élevage	0,913	Continue
Rythme de prophylaxie maximal dans les départements où le VS exerce	0,1232*	Catégorielle (annuel, biennal ou triennal, arrêt ou zonage)
Prévalence de la tuberculose bovine dans les départements où le VS exerce	0,0388*	Catégorielle (pas infecté ou 1 à 5 foyers anciens, infecté (1 à 5 foyers récents), très infecté >10 foyers)

**significatif avec un risque d'erreur accepté $\alpha=0,01$, inclus dans l'analyse multicritère

*non significatif mais $p<0,25$ donc inclusion dans l'analyse multivariée

^F Variables forcées dans le premier modèle multivarié (avant simplification du modèle par la méthode automatisée)

¹ Les quatre écoles vétérinaires françaises

IDS: intradermotuberculination cervicale simple ; IDC: intradermotuberculination cervicale comparative ; ID: intradermotuberculination cervicale

Annexe 15. Résultats de la régression logistique multivariée expliquant la variable « aide à la contention »

AUC de l'analyse Roc : 0,6976 [0,6014-0,7938]_{IC95%}

	Coefficient	Écart type	Valeur p	Catégorie de référence
Constante	-0,979	0,915	0,228	/
Sexe du VS	0,868	0,523	0,0970	Femme
Proportion d'IDS parmi les ID réalisés par le VS	-0,0120	0,00639	0,0608	/
Fréquence des couloirs de contention dans les élevages de la clientèle du VS (Fréquent/Moins fréquent)	0,929	0,432	0,0314*	Moins fréquent
Rythme de dépistage dans le département	Biennal ou triennal	-1,00	1,17	Annuel
	Arrêt	-0,825	0,949	
	Zonage ⁽¹⁾	0,284	0,848	

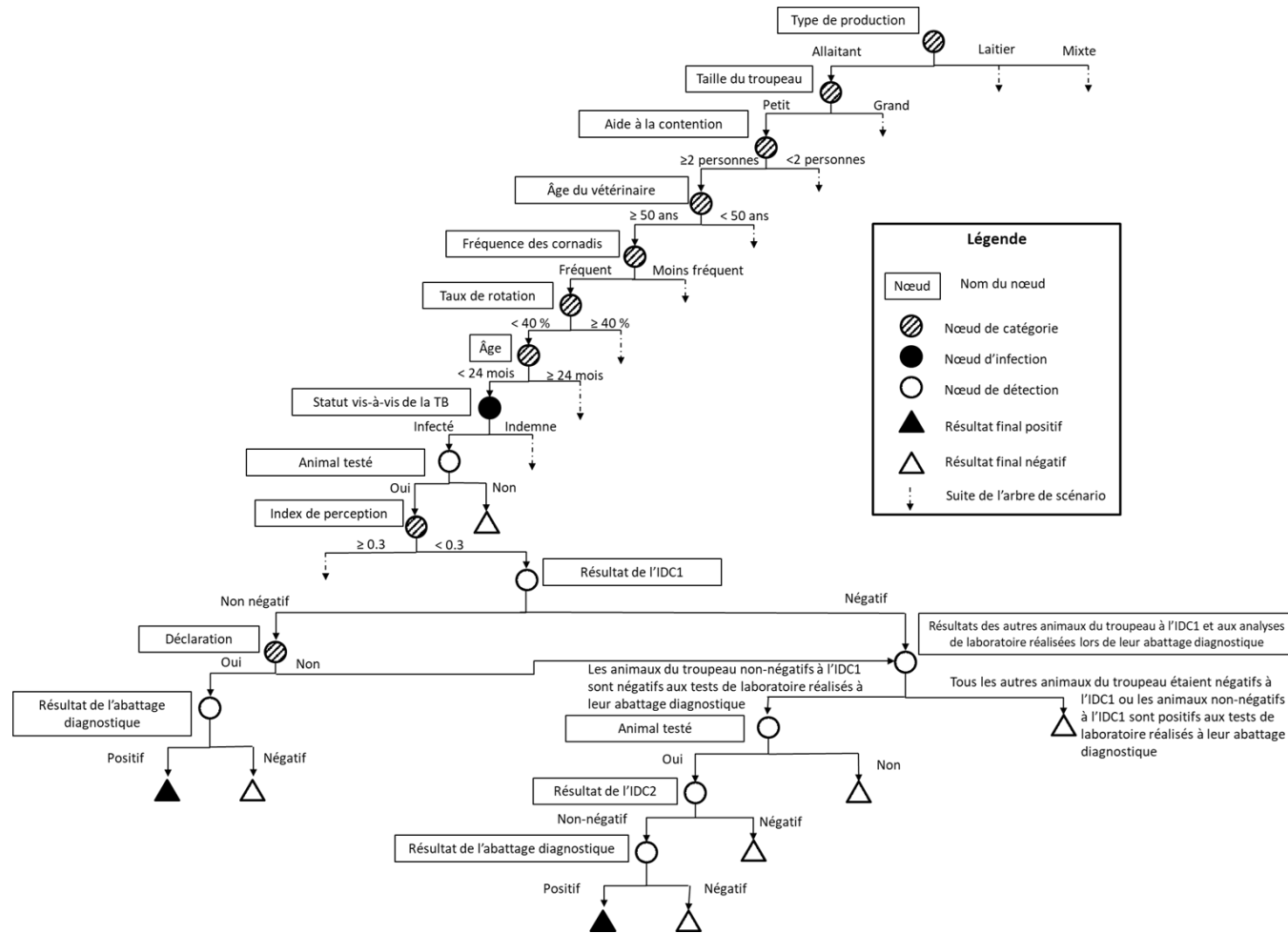
** $p<0,01$, association significative

⁽¹⁾ Les zones sont définies autour des foyers dans lesquels un dépistage annuel est effectué quel que soit le rythme de dépistage dans le reste de la zone.

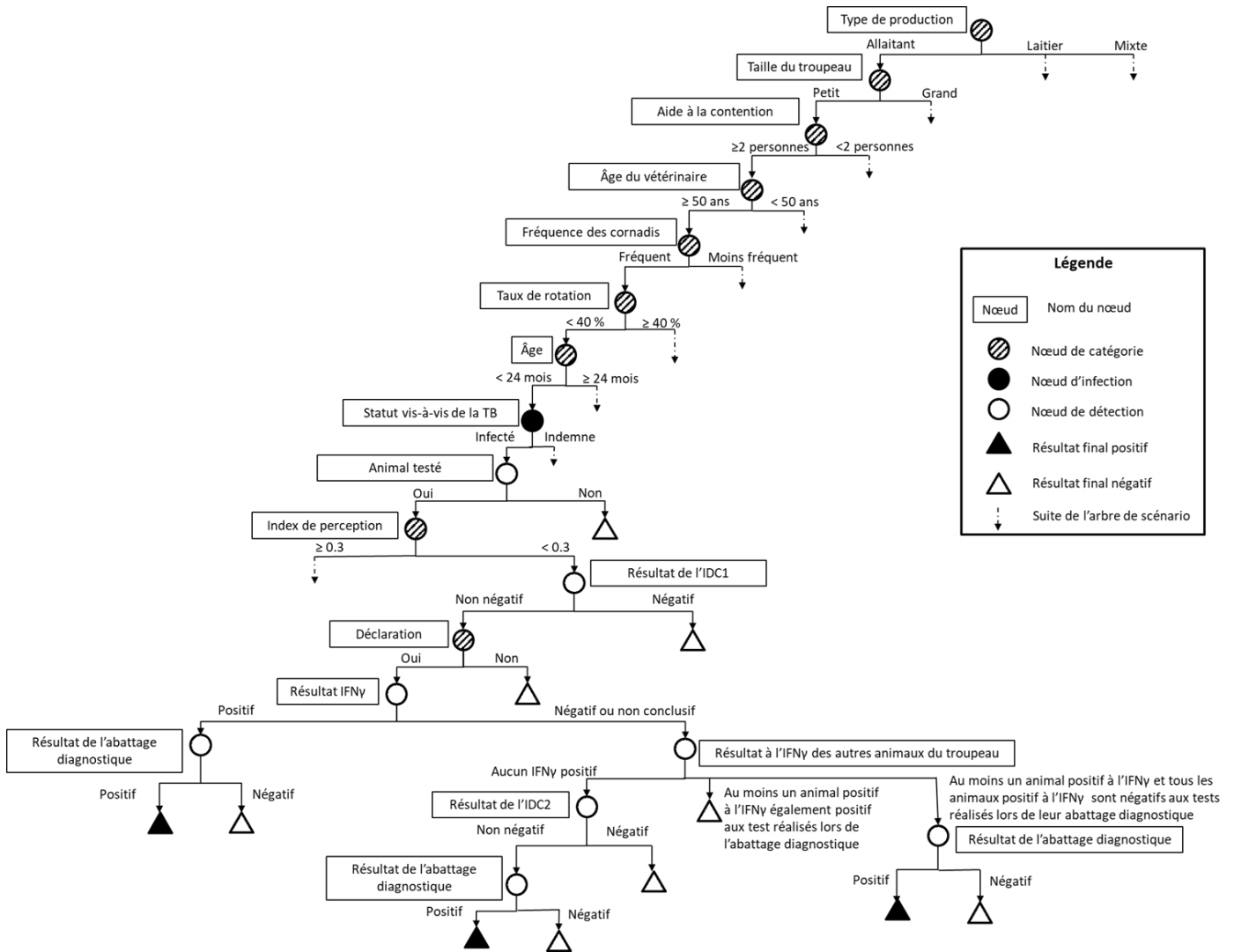
Annexe 16. Résultat des régressions logistiques univariées expliquant la fréquence des cornadis dans la clientèle du VS

Variable explicative	Valeur p	Remarque sur la variable explicative
Type de production majoritaire dans la clientèle du VS	0,63	Catégorielle (laitier / allaitant / mixte)
Taille des troupeaux de la clientèle	0,50	Continue
Rythme de dépistage maximal dans le(s) département(s) dans le(s)quel(s) exerce le VS	0,86	Catégorielle (annuel, biennal ou triennal, arrêt ou zonage)
Prévalence de la TB dans ce(s) département(s)	0,58	Catégorielle (pas infecté ou 1 à 5 foyers anciens, infecté (1 à 5 foyers récents), très infecté >10 foyers)

Annexe 17. Arbre de scénario représentant le protocole réglementaire de dépistage de la TB en élevage « abattage-recontrôle IDC » et prenant en compte les pratiques des VS



Annexe 18. Arbre de scénario représentant le protocole réglementaire de dépistage de la TB en élevage « Triage IFN » et prenant en compte les pratiques des VS



Annexe 19. Paramètres des lois de distribution bêta utilisées pour modéliser la probabilité que le VS déclare un résultat non-négatif à l'IDC en fonction des catégories de score de perception

Score de perception ⁽¹⁾	Déclaration des IDC non-négatives	a	b
<0,30	Oui	60	1
	Non	Complémentaire à 1	
≥0,30	Oui	49	6
	Non	Complémentaire à 1	

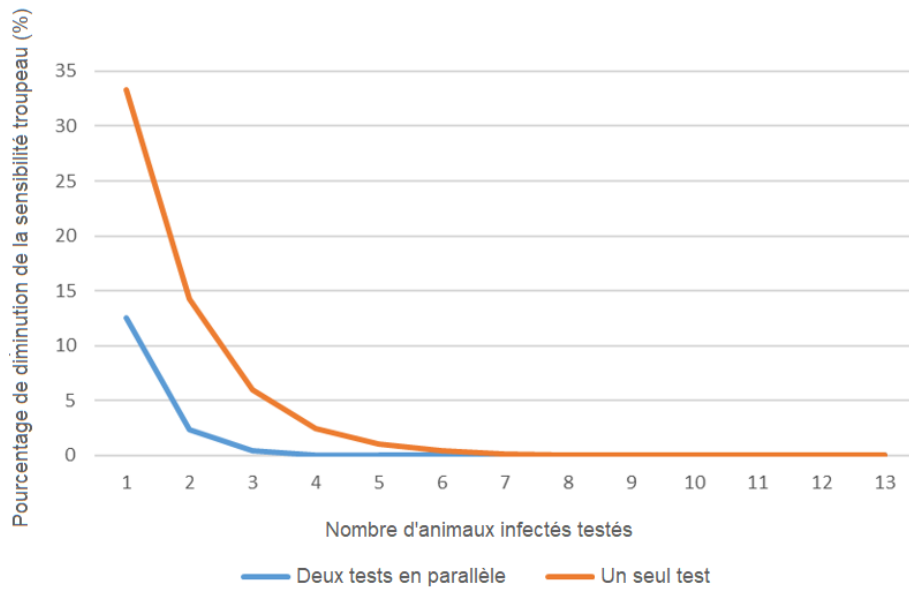
⁽¹⁾ Les catégories utilisées ont été définies à partir de la valeur moyenne du score de perception (0,303) constatée dans les données de l'enquête quantitative.

Annexes

Annexe 20. Coût moyen pour l'État et pour l'élevage de chaque protocole estimé par la méthode des arbres de scénario pour chaque type de troupeau pour un troupeau suspect jusqu'à confirmation ou infirmation de la suspicion (en euros par troupeau), en prenant en compte les pratiques des VS

Type de production	Taille	Taux de rotation	Protocole « triage IFN »		Protocole suspicion « abattage seul »		Protocole « abattage-recontrôle IDC »	
			Coût État [IC _{95%}]	Coût élevage [IC _{95%}]	Coût État [IC _{95%}]	Coût élevage [IC _{95%}]	Coût État [IC _{95%}]	Coût élevage [IC _{95%}]
Élevage laitier	petit	< 40%	596 [582-610]	855 [846-865]	1 001 [982-1 019]	962 [956-968]	1 687 [1 654-1 719]	1 600 [1 588-1 612]
		≥ 40%	252 [246-258]	1 488 [1 472-1 505]	502 [491-512]	2 343 [2 324-2 361]	787 [770-805]	4 208 [4 174-4 242]
	grand	< 40%	1 799 [1 761-1 837]	2 500 [2 465-2 535]	2 346 [2 305-2 386]	1 861 [1 850-1 873]	3 503 [3 444-3 562]	3 143 [3 121-3 165]
		≥ 40%	1 144 [1 121-1 167]	4 762 [4 691-4 833]	1 667 [1 640-1 695]	4 064 [4 033-4 094]	2 610 [2 566-2 653]	7 622 [7 563-7 680]
Élevage allaitant	petit	< 40%	224 [219-229]	549 [543-556]	3 30 [323-338]	775 [770-781]	578 [564-591]	1 405 [1 393-1 417]
		≥ 40%	165 [161-170]	1 449 [1 429-1 470]	254 [248-261]	2 507 [2 484-2 530]	430 [420-441]	5 157 [5 109-5 205]
	grand	< 40%	832 [812-852]	2 492 [2 446-2 539]	9 56 [935-977]	1 899 [1 884-1 913]	1 464 [1 434-1 493]	3 615 [3 585-3 644]
		≥ 40%	287 [280-293]	4 385 [4 309-4 461]	3 86 [378-395]	6 302 [6 242-6 363]	561 [549-573]	13 130 [13 004-13 256]
Élevage mixe	petit	< 40%	1 042 [1 017-1 068]	1 971 [1 940-2 002]	1 462 [1 432-1 492]	1 767 [1 755-1 779]	2 308 [2 262-2 354]	3 183 [3 159-3 207]
		≥ 40%	728 [709-746]	4 005 [3 938-4 073]	1 107 [1 083-1 130]	4 236 [4 202-4 269]	1 669 [1 635-1 704]	8 124 [8 059-8 189]
	grand)	< 40%	2 681 [2 621-2 742]	5 766 [5 667-5 864]	3 076 [3 015-3 138]	3 338 [3 315-3 360]	4 248 [4 166-4 329]	6 043 [5 998-6 088]
		≥ 40%	2 350 [2 297-2 404]	19 775 [19 407-20 144]	2 773 [2 718-2 828]	11 206 [11 115-11 297]	3 868 [3 792-3 943]	22 225 [22 043-22 406]

Annexe 21. Évolution du pourcentage de diminution de la sensibilité troupeau de deux protocoles : l'un utilisant un seul test, et l'autre utilisant ce même test deux fois en parallèle, en fonction du nombre d'animaux infectés avec une sensibilité initiale du test de 80 % qui est altérée pour ne valoir plus que 60 %



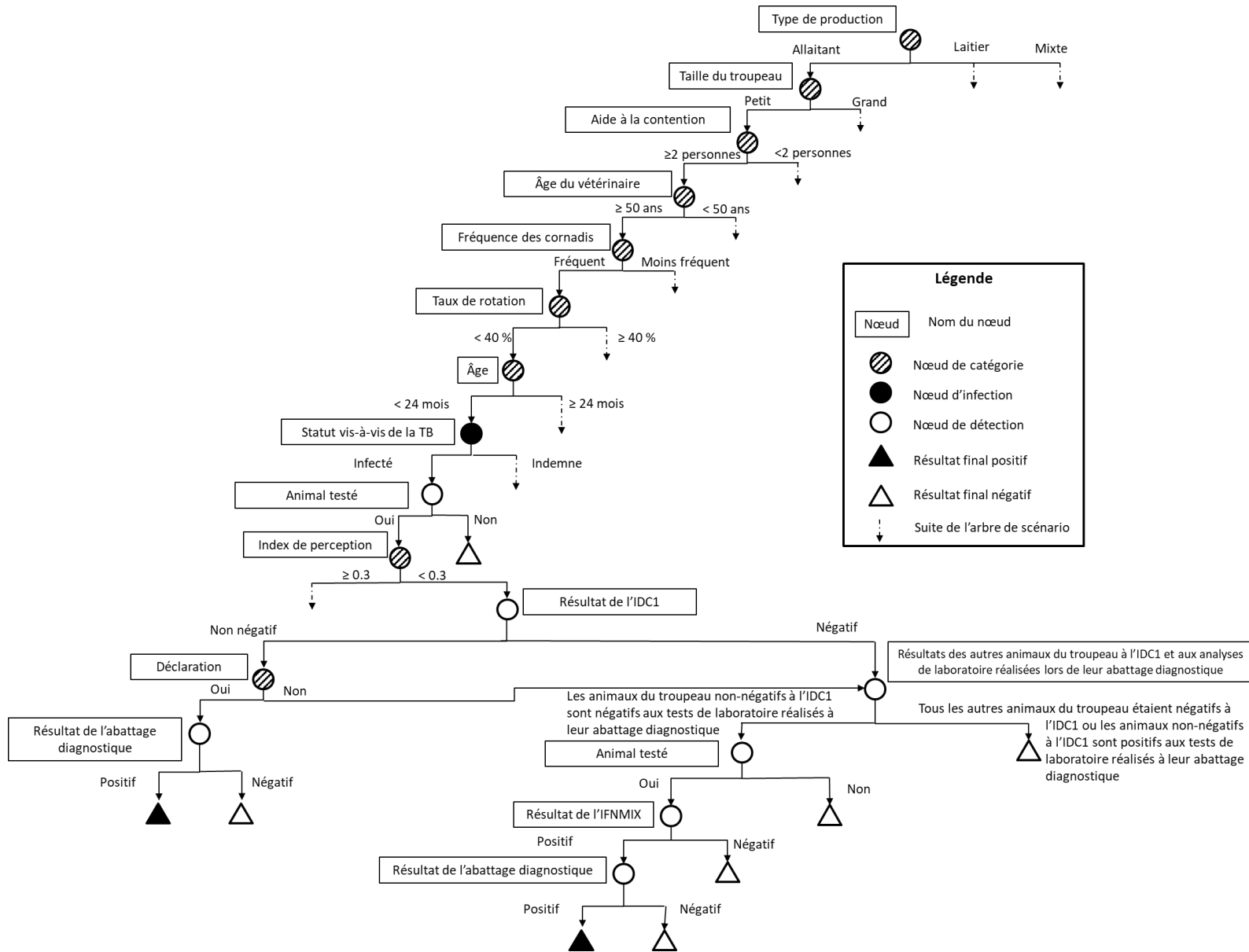
Les formules (1) et (2) ont été utilisées pour calculé le pourcentage de diminution (D) de la sensibilité troupeau pour respectivement le protocole utilisant un seul test et pour celui utilisant ce même test deux fois en parallèle, avec Se = une sensibilité initiale du test de 80 % and Se' = une sensibilité altérée du test à 60 %, et avec n le nombre d'animaux testés.

$$(1) D_{\text{seul}} = \frac{(1 - (1 - Se)^n) - (1 - (1 - Se')^n)}{1 - (1 - Se)^n}$$

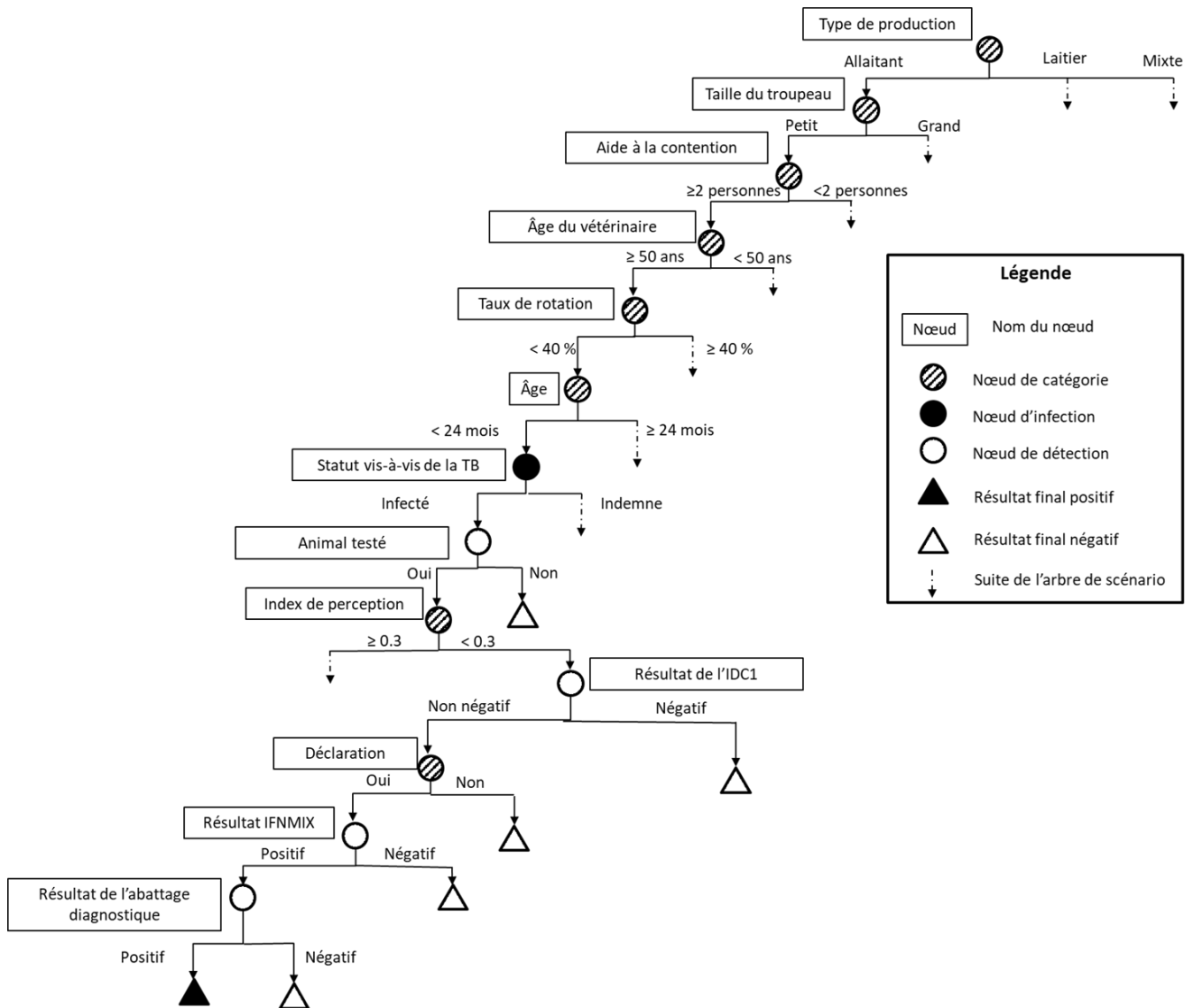
$$(2) D_{\text{parallèle}} = \frac{(1 - (1 - Se)^{2n}) - (1 - (1 - Se')^{2n})}{1 - (1 - Se)^{2n}}$$

Annexes

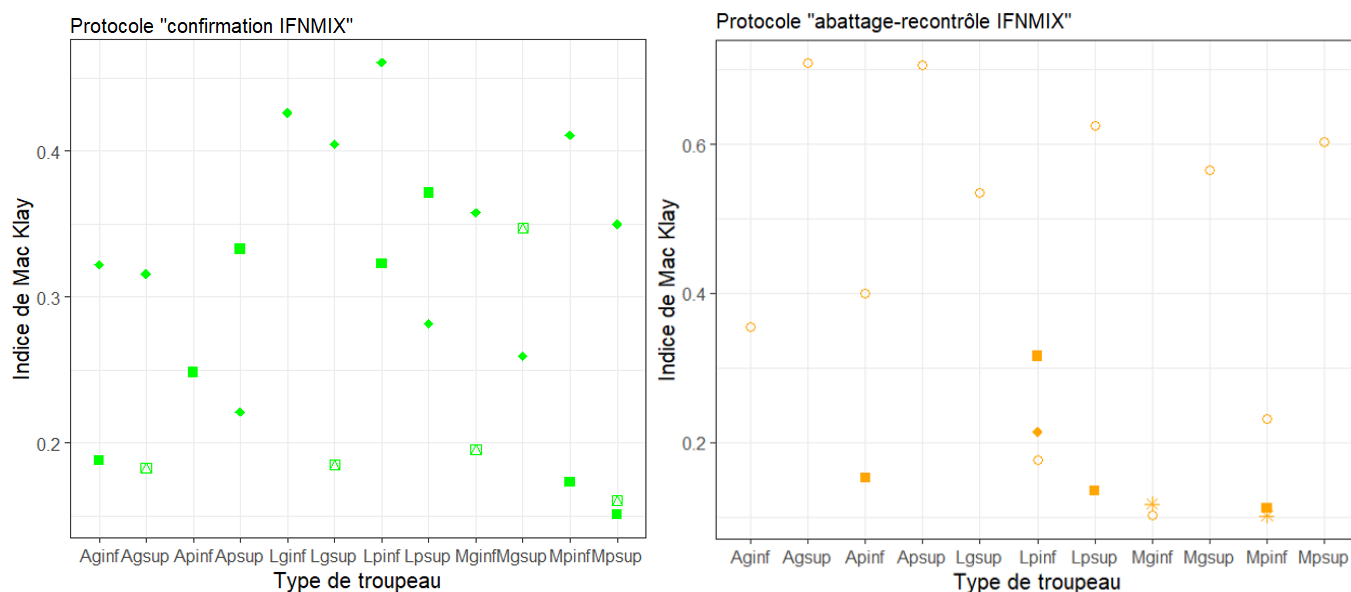
Annexe 22. Arbre de scénario représentant le protocole « abattage-recontrôle IFNMIX », alternatif au protocole « abattage-recontrôle IDC »



Annexe 23. Arbre de scénario représentant le protocole « confirmation IFNMIX », alternatif au protocole « triage IFN »



Annexe 24. Analyse de sensibilité pour la sortie "coût total" par type de troupeau et par protocole alternatif (indices de McKay supérieurs à 10 %)



Entrées : ■ Délai résultats IFN/abattage ✱ Coût d'indemnisation ○ Délai IDC1/abattage ◆ Sp IDC ■ Taille

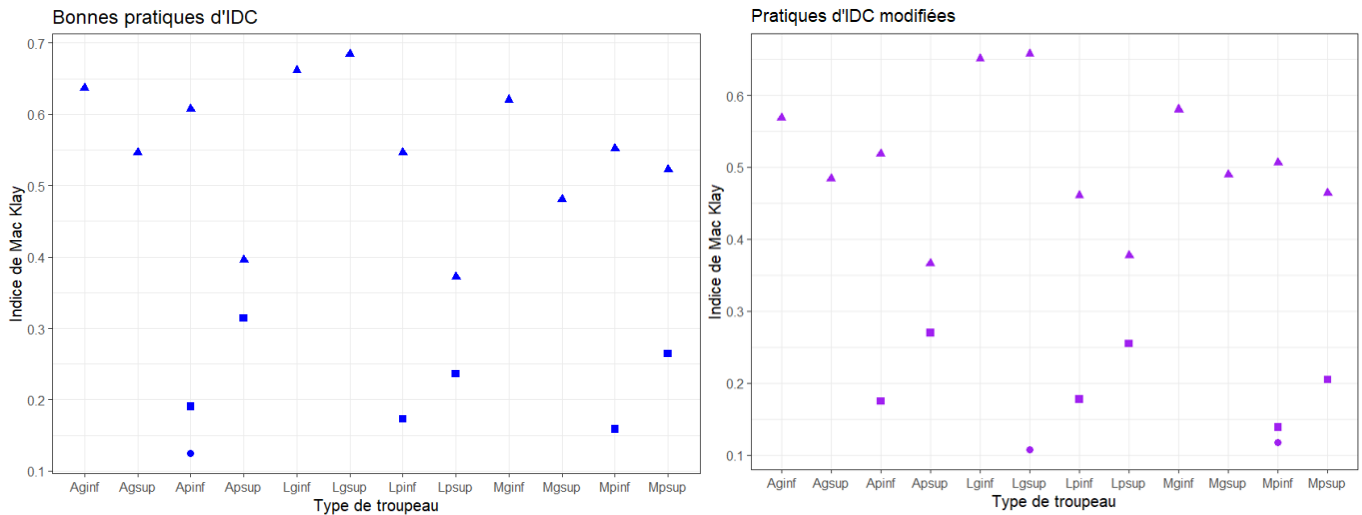
Type de troupeau : A- : allaitant ; L- : laitier ; M- : mixte ; -p- : petit ; -g- : grand ; -inf : taux de rotation inférieur à 40 % ; -sup : taux de rotation supérieur ou égal à 40 %

Légende : Taille= taille du troupeau (en nombre d'animaux), IDC1= IDC de première intention, IDC2= IDC de recontrôle

Annexe 25. Moyenne et écart type des sensibilités troupeau du protocole « abattage-recontrôle IDC » lorsqu'il est utilisé dans les protocoles d'investigation des liens aval, estimés en fonction de la présence de l'animal en lien dans l'élevage investigué et grâce à l'arbre de scénario décrit au chapitre 2 de la partie II.

Type de production	Catégorie de taille	Taux de rotation	Animal en lien présent		Animal en lien absent	
			Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
Élevage laitier	petit	< 40 %	0,474	0,074	0,398	0,098
		≥ 40 %	0,343	0,055	0,295	0,068
	grand	< 40 %	0,523	0,122	0,283	0,123
		≥ 40 %	0,437	0,090	0,269	0,101
Élevage allaitant	petit	< 40 %	0,418	0,065	0,355	0,084
		≥ 40 %	0,356	0,056	0,305	0,071
	grand	< 40 %	0,490	0,128	0,255	0,117
		≥ 40 %	0,217	0,074	0,103	0,053
Élevage mixte	petit	< 40 %	0,466	0,095	0,304	0,111
		≥ 40 %	0,412	0,080	0,293	0,099
	grand	< 40 %	0,642	0,136	0,288	0,151
		≥ 40 %	0,599	0,134	0,265	0,140

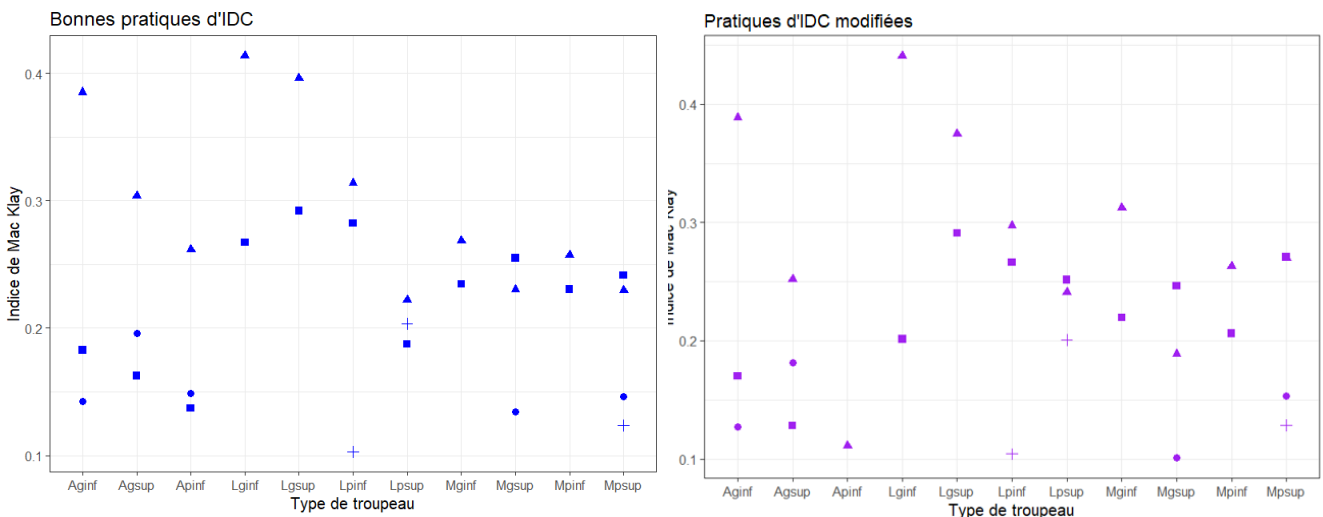
Annexe 26. Analyse de sensibilité de la sortie "sensibilité troupeau" des arbres de scénario modélisant le dépistage lors des mouvements d'animaux par IDC (indices de McKay supérieurs à 10 %)



- prévalence intra-troupeau
- ▲ proportion d'animaux vendus à d'autres élevages dans l'année
- Taille

Type de troupeau : A- : allaitant ; L- : laitier ; M- : mixte ;
 -p- : petit ; -g- : grand ; -inf : taux de rotation inférieur à 40 % ; -sup : taux de rotation supérieur ou égal à 40 %

Annexe 27. Analyse de sensibilité de la sortie « coût total dans un élevage infecté » des arbres de scénario modélisant le dépistage lors des mouvements d'animaux par IDC (indices de McKay supérieurs à 10 %)



- Coût d'indemnisation
- ▲ Proportion d'animaux vendus à d'autres élevages dans l'année
- Spécificité de l'ID
- + Taille

Type de troupeau :
 A- : allaitant ; L- : laitier ; M- : mixte ;
 -p- : petit ; -g- : grand ;
 -inf : taux de rotation inférieur à 40 % ; -sup : taux de rotation supérieur ou égal à 40 %.

Annexe 28. Tableau récapitulatif des études ayant mis en évidence une influence positive de la taille du troupeau sur sa probabilité d'être infecté par la TB.

Variable quantitative étudiée	OR	IC _{95%}	Remarques	Référence	Condition(s) de l'étude
log(taille du troupeau)	2,11	1,47-3,04	OR associé à une multiplication par 10 du nombre d'animaux	Ramírez-Villaescusa <i>et al.</i> , 2010	Royaume-Uni, dans les zones avec de fortes prévalences
Taille du troupeau	2,059	1,84-2,31	Comparaison des troupeaux de 11 à 100 animaux par rapport aux troupeaux avec au maximum 10 animaux	Bessell <i>et al.</i> , 2012	Dans les zones à fort risque
Nombre moyen d'animaux recodé en binaire : élevages grand /petit	1,99	1,45-2,72	Taille de l'élevage (grand/petit) défini selon la taille médiane des élevages de chaque type soit 76 bovins (tout âge) en allaitant et 256 en laitier	Martínez-López <i>et al.</i> , 2014	Espagne, dans les zones à forte prévalence (>3 %)
Taille du troupeau > 144	3,4	1,-6,1	Associé avec la probabilité qu'au moins un animal soit non-négatif à l'ID	Griffin <i>et al.</i> , 1996	Dans les zones à fort risque
Taille du troupeau	1,07	1,04-1,10	Pour chaque augmentation de 10 animaux	Broughan <i>et al.</i> , 2016	Analyse multivariée dans les zones où la TB émerge (Royaume-Uni)
log(taille du troupeau)	4,44	3,29-5,95	« augmentation du risque d'être un cas de TB par un facteur de 4,4 à chaque multiplication par 10 de la taille du troupeau »	Porphyre <i>et al.</i> , 2008	Nouvelle Zélande, modèle multivarié, zone à fort risque
log(taille du troupeau)	5,0	1,6-15,7		Reilly et Courtenay, 2007	Royaume-Uni, analyse multivariée
Taille du troupeau	<16	Référence	-	Munroe <i>et al.</i> , 1999	Canada, un élevage positif : élevage avec un animal positif en culture
	16-35	2,9	0,96-9,03		
	36-80	5,8	1,9-17,1		
	>80	9,3	3,2-27,6		

Annexe 29. Détail des prévalences fixées dans chaque département pour l'évaluation globale du système de surveillance ante mortem de la TB

Code Insee du département	Nom du département	Nombre de foyers entre 2011 et 2016	Incidence apparente en 2016	Prévalence utilisée dans la modélisation
01	Ain	[0 - 5[	0	0,0001
02	Aisne	[0 - 5[	0	0,0001
03	Allier	[0 - 5[	0	0,0001
04	Alpes-de-Haute-Provence	[0 - 5[	0	0,0001
05	Hautes-Alpes	[0 - 5[	0	0,0001
06	Alpes-Maritimes	[0 - 5[	0	0,0001
07	Ardèche	[0 - 5[	0	0,0001
08	Ardennes	10 et plus	0	0,006
09	Ariège	[5 - 10[	0	0,0002
10	Aube	[0 - 5[	0	0,0001
11	Aude	[0 - 5[	0	0,0001
12	Aveyron	[0 - 5[	0	0,0001
13	Bouches-du-Rhône	[0 - 5[	0,003676471	0,0001
14	Calvados	[0 - 5[	0,000246245	0,0001
15	Cantal	[0 - 5[	0	0,0001
16	Charente	10 et plus	0,003453039	0,006
17	Charente-Maritime	[5 - 10[	0	0,0002
18	Cher	[0 - 5[	0	0,0001
19	Corrèze	[0 - 5[	0	0,0001
2A	Corse-du-Sud	[0 - 5[	0	0,0001
2B	Haute-Corse	10 et plus	0,012965964	0,006
21	Côte-d'Or	10 et plus	0,006896552	0,006
22	Cotes-d'Armor	[0 - 5[	0	0,0001
23	Creuse	[0 - 5[	0	0,0001
24	Dordogne	10 et plus	0,005494505	0,006
25	Doubs	[0 - 5[	0	0,0001
26	Drome	[0 - 5[	0	0,0001
27	Eure	[0 - 5[	0	0,0001
28	Eure-et-Loir	[0 - 5[	0,002061856	0,0001
29	Finistère	[0 - 5[	0	0,0001
30	Gard	[0 - 5[	0,003344482	0,0001
31	Haute-Garonne	[0 - 5[	0	0,0001
32	Gers	[5 - 10[	0,000566251	0,0002
33	Gironde	[0 - 5[	0	0,0001
34	Hérault	[5 - 10[	0	0,0002
35	Ille-et-Vilaine	[0 - 5[	0	0,0001
36	Indre	[0 - 5[	0	0,0001
37	Indre-et-Loire	[0 - 5[	0	0,0001
38	Isère	[0 - 5[	0	0,0001
39	Jura	[0 - 5[	0	0,0001
40	Landes	10 et plus	0,010466223	0,006
41	Loir-et-Cher	[0 - 5[	0	0,0001
42	Loire	[5 - 10[	0	0,0002
43	Haute-Loire	[0 - 5[	0	0,0001

Code Insee du département	Nom du département	Nombre de foyers entre 2011 et 2016	Incidence apparente en 2016	Prévalence utilisée dans la modélisation
44	Loire-Atlantique	[0 - 5[	0	0,0001
45	Loiret	[0 - 5[	0	0,0001
46	Lot	[0 - 5[	0	0,0001
47	Lot-et-Garonne	10 et plus	0,003531073	0,006
48	Lozère	[0 - 5[	0	0,0001
49	Maine-et-Loire	[0 - 5[	0	0,0001
50	Manche	[5 - 10[	0,000273299	0,0002
51	Marne	[0 - 5[	0	0,0001
52	Haute-Marne	[0 - 5[	0	0,0001
53	Mayenne	[5 - 10[	0	0,0002
54	Meurthe-et-Moselle	[0 - 5[	0	0,0001
55	Meuse	[0 - 5[	0	0,0001
56	Morbihan	[0 - 5[	0	0,0001
57	Moselle	[0 - 5[	0	0,0001
58	Nièvre	[0 - 5[	0	0,0001
59	Nord	[0 - 5[	0	0,0001
60	Oise	[0 - 5[	0	0,0001
61	Orne	[0 - 5[	0	0,0001
62	Pas-de-Calais	[0 - 5[	0,000291036	0,0001
63	Puy-de-Dôme	[0 - 5[	0	0,0001
64	Pyrénées-Atlantiques	10 et plus	0,003022222	0,006
65	Hautes-Pyrénées	[0 - 5[	0	0,0001
66	Pyrénées-Orientales	[0 - 5[	0	0,0001
67	Bas-Rhin	[0 - 5[	0	0,0001
68	Haut-Rhin	[0 - 5[	0	0,0001
69	Rhône + métropole de Lyon	[0 - 5[	0	0,0001
70	Haute-Saône	[0 - 5[	0	0,0001
71	Saône-et-Loire	[0 - 5[	0	0,0001
72	Sarthe	[0 - 5[	0	0,0001
73	Savoie	[0 - 5[	0	0,0001
74	Haute-Savoie	[0 - 5[	0	0,0001
75	Paris	[0 - 5[	0	0,0001
76	Seine-Maritime	[5 - 10[	0	0,0002
77	Seine-et-Marne	[0 - 5[	0	0,0001
78	Yvelines	[0 - 5[	0	0,0001
79	Deux-Sèvres	[5 - 10[	0	0,0002
80	Somme	[0 - 5[	0	0,0001
81	Tarn	[0 - 5[	0	0,0001
82	Tarn-et-Garonne	[0 - 5[	0	0,0001
83	Var	[0 - 5[	0	0,0001
84	Vaucluse	[0 - 5[	0	0,0001
85	Vendée	[0 - 5[	0	0,0001
86	Vienne	[0 - 5[	0	0,0001
87	Haute-Vienne	[5 - 10[	0,001068376	0,0002
88	Vosges	[0 - 5[	0	0,0001
89	Yonne	[0 - 5[	0	0,0001

Code Insee du département	Nom du département	Nombre de foyers entre 2011 et 2016	Incidence apparente en 2016	Prévalence utilisée dans la modélisation
90	Territoire de Belfort	[0 - 5[	0	0,0001
91	Essonne	[0 - 5[	0	0,0001
92	Hauts-de-Seine	[0 - 5[	0	0,0001
93	Seine-Saint-Denis	[0 - 5[	0	0,0001
94	Val-de-Marne	[0 - 5[	0	0,0001
95	Val-d'Oise	[0 - 5[	0	0,0001

Annexe 30. Déduction d'une modélisation de la sensibilité et la spécificité brute de l'IDC à partir de données françaises

Aucune information sur la sensibilité et la spécificité brute de l'IDC n'était disponible dans la littérature scientifique. En effet, toutes les estimations de sensibilité et de spécificité de l'IDC disponibles avaient été réalisées avec une interprétation stricte des résultats du test (c'est-à-dire en considérant les résultats douteux comme des résultats positifs) puisque c'est ainsi qu'est utilisé le test sur le terrain. Pour estimer la sensibilité et la spécificité brute de l'IDC, nous avons donc utilisé une base de données française contenant le détail des résultats des tests de dépistage (ID1 et, quand ils avaient été réalisés, IFN γ , ID2 et résultats des analyses de laboratoire suite à l'abattage diagnostique) de 14 270 bovins provenant pour 61 % d'entre eux d'élevages de Dordogne en suivi renforcé et pour 37 % provenant du protocole IFN γ (protocole mis en place pour évaluer la sensibilité et la spécificité du test IFN γ sur le terrain) ; recueillis entre 2013 et 2015 (2 % d'enregistrements provenaient d'élevages foyers). Cette base de données nous a permis d'estimer la proportion de résultats douteux à l'IDC de première intention parmi les résultats non-négatifs (positifs ou douteux), en fonction du statut infectieux du bovin (confirmé infecté ou non confirmé infecté suite à l'abattage diagnostique). Parmi les animaux confirmés infectés et aillant obtenu un résultat non-négatif à la première IDC, 42 % avaient obtenu des résultats douteux. Parmi les animaux non confirmés infectés (donc supposé indemnes) et aillant obtenu un résultat non-négatif à la première IDC, 84 % avaient obtenu des résultats douteux. En arrondissant ces pourcentages respectivement à 40 % et 85 %, nous en avons déduit une modélisation de la sensibilité brute (équation a.) et de la spécificité brute de l'IDC (équation b et c.) de première intention.

$$a. Se_{IDC\text{ brute}} = p(IDC + | \text{infecté}) = Se_{IDC} * (1-0,40) \Rightarrow \boxed{Se_{IDC\text{ brute}} = Se_{IDC} * 0,60}$$

$$b. p(IDC+ | \text{indemne}) = (1-Sp_{IDC}) * (1-0,85) = (1-Sp_{IDC}) * 0,15 \Leftrightarrow 1 - Sp_{IDC\text{ brute}}$$

$$\Rightarrow c. \boxed{Sp_{IDC\text{ brute}} = 1 - [(1 - Sp_{IDC}) * 0,15]}$$

où Se_{IDC} et Sp_{IDC} sont respectivement la sensibilité et la spécificité de l'IDC de première intention avec une interprétation stricte telle que décrite dans la littérature scientifique et modélisées par des lois de distribution normales asymétriques : respectivement $N_{\text{asym}}(\text{min}=0,43 ; \text{moyenne}=0,74 ; \text{max}=0,95)$ et $N_{\text{asym}}(\text{min}=0,80 ; \text{moyenne}=0,99 ; \text{max}=1)$, bornées entre 0 et 1 (II. 2.2.1.5.1).

Annexe 31. Méthode d'estimation des probabilités d'obtention d'un résultat positif ou négatif dans un élevage pour chacun des protocoles réglementaires de dépistage périodique en élevage, conditionnellement aux résultats de l'IDC de première intention

➤ **Résultats de l'investigation par le protocole « abattage-recontrôle IDC » conditionnellement à l'obtention d'au moins une IDC1 positive**

À chaque itération du modèle, les nombres de résultats positifs à l'IDC1 chez les animaux infectés (nb_I_IDC+) et chez les animaux indemnes (nb_NI_IDC+) étaient calculés pour chaque type de troupeau à partir de la taille du troupeau (N), de la prévalence intra-troupeau (pr_{intra}) et des sensibilité et spécificité brutes de l'IDC ($Se_{IDC\ brute}$ et $Sp_{IDC\ brute}$), comme présenté ci-dessous.

D'après le théorème de Bayes, la probabilité qu'un animal soit infecté (I) sachant qu'il est positif à l'IDC ($p(I | IDC+)$) vérifie l'égalité (a)

$$(a) \quad p(I | IDC+) = \frac{p(IDC+|I)*p(I)}{p(IDC+)} = \frac{Se_{IDC\ brute}*pr_{intra}}{p(IDC+|I)*p(I)+p(IDC+|NI)*p(NI)}$$

$$\Rightarrow p(I | IDC+) = \frac{Se_{IDC\ brute}*pr_{intra}}{Se_{IDC\ brute}*pr_{intra}+(1-Sp_{IDC\ brute})*(1-pr_{intra})}$$

De plus, la probabilité qu'un animal soit non-infecté (NI) sachant qu'il est positif à l'IDC vérifie l'égalité (b).

$$(b) \quad p(NI | IDC+) = 1 - p(I | IDC+)$$

Les nombres d'animaux infectés et indemnes présentant une IDC1 positive étaient calculés à chaque itération du modèle, en forçant l'obtention d'au moins un animal IDC1 positif (partie soulignée des équations suivantes) selon les équations (c) et (d) pour les élevages infectés et (e) pour les élevages indemnes où $anxsup24m$ est la proportion d'animaux de plus de 24 mois dans l'élevage considéré et $taux\ IDC$ est la proportion des animaux destinés à être testés en IDC1 qui le sont effectivement.

$$(c) \quad Nb_I_IDC+_{\text{élevage infecté}} = \underline{p(I|IDC+)*1} + (N * pr_{intra} * anxsup24m * taux\ IDC - \underline{p(I|IDC+)*1}) * Se_{IDC\ brute} * anxsup24m * taux\ IDC$$

$$(d) \quad Nb_NI_IDC+_{\text{élevage infecté}} = \underline{p(NI|IDC+)*1} + (N * (1-pr_{intra}) * anxsup24m * taux\ IDC - \underline{p(NI|IDC+)*1}) * (1-Sp_{IDC\ brute})$$

$$(e) \quad Nb_NI_IDC+_{\text{élevage indemne}} = \underline{1} + (N * anxsup24m * taux\ IDC - \underline{1}) * (1-Sp_{IDC\ brute})$$

La sensibilité et la spécificité du protocole « abattage-recontrôle IDC » conditionnelle à l'obtention d'au moins une IDC positive était ensuite calculées à chaque itération, à partir de l'arbre de scénario précédemment construit et présenté en 3.3.3, dans lequel le nombre d'animaux obtenant une IDC positive était fixé d'après les valeurs calculées précédemment (équations (c), (d), (e)).

➤ **Résultats des protocoles « abattage seul » et « triage IFN » conditionnellement à l'obtention d'au moins une IDC1 non-négative mais d'aucune IDC1 positive**

La sensibilité et la spécificité de ces deux protocoles conditionnellement à l'obtention d'au moins une IDC1 non-négative mais d'aucune IDC1 positive étaient calculées, à chaque itération, à partir des arbres de scénario correspondants décrits dans la partie 3.3.3 dans lesquels la sensibilité et la spécificité de l'IDC1 était remplacé respectivement par la probabilité pour un animal infecté d'obtenir un résultat douteux sachant qu'il n'a pas obtenu de résultat positif ($p(IDC\ dtx | IDC\ pas\ positif)_{\text{animal infecté}}$, calculée selon l'équation (f)) et par la probabilité pour un animal indemne d'obtenir un résultat négatif sachant qu'il n'a pas obtenu de résultat positif ($p(IDC\ négatif | IDC\ pas\ positif)_{\text{animal indemne}}$, calculé selon l'équation (h)).

Annexes

$$(f) \quad p(\text{IDC dtx} | \text{IDC pas positif})_{\text{animal infecté}} = \frac{p(\text{IDC non positif} | \text{IDC dtx}) * p(\text{IDC douteux})}{p(\text{IDC non positif})}$$

$$p(\text{IDC dtx} | \text{IDC pas positif})_{\text{animal infecté}} = \frac{1 * (SeIDC * 0,4)}{1 - SeIDC_{brute}} = \frac{1 * SeIDC * 0,4}{1 - SeIDC * 0,6}$$

$$(g) \quad p(\text{IDC dtx} | \text{IDC pas positif})_{\text{animal indemne}} = \frac{p(\text{IDC non positif} | \text{IDC dtx}) * p(\text{IDC douteux})}{p(\text{IDC non positif})}$$

$$p(\text{IDC dtx} | \text{IDC pas positif})_{\text{animal indemne}} = \frac{1 * (1 - SpIDC) * 0,85}{SpIDC_{brute}} = \frac{1 * (1 - SpIDC) * 0,85}{1 - (1 - SpIDC) * 0,15}$$

$$(h) \quad p(\text{IDC négatif} | \text{IDC pas positif})_{\text{animal indemne}} = 1 - p(\text{IDC dtx} | \text{IDC pas positif})$$

Annexe 32. Valeurs moyennes de chaque critère utilisé dans l'analyse multicritère permettant de comparer les protocoles de dépistage périodique en élevage dans les départements de Dordogne, Nièvre, Maine-et-Loire et Manche.

Tableau A. Valeurs moyennes de chaque critère utilisé dans l'analyse multicritère, pour chaque protocole comparé, en Dordogne

Protocole	Sensibilité (%)	Spécificité (%)	Animaux abattus "pour rien" (%)	Coût (€/troupeau)		Difficulté de mise en œuvre		Difficulté de gestion administrative DDPP
				État	Élevage	VS	Éleveur	
IDS1 - abattage seul	32	72,74	3,98	1 192	1 164	1,80	1,69	3,04
IDS1-triage IFN	30	72,76	3,05	986	1 617	1,85	1,99	3,23
IDS1-abattage-recontrôle IDC	35	72,74	5,05	1 786	2 306	3,51	4,36	4,97
IDS1-abattage-recontrôle IFNMIX	41	72,78	12,41	4 755	4 102	1,80	4,54	4,07
IDS1-confirmation IFNMIX	27	72,79	0,70	305	386	1,80	1,85	3,06
IDC1 - abattage seul	28	63,95	2,99	892	1424	1,80	2,80	3,03
IDC1-triage IFN	27	63,93	2,12	700	1647	1,87	3,02	3,17
IDC1-abattage-recontrôle IDC	31	63,94	3,78	1 389	2 538	2,76	5,50	4,98
IDC1-abattage-recontrôle IFNMIX	38	63,90	10,42	4 166	4 368	1,80	5,69	4,07
IDC1-confirmation IFNMIX	23	63,91	0,53	229	592	1,80	2,92	3,04

Tableau B. Valeurs moyennes de chaque critère utilisé dans l'analyse multicritère, pour chaque protocole comparé, dans la Nièvre

Protocole	Sensibilité (%)	Spécificité (%)	Animaux abattus "pour rien" (%)	Coût (€/troupeau)		Difficulté de mise en œuvre		Difficulté de gestion administrative DDPP
				État	Élevage	VS	Éleveur	
IDS1 - abattage seul	33	81,90	3,29	1 305	1 435	2,00	3,00	1,03
IDS1-triage IFN	32	81,91	0,18	1 327	2 342	2,00	3,02	1,01
IDS1-abattage-recontrôle IDC	35	81,91	0,29	1 845	2 962	3,00	6,99	4,00
IDS1-abattage-recontrôle IFNMIX	40	81,90	0,73	7 722	5 494	2,00	6,99	3,00
IDS1-confirmation IFNMIX	28	81,87	0,04	507	517	2,00	3,01	1,01
IDC1 - abattage seul	30	73,83	2,47	975	1 674	1,00	4,00	2,02
IDC1-triage IFN	28	73,78	0,13	951	2 141	1,00	4,02	2,01
IDC1-abattage-recontrôle IDC	32	73,84	0,22	1 437	3 166	2,00	7,99	5,00
IDC1-abattage-recontrôle IFNMIX	38	73,85	0,62	6 960	5 735	1,00	7,99	4,00
IDC1-confirmation IFNMIX	25	73,85	0,03	381	658	1,00	4,01	2,00

Annexes

Tableau C. Valeurs moyennes de chaque critère utilisé dans l'analyse multicritère, pour chaque protocole comparé, dans la Manche

Protocole	Sensibilité (%)	Spécificité (%)	Animaux abattus "pour rien" (%)	Coût (€/troupeau)		Difficulté de mise en œuvre		Difficulté de gestion administrative DDPP
				État	Élevage	VS	Éleveur	
IDS1 - abattage seul	31	79,35	3,43	2 209	1 396	2,00	3,15	0,03
IDS1-triage IFN	30	79,36	6,86	1 798	2 169	2,45	3,83	0,30
IDS1-abattage-recontrôle IDC	33	79,40	11,32	3 178	2 660	3,77	6,70	2,82
IDS1-abattage-recontrôle IFNMIX	39	79,32	28,52	8 640	4 427	3,77	4,92	0,29
IDS1-confirmation IFNMIX	26	79,37	1,58	516	551	2,23	3,38	0,02
IDC1 - abattage seul	27	70,48	2,59	1 647	1 610	2,00	4,00	1,03
IDC1-triage IFN	26	70,44	4,86	1 264	2 038	2,34	4,51	1,22
IDC1-abattage-recontrôle IDC	30	70,49	8,55	2 439	2 841	3,83	7,66	3,87
IDC1-abattage-recontrôle IFNMIX	36	70,46	23,96	7 516	4 642	3,83	5,83	1,24
IDC1-confirmation IFNMIX	23	70,51	1,19	385	673	2,17	4,17	1,01

Tableau D. Valeurs moyennes de chaque critère utilisé dans l'analyse multicritère, pour chaque protocole comparé, en Maine-et-Loire

Protocole	Sensibilité (%)	Spécificité (%)	Animaux abattus "pour rien" (%)	Coût (€/troupeau)		Difficulté de mise en œuvre		Difficulté de gestion administrative DDPP
				État	Élevage	VS	Éleveur	
IDS1 - abattage seul	29	77,02	3,28	1 571	1 446	3,50	0,77	2,07
IDS1-triage IFN	28	77,04	3,90	1 340	2 072	3,76	1,01	2,53
IDS1-abattage-recontrôle IDC	31	77,03	6,48	2 322	2 751	7,24	1,81	4,99
IDS1-abattage-recontrôle IFNMIX	37	77,01	16,49	7 179	5 005	3,50	1,71	6,07
IDS1-confirmation IFNMIX	24	77,04	0,90	456	474	3,50	0,88	2,28
IDC1 - abattage seul	26	68,21	2,54	1 202	1 639	4,00	1,82	2,05
IDC1-triage IFN	25	68,23	2,83	978	1 953	4,20	1,95	2,41
IDC1-abattage-recontrôle IDC	28	68,21	5,01	1 824	2 908	7,80	4,29	5,00
IDC1-abattage-recontrôle IFNMIX	34	68,20	13,98	6 311	5 201	4,00	3,34	6,08
IDC1-confirmation IFNMIX	22	68,21	0,70	350	595	4,00	1,87	2,21

Annexe 33. Questionnaire à destination des directeurs de GTV afin d'estimer la difficulté de réalisation de chaque test de dépistage de la TB du point de vue des VS



Questionnaire à l'intention du président du
GTV

Difficulté de mise en oeuvre des tests de dépistage de la tuberculose bovine en élevage pour les vétérinaires

Dans le cadre d'un travail sur les protocoles de dépistage périodique et d'investigation des suspicions de tuberculose bovine prenant en compte de nombreux autres critères (efficacité, rapport coût-bénéfice, acceptabilité par les éleveurs...), nous souhaiterions comparer les différents protocoles sur le critère de leur facilité de mise en oeuvre pour le vétérinaire. Pour cela, nous avons besoin de votre vision globale de l'avis des vétérinaires de votre département afin d'obtenir estimation globale de la difficulté de réalisation de chacun des tests de dépistage existant.

Pour commencer, indiquez s'il-vous-plait le département dans lequel vous travaillez

Nous souhaiterions recueillir des informations nous permettant d'estimer l'avis des vétérinaires de votre département sur la difficulté que présente pour eux la mise en oeuvre des trois tests (intradermotuberculination simple (IDS), intradermotuberculination comparative (IDC) et test de dosage de l'interféron gamma) sur le terrain.

Exprimez s'il vous plaît votre degré d'accord/de désaccord avec les 3 affirmations suivantes selon le type d'élevage (taille et type de production) :

En général, du point de vue des vétérinaires de votre département, la réalisation du dépistage par IDS est facile pour eux

	Tout à fait d'accord	D'accord	Neutre	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Petit Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

En général, du point de vue des vétérinaires de votre département, la réalisation du dépistage par IDC est facile pour eux

	Tout à fait d'accord	D'accord	Neutre	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Petit Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

En général, du point de vue des vétérinaires de votre département, la réalisation du test interféron est facile pour eux

	Tout à fait d'accord	D'accord	Neutre	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Petit Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Commentaires libres

Pour soumettre vos réponses, n'oubliez pas de cliquer sur le bouton de validation en bas à droite !

Annexe 34. Questionnaire à destination des chefs de bureau santé animale des DDPP afin de fixer les seuils de certains critères et d'estimer la difficulté de gestion administrative de chaque test de dépistage de la TB du point de vue des DDPP



Questionnaire à l'intention du chef de bureau santé animale – développement d'un outil de comparaison multicritère pour la surveillance de la tuberculose bovine en France



Questionnaire à l'intention du chef de bureau santé animale – développement d'un outil de comparaison multicritère pour la surveillance de la tuberculose bovine en France

Dans le cadre d'un travail de comparaison multicritère des protocoles de dépistage périodique et d'investigation des suspicions de tuberculose bovine prenant en compte de nombreux critères (efficacité, rapport coût-bénéfice, acceptabilité des éleveurs...), pour pouvoir comparer les protocoles selon les critères choisis, nous avons besoins de définir, pour chaque critère, les valeurs de différence entre deux protocoles comparés à partir desquelles nous allons considérer :

1. que cette différence est non négligeable
2. que cette différence est très importante.

Nous avons de votre avis afin de définir au mieux ces valeurs pour certains des critères choisis.

Pour commencer, indiquez s'il vous plaît le département dans lequel vous travaillez

L'élevage moyen de votre département

Dans un premier temps, nous souhaiterions connaître les caractéristiques d'un élevage bovin moyen de votre département. Nous souhaitons obtenir ainsi une vision globale des élevages bovins de votre département.

Type de production

Choisissez le type de production majoritaire en nombre de cheptel

Taille

Le seuil permettant la distinction petit/grand est d'environ 70 animaux de plus de 24 mois pour les élevages laitiers et allaitants et 120 pour les élevages mixtes.

Taux de rotation

Le seuil permettant la distinction faible/fort taux de rotation est le seuil réglementaire de 40%.

Contexte économique

Race majoritaire des animaux

Moyens de contention généralement disponibles

Indiquez le moyen de contention généralement disponible dans les élevages du type de production majoritaire

Docilité des animaux

Mauvaise Excellente

Commentaires libres

Valeur de la différence entre deux protocoles comparés selon un critère unique

Par "protocole de dépistage", nous entendons l'ensemble composé : du dépistage périodique dans l'élevage et des éventuelles investigations complémentaires mises en œuvre en cas de suspicion d'infection.

La sensibilité d'un protocole (en %) correspond à sa capacité à détecter et à confirmer l'infection des élevages ; elle est exprimée par la probabilité de détecter l'infection dans un élevage infecté. Pour la tuberculose, la sensibilité moyenne des protocoles a été estimée à environ 30% pour tous protocoles et tous types d'élevage confondus.

À votre avis, à partir de quelle valeur de différence de sensibilité entre deux protocoles peut-on considérer que cette différence est non négligeable ? C'est-à-dire que si vous deviez comparer ces deux protocoles selon ce seul critère, vous les considéreriez comme non équivalents.

0 100

À votre avis, à partir de quelle valeur de différence de sensibilité entre deux protocoles peut-on considérer que cette différence est très importante ? C'est-à-dire que si vous deviez choisir entre les deux protocoles selon ce seul critère, à partir de quelle valeur différence de sensibilité entre les protocoles, préféreriez très fortement le protocole le plus sensible ?

0 100

Commentaires libres

Les animaux abattus « pour rien » dans un élevage correspondent aux animaux abattus pour abattage diagnostique (donc pour réaliser des analyses de laboratoire complémentaires afin de statuer sur leur statut infectieux) et pour lesquels le résultat de laboratoire va revenir négatif, diminuant ainsi la confiance de l'éleveur dans le dispositif.

À votre avis, à partir de combien d'animaux abattus "pour rien" de différence entre deux protocoles peut-on considérer que cette différence est non négligeable ? C'est-à-dire que si vous deviez comparer les deux protocoles selon ce seul critère, vous les considéreriez comme non équivalents.

0 10

À votre avis, à partir de combien d'animaux abattus "pour rien" de différence peut-on considérer que deux protocoles sont très différents ? C'est-à-dire que si vous deviez choisir entre les deux protocoles selon ce seul critère, à partir de combien d'animaux abattus "pour rien" de différence entre les protocoles auriez vous une préférence très forte pour le protocole causant le moins d'animaux abattus "pour rien" ?



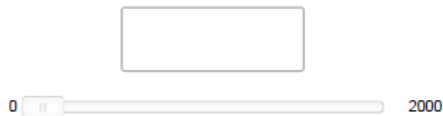
Commentaires libres

Le coût pour l'État (en €/troupeau) du dépistage de la tuberculose dans un élevage prend en compte le coût des éventuelles intradermo-tuberculinations de recontrôle, le coût des analyses de laboratoire et le coût de l'indemnisation des éleveurs pour les animaux abattus en vue de la réalisation d'analyses de laboratoire (abattage diagnostique). En moyenne, le coût d'un protocole de dépistage de la tuberculose est de **2 300€/troupeau pour l'État**.

À votre avis, à partir de quelle valeur de différence de coût pour l'État entre deux protocoles peut-on considérer que cette différence est non négligeable ? C'est-à-dire que si vous deviez comparer les deux protocoles selon ce seul critère, vous les considéreriez comme non équivalents.



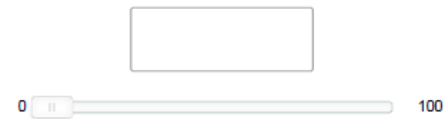
À votre avis, à partir quelle valeur de différence de coût pour l'État entre deux protocoles peut-on considérer que cette différence est très importante ? C'est-à-dire que si vous deviez choisir entre deux protocoles selon ce seul critère, à partir de quelle différence de coût entre les protocoles auriez vous une préférence très forte pour le protocole le moins cher.



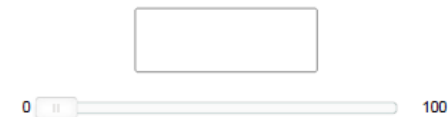
Commentaires libres

Le nombre d'élevages faussement positifs correspond au nombre de troupeaux indemnes qui vont être, à tort, suspectés infectés de tuberculose bovine.

À votre avis, à partir de combien d'élevages faussement positifs de différence entre deux protocoles peut-on considérer que cette différence est non négligeable ? C'est-à-dire que si vous deviez comparer les deux protocoles selon ce seul critère, vous les considéreriez comme non équivalents.



À votre avis, à partir de combien d'élevage faussement positif de différence entre deux protocoles peut-on considérer que cette différence est très importante ? C'est-à-dire que si vous deviez choisir entre les deux protocoles selon ce seul critère, à partir de combien d'élevages faussement positifs de différence entre les protocoles auriez vous une préférence très forte pour le protocole générant le moins d'élevages faussement positifs.



Commentaires libres



Questionnaire à l'intention du chef de bureau santé animale – développement d'un outil de comparaison multicritère pour la surveillance de la tuberculose bovine en France

Pour soumettre vos réponses, n'oubliez pas de cliquer sur le bouton de validation en bas à droite !

Facilité de gestion de la mise en place de tests de dépistage de la tuberculose bovine en élevage

L'objectif des questions suivantes est d'évaluer, du point de vue de la DDPP, la facilité de gestion (complexité administrative du suivi des élevages) des tests de dépistage de la tuberculose bovine en élevage, réalisés dans un contexte de dépistage périodique et/ou d'investigation d'une suspicion suite à un dépistage périodique. Nous souhaitons connaître cette facilité de réalisation dans l'absolu, dans le contexte de votre département mais indépendamment du nombre de cheptels suspects. En effet, cette notion de quantité sera prise en compte dans un second temps.

Exprimez s'il vous plaît votre degré d'accord/de désaccord avec les sept affirmations suivantes :

	Tout à fait d'accord	D'accord	Neutre	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
En général, la gestion du dépistage par IDS est facile pour la DDPP	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
En général, la gestion du dépistage par IDC est facile pour la DDPP	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
En général, la gestion du recontrôle par IDC d'un élevage suspect suite au dépistage périodique en élevage est facile pour la DDPP	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
En général, la gestion du recontrôle par le test de dosage de l'interféron gamma d'un élevage suspect suite au dépistage périodique en élevage est facile pour la DDPP	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
En général, la gestion du recontrôle par IDC des quelques animaux non-négatifs aux premiers tests de dépistage est facile pour la DDPP	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
En général, la gestion du recontrôle par le test de dosage de l'interféron gamma des quelques animaux non-négatifs aux premiers tests de dépistage est facile pour la DDPP	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
En général, la gestion de l'abattage diagnostique d'un animal suspect est facile pour la DDPP	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Commentaires libres

Annexe 35. Questionnaire à destination des directeurs de GDS afin de fixer les seuils de certains critères et d'estimer la difficulté de gestion pratique de chaque test de dépistage de la TB du point de vue des éleveurs



Questionnaire à l'intention du président du GDS



Questionnaire à l'intention du président du GDS

Dans le cadre d'un travail sur les protocoles de dépistage périodique et d'investigation des suspicions de tuberculose bovine prenant en compte de nombreux autres critères (efficacité, rapport coût-bénéfice...), nous souhaiterions comparer les différents protocoles sur le critère de leur acceptabilité par les éleveurs. Pour approcher cette acceptabilité, nous avons à notre disposition, pour chaque protocole, le coût moyen supporté par l'élevage ainsi que le pourcentage d'animaux abattus « pour rien ».

Pour pouvoir comparer les protocoles selon ces variables, nous avons besoin de définir les valeurs de différence entre deux protocoles comparés à partir desquelles nous allons considérer :

1. que cette différence est non négligeable
2. que cette différence est très importante.

Nous avons besoin de votre connaissance globale des éleveurs de votre département afin de définir au mieux ces valeurs.

Pour commencer, indiquez s'il-vous-plaît le département dans lequel vous travaillez

L'élevage moyen de votre département

Dans un premier temps, nous souhaiterions connaître les caractéristiques d'un élevage bovin moyen de votre département. Nous souhaitons obtenir ainsi une vision globale des élevages bovins de votre département.

Type de production

Choisissez le type de production majoritaire en nombre de cheptel

Taille

Le seuil permettant la distinction petit/grand est d'environ 70 animaux pour les élevages laitiers et allaitants et 120 pour les élevages mixtes

Taux de rotation

Le seuil permettant la distinction faible/fort taux de rotation est de 40 %

Contexte économique

Race majoritaire des animaux

Moyens de contention généralement disponibles

Indiquez le moyen de contention généralement disponible dans les élevages du type de production majoritaire

Docilité des animaux

Mauvaise Excellente

Commentaires libres



Questionnaire à l'intention du président du GDS

Valeur de la différence entre deux protocoles comparés selon un critère unique

Le coût pour l'éleveur (en euros par troupeau), que nous avons estimé pour chaque protocole de dépistage à comparer, prend en compte :

- le coût des intradermo-tuberculinations du dépistage périodique
- les coûts indirects induits par le blocage de l'élevage et l'interdiction de la vente des animaux et de leurs produits en cas de suspicion.

En moyenne, le coût d'un protocole de dépistage de la tuberculose est de 2 300 €/troupeau pour l'élevage.

D'après votre connaissance globale des élevages de votre département, à partir de quelle valeur de différence de coût entre deux protocoles peut-on considérer que cette différence est non négligeable ? C'est-à-dire que si un éleveur moyen de votre département devait comparer les deux protocoles selon ce seul critère, il les considérerait comme non équivalents.

0 2300

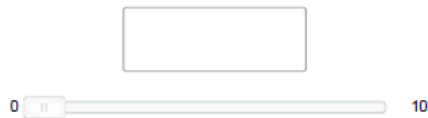
D'après votre connaissance globale des élevages de votre département, à partir de quelle valeur de différence de coût entre deux protocoles peut-on considérer que cette différence est très importante ? C'est-à-dire que si un éleveur moyen de votre département devait choisir entre les deux protocoles selon ce seul critère, à partir de quelle différence de coût entre les protocoles, aurait-il une préférence très forte pour le protocole le moins cher ?



Commentaires libres

Les animaux abattus « pour rien » dans un élevage correspondent aux animaux abattus pour abattage diagnostique (donc pour réaliser des analyses de laboratoires complémentaires afin de statuer sur leur statut infectieux) et pour lesquels le résultat de laboratoire va revenir négatif, diminuant ainsi la confiance de l'éleveur dans le dispositif.

D'après votre connaissance globale des élevages de votre département, à partir d'une différence de combien d'animaux abattus « pour rien » dans un élevage peut-on considérer la différence est non négligeable ? C'est-à-dire que si un éleveur moyen de votre département devait comparer les deux protocoles selon ce seul critère, il les considérerait comme non équivalents.



D'après votre connaissance globale des élevages de votre département, à partir d'une différence de combien d'animaux abattus « pour rien » dans un élevage peut-on considérer que deux protocoles sont très différents ? C'est-à-dire que si un éleveur moyen de votre département devait choisir entre les deux protocoles selon ce seul critère, à partir de combien d'animaux abattus "pour rien" de différence entre les protocoles, aurait-il une préférence très forte pour le protocole causant le moins d'animaux abattus « pour rien » ?



Commentaires libres



Questionnaire à l'intention du président du GDS

Contraintes des tests de dépistage de la tuberculose bovine en élevage pour les éleveurs

Nous souhaiterions à présent recueillir des informations nous permettant d'estimer l'avis des éleveurs de votre département sur la difficulté que présente pour eux la mise en œuvre des trois tests (intrademotuberculination simple (IDS), intrademotuberculination comparative (IDC) et test de dosage de l'interféron gamma) sur le terrain.

Exprimez s'il vous plaît votre degré d'accord/de désaccord avec les 3 affirmations suivantes et selon le type d'élevage (taille et type de production) :

En général, du point de vue des éleveurs de votre département, la réalisation du dépistage par IDS est peu contraignant pour eux

	Tout à fait d'accord	D'accord	Neutre	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Petit Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

En général, du point de vue des éleveurs de votre département, la réalisation du dépistage par IDC est peu contraignant pour eux

	Tout à fait d'accord	D'accord	Neutre	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Petit Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

En général, du point de vue des éleveurs de votre département, la réalisation du test interféron est peu contraignant pour eux

	Tout à fait d'accord	D'accord	Neutre	Pas d'accord	Pas du tout d'accord
Petit Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Laitier	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Allaitant	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Petit Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Grand Mixte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Commentaires libres

Pour soumettre vos réponses, n'oubliez pas de cliquer sur le bouton de validation en bas à droite !

Annexe 36. Extrait des trois premières questions (3/28) du questionnaire à destination des chefs de service adjoint santé animale des DDPP permettant de déterminer les poids des critères



Questionnaire à l'intention du chef de bureau santé animale – développement d'un outil d'aide à la décision multicritère pour la surveillance de la tuberculose bovine en France

Ce questionnaire a pour but de déterminer vos préférences relatives entre huit critères qui peuvent être utilisés pour classer les protocoles de dépistage périodique de la tuberculose bovine en élevage (un protocole = dépistage périodique + investigations en cas de suspicion). Pour cela, sélectionnez s'il-vous-plait, **en cliquant dessus**, le choix que vous feriez dans chacun des 28 cas présentés ci-dessous.

Ces cas s'appliquent dans le contexte suivant : vous utilisez habituellement un **protocole initial** ayant les caractéristiques décrites ci dessous. Il ne vous est plus possible d'appliquer ce protocole et vous avez à présent le **choix entre le protocoles a et b**. Quel protocole choisiriez-vous dans le contexte actuel de votre département ?

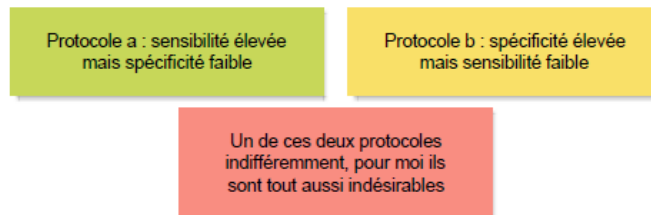
Par exemple pour le cas 1, vous utilisiez un protocole avec une sensibilité et une spécificité élevées, vous ne pouvez plus appliquer ce protocole et devez choisir entre le protocole a qui a une sensibilité élevée mais une spécificité faible et le protocole b qui a une sensibilité faible mais une spécificité élevée.

Nous savons qu'il y a beaucoup de questions (28 exactement) mais toutes ont leur importance ! Merci par avance de votre investissement dans ce projet.

Pour commencer, indiquez s'il vous plait le département dans lequel vous travaillez

Cas 1 :

Protocole initial = **sensibilité élevée et spécificité élevée**



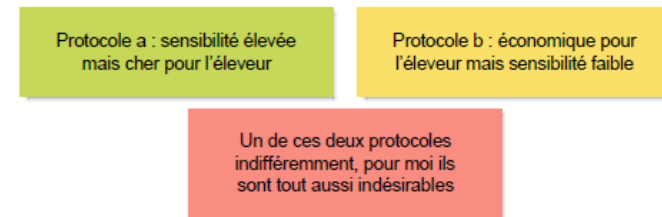
Rappel de la signification des termes utilisés :

Sensibilité = capacité du protocole à détecter l'infection dans un élevage.

Spécificité = capacité du protocole à ne pas entrainer de suspicion dans un élevage indemne.

Cas 2 :

Protocole initial = **sensibilité élevée et économique pour l'éleveur**



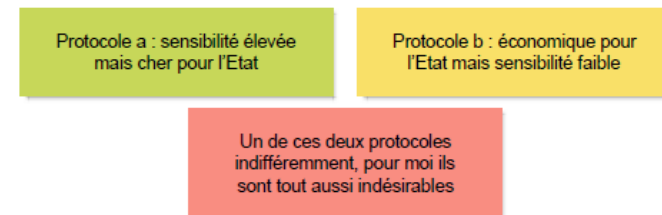
Rappel de la signification des termes utilisés :

Sensibilité = capacité du protocole à détecter l'infection dans un élevage.

Coût pour l'éleveur = coût du protocole pris en charge par l'éleveur (cela comprend le coût du dépistage périodique ainsi que les coûts indirects liés au blocage de l'élevage empêchant la commercialisation des animaux et de leur produits).

Cas 3 :

Protocole initial = **sensibilité élevée et économique pour l'Etat**



Rappel de la signification des termes utilisés :

Sensibilité = capacité du protocole à détecter l'infection dans un élevage.

Coût pour l'Etat = coût du protocole pris en charge par l'Etat (cela comprend les IDC de recontrôle, les analyses de laboratoire ainsi que l'indemnisation des animaux subissant un abattage diagnostique).

Titre : Étude des freins épidémiologiques, économiques et sociologiques à l'éradication de la tuberculose bovine en France

Mots clés : surveillance, tuberculose bovine, coût-efficacité, arbre de scénario, aide à la décision multicritère, analyse socio-économique

En France, malgré les mesures de contrôle, l'incidence de la tuberculose bovine (TB) se rapproche de la limite permettant le maintien du statut officiellement indemne du pays, qui facilite les exportations de bovins vivants. Ce travail visait à identifier les freins épidémiologiques et socio-économiques à l'éradication de la TB en France, via l'évaluation coût-efficacité des composantes du dispositif de surveillance ante mortem (s.a.m.), et l'identification de protocoles de dépistage optimaux dans un contexte épidémiologique et socio-économique donné. Une modélisation stochastique par arbre de scénario a été utilisée pour évaluer les protocoles réglementaires des composantes de la s.a.m. (dépistage périodique, enquêtes épidémiologiques et dépistage aux mouvements), et les comparer en terme de coût-efficacité. Deux approches originales ont ensuite été utilisées : (i) la prise en compte de pratiques de terrain (réalisation des tests et perception de la

surveillance) dans l'évaluation quantitative d'un système de surveillance, particulièrement importante pour la TB ; (ii) l'utilisation d'un outil d'aide à la décision multicritère permettant l'intégration de critères très différents pour faciliter et rationaliser la prise de décision dans un contexte multifactoriel. Ainsi, nous avons pu identifier les aspects de la s.a.m. à améliorer pour assurer son efficacité et sa pérennité (durée de blocage des élevages suspects, pratiques de l'intradermotuberculination comparative (IDC)). Nous avons mis en évidence l'intérêt d'un protocole de dépistage alternatif potentiellement plus acceptable, dans lequel l'IDC de recontrôle pratiquée dans les élevages suspects est remplacée par un test interféron gamma (antigène MIX). Des recommandations ont été proposées pour simplifier la s.a.m. (arrêt du dépistage aux mouvements) et pour le choix des protocoles au meilleur équilibre coût/efficacité/acceptabilité.

Title : Study of epidemiologic, economic and sociological barriers to the eradication bovine tuberculosis in France

Key words: surveillance, bovine tuberculosis, cost-effectiveness, scenario tree, multicriteria decision aid, socio-economic analysis.

Despite control measures, the incidence of bovine tuberculosis (bTB) in France is getting closer to the limit allowing the officially free status facilitating the export of living cattle. Our work aimed at identifying the epidemiological and socio-economical barriers to bTB eradication *via* the cost-effectiveness evaluation of the components of the *ante mortem* surveillance (*a.m.s*), and at identifying the screening protocols best fitting a given epidemiological and socio-economical context. Stochastic scenario tree modelling was used to evaluate the mandatory protocols of the three components of the *a.m.s* (periodic screening, epidemiological investigations and screening of the exchanged animals) and to compare them in terms of cost-effectiveness. Then, two novel approaches were used: (i) the consideration of field practices (test's realisation, perception of surveillance) in the quantitative evaluation of a surveillance system,

which is particularly important for bTB; (ii) the use of a multi-criteria decision aid tool that allows the integration of very different criteria to facilitate and rationalise decision making in a multifactorial context. Thus, we were able to identify the aspects of bTB *a.m.s* that need to be improved to ensure its efficiency and sustainability (lockdown's duration for a suspect herd, intradermal cervical comparative tuberculin testing (ICCT) practices). We underlined the potential interest of the use of alternative protocol improving surveillance's acceptability by replacing the ICCT used to recontrol animals of a suspect herd by interferon testing (antigen MIX). We produced recommendations on the simplification of the *a.m.s* system (stop screening exchanged animals) and on the choice of protocols with the best balance effectiveness/cost/acceptability.