



Mémoire pour l'obtention du

**Certificat d'Etudes Approfondies Vétérinaires en Santé
Publique Vétérinaire**

Evaluation de stratégies d'assainissement d'un troupeau infecté de tuberculose bovine par abattage partiel

Mission réalisée du 13 Mars au 28 Juillet à l'Anses de Maisons-Alfort, Unité EPI

sous la responsabilité de Aurélie Courcoul (Anses, LSAn, EPI) et Benoît Durand (Anses, LSAn, chef d'unité EPI)

Hélène Ladreyt

Inspectrice élève de la santé publique vétérinaire

1^{ère} année

Remerciements

A mes maîtres de stage Aurélie et Benoit pour m'avoir accueillie et guidée pendant ce stage. Ces 5 mois ont été pour moi une expérience si enrichissante tant sur le plan professionnel qu'humain, et cela grâce à votre disponibilité, votre soutien et votre sourire.

A Mathile Saccareau pour m'avoir tant aidé à me familiariser au dark monde du code...soit pour m'avoir aidé à coder TOUS les indicateurs ! Ta part dans ce travail est juste énorme. Merci pour ta patience, ton temps...et pour les pancakes délicieux !

A toute l'équipe EPI : Benoit, Aurélie, Maud et Gina pour faire de l'unité EPI un lieu si accueillant, agréable et formateur pour les petits stagiaires. Je vous dis à très très bientôt 😊 Mathilde, Noémie, Cassandre, Alpha, Malika, Giséla, Camille pour votre accueil et les liens d'amitié que l'on a tissé si rapidement, on se revoit bientôt autour d'une bière (et d'un coca). Bref, un stage de rêve !

A Julie Rivière pour m'avoir mis en contact avec Aurélie et Benoit pour ce stage, merci !

Table des matières

Liste des abréviations	4
Liste des figures	4
Liste des tableaux	6
Introduction	8
Partie I : la tuberculose bovine, état des lieux	9
1) Généralités sur la tuberculose bovine	9
a. Pathogénie	9
b. Le statut officiellement indemne.	9
c. Une situation épidémiologique variable selon les régions dans l'UE et en France	10
d. Faune sauvage	11
2) Gestion de la tuberculose bovine et évolutions	11
a. Surveillance	11
b. Gestion des suspicions	12
c. Assainissement : de l'abattage total à l'abattage partiel.	13
3) L'abattage partiel	13
a. Elevages éligibles : mesures à mettre en place	14
b. Tests ante-mortem utilisés :	14
c. Tests post-mortem utilisés	17
d. Organisation des contrôles	18
e. Abattage des animaux	18
f. Contrôle défavorable	18
g. Contrôle favorable et requalification	19
h. L'abattage partiel, observations terrain	19
4) Les différents coûts liés à l'assainissement : une première motivation au passage à l'abattage partiel	21
a. Coûts pour l'éleveur	21
b. Frais de laboratoires et vétérinaires pris en charge par l'Etat	23
c. Conclusion	23
5) Bilan : problématique et objectifs du mémoire	23
Partie II : Matériel et méthode	25
1) Modèle	25
a. La modélisation en épidémiologie	25
b. Le modèle utilisé (Bekara, 2014) et sa mise à jour	26

2) Les protocoles de surveillance et d'assainissement, paramètres du modèle	30
a. Surveillance	30
b. Assainissement.....	31
3) Plan d'expérience	33
4) Indicateurs calculés	34
a. Point de vue de l'épidémiologiste : l'efficacité	34
b. Point de vue de l'Etat : les coûts.....	34
c. Point de vue de l'éleveur : l'acceptabilité	37
d. Calcul des indicateurs pour chaque scénario.....	38
5) Analyse des résultats.....	38
Partie III : Résultats	38
1) Suspicion forte	38
a. Valeurs des indicateurs calculés	38
b. Représentation graphique de trois indicateurs clé.....	41
c. Classement des scénarios selon les trois indicateurs clé	42
2) Suspicion Faible.....	43
a. Valeurs des indicateurs calculés	43
b. Représentation graphique de trois indicateurs clé.....	45
c. Classement des scénarios selon les trois indicateurs clé	46
3) Différences majeures suspicion forte / suspicion faible	46
Partie IV : Discussion et perspectives	47
1) Résultats clés.....	47
a. Bilan.....	47
b. Premiers éléments de validation des résultats.....	48
2) Méthodologie.....	49
a. Intérêts de la modélisation.....	49
b. Limites du modèle	50
3) Perspectives	51
a. Multi-Criteria Decision Analysis.....	51
b. Valeur prédictive des caractéristiques des troupeaux observés avant une requalification	51
Recommandations : conclusion	52
Bibliographie	53
Annexes	56

Liste des abréviations

OIE : Organisation mondiale de la santé animale

OI : Officiellement indemne

DGAL : Direction générale de l'alimentation

DD(cs)PP : Direction départementale (de la cohésion sociale et) de la protection des populations

NS : Note de service

AM : Arrêté ministériel

APMS : Arrêté préfectoral de mise sous surveillance

APDI : Arrêté préfectoral portant déclaration d'infection

AD : Abattage diagnostic

AS : Abattage sanitaire

IDS : Intra-dermotuberculation simple

IDC : Intra-dermotuberculation comparée

IFG : Interféron γ

PCR : Polinuclear Chain Reaction

VMO : valeur marchande objective

FMSE : Fonds national agricole de mutualisation du risque sanitaire et environnemental

Liste des figures

Figure 1 : Evolution de la prévalence et de l'incidence de la tuberculose bovine de 1995 à 2014 (Cavalerie et al. 2014)	10
Figure 2 : Distribution par commune des foyers incidents de tuberculose bovine en France de 2000 à 2014 (Cavalerie et al. 2014).....	10
Figure 3 : Rythmes de dépistage prophylactique de la tuberculose bovine par département en 2014 (Cavalerie et al. 2014)	11
Figure 4 : Etapes de la gestion des suspicions de tuberculose bovine en France (Arrêté ministériel du 15 Septembre 2003).....	13
Figure 5: Lieu d'injection de la tuberculine pour une IDS (Source : GDS 18)	15
Figure 6 : Lieux d'injection des tuberculines pour une IDC (GDS 18).....	15
Figure 7 : Représentation schématique des réponses du système immunitaire bovin aux différents tests ante mortem utilisés en tuberculose (de la Rua-Domenech et al. 2006).....	17
Figure 8 : Protocole d'abattage partiel (NS DGAL/SDSPA 2014-541).....	19
Figure 9 : Répartition des modalités d'assainissement utilisées dans les différents départements entre les 04/07/2014 et le 18/01/2017 (Poirier 2017)	20
Figure 10 : Exemple d'un modèle à trois compartiments S (Sensible), E (Infecté mais non infectieux) et I (Infectieux)	26
Figure 11 : Bilan du fonctionnement du modèle (d'après Bekara 2014)	28
Figure 12 : Déroulement des mesures de gestion	30
Figure 13 : Protocoles de surveillance modélisés (d'après NS DGAL/SDSPA 2016-1001)	31
Figure 14 : Bilan des 11 protocoles d'abattage partiel modélisés	33
Figure 15 : Plan d'expérience suivi	33
Figure 16 : Illustration des différents nombres d'animaux abattus et des différentes durées	37
Figure 17 : Efficacité des scénarios impliquant la suspicion forte en fonction de leur coût global et le pourcentage d'abandon	42
Figure 18 : Efficacité des scénarios impliquant la suspicion faible en fonction de leur coût global et le pourcentage d'abandon	45

Liste des tableaux

Tableau 1 : Eléments de contexte aidant à l'évaluation du niveau de suspicion	12
Tableau 2 : Résultats de l'IDS (Bénet et al. 2017)	14
Tableau 3 : Résultats de l'IDC (Bénet et al. 2017).....	15
Tableau 4 : Grille d'interprétation des résultats du test à l'IFG (Boschioli 2014, Anses)	16
Tableau 5 : Sensibilités et spécificités des tests utilisées dans le modèle	29
Tableau 6 : Bilan des paramètres fixés	29
Tableau 7 : Montant moyen calculé des indemnités par classe d'âge	35
Tableau 8 : Prix des actes vétérinaires et analyses laboratoires utilisés.....	36
Tableau 9 : Indicateurs d'efficacité pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion forte »	39
Tableau 10 : Indicateurs de coûts pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion forte »	39
Tableau 11 : Indicateurs d'acceptabilité pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion forte »	40
Tableau 12 : Classement des scénarios en fonction des trois indicateurs clé.....	42
Tableau 13 : Indicateurs d'efficacité pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion faible »	43
Tableau 14 : Indicateurs de coûts pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion faible »	44
Tableau 15 : Indicateurs d'acceptabilité pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion faible »	44
Tableau 16 : Classement des scénarios en fonction des trois indicateurs clé.....	46

Introduction

La tuberculose bovine est une maladie infectieuse due à *Mycobacterium bovis* ou *Mycobacterium caprae*, transmissible par contacts étroits et répétés avec un individu infectieux (voie aérienne) mais aussi par voie indirecte, la bactérie étant résistante dans le milieu extérieur. Même si tous les mammifères y sont sensibles, elle touche préférentiellement les bovins. D'évolution chronique et à l'origine de tuberculose en général extra-pulmonaire chez l'homme, cette zoonose ne provoque que très rarement des signes cliniques chez les bovins domestiques. Si les cas humains de tuberculose d'origine animale sont extrêmement rares dans l'hémisphère nord et concernent exclusivement les éleveurs depuis la mise en place de la pasteurisation du lait, elle est encore d'actualité et fréquente dans certains pays en voie de développement (O'Reilly et Daborn 1995).

L'importance économique et l'aspect zoonotique de la tuberculose bovine justifient son inscription au rang des maladies réglementées en tant que danger sanitaire de catégorie 1 (Arrêté ministériel du 29 Juillet 2013). La France est reconnue officiellement indemne de tuberculose bovine par la Commission Européenne depuis 2001 (Décision 2001/26/CE) mais ce statut, essentiel pour les échanges commerciaux, est menacé par la recrudescence de la maladie dans les élevages depuis 2004.

La surveillance et le contrôle de la tuberculose bovine sont centrés sur le dépistage (à l'abattoir et en élevage) et l'assainissement des troupeaux détectés infectés. Ces mesures de surveillance et de contrôle sont basées sur des protocoles différents en fonction de la situation épidémiologique, de la zone géographique et de l'élevage. Le traitement et la vaccination des animaux sont interdits dans les pays indemnes pour préserver l'efficacité des rares traitements disponibles pour l'homme et pour pouvoir détecter facilement les animaux infectés (NS DGAL/SDSPA 2016-1001). Les méthodes d'assainissement ont évolué en France depuis les années 50 pour aboutir en 1999 à l'obligation de l'abattage total des cheptels dans lesquels l'infection était confirmée (Arrêté ministériel du 15 Septembre 2003). Ces mesures ont permis l'éradication quasi complète de la maladie sur le territoire français faisant chuter la prévalence de 25% de troupeaux infectés en 1955 à moins de 0.1% en 2001, justifiant alors l'obtention du statut officiellement indemne (Cavalerie et al. 2014).

Cependant, l'abattage total semble de moins en moins adapté à la situation épidémiologique en France où la prévalence de la tuberculose bovine reste très faible (une centaine de foyers par an) malgré une légère augmentation depuis 2004 (Cavalerie et al. 2014). Cette mesure engendre des frais importants pour l'Etat qui doit indemniser les éleveurs pour l'ensemble des animaux abattus alors que seul un petit nombre d'entre eux sont infectés. C'est par ailleurs une mesure difficilement acceptable pour des raisons éthiques évidentes tant pour l'animal que pour l'éleveur. Finalement, l'efficacité de cette mesure peut parfois être remise en cause lors de phénomènes de recontaminations d'un élevage après abattage total et repeuplement. Ces éléments ont motivé l'évolution de la réglementation française vers un retour progressif à l'abattage partiel. Cet abattage sélectif des seuls animaux réagissant à une combinaison de tests a ainsi été autorisé sous certaines conditions sur tout le territoire français en 2014 (NS DGAL/SDSPA 2014-541).

Un seul protocole d'abattage partiel est actuellement formalisé par cette note de service et les décideurs se demandent s'il ne pourrait pas être amélioré en termes d'efficacité épidémiologique, de coût pour l'Etat et d'acceptabilité pour l'éleveur. Le but de ce travail est de comparer grâce à la modélisation plusieurs scénarios d'abattage partiel d'un élevage infecté de tuberculose bovine pour déterminer le scénario le plus efficace au plan épidémiologique, en évaluant par ailleurs ses coûts pour l'Etat et son acceptabilité sociale.

Evaluation de stratégies d'assainissement d'un troupeau infecté de tuberculose bovine par abattage partiel

Partie I : la tuberculose bovine, état des lieux

1) Généralités sur la tuberculose bovine

a. Pathogénie

Mycobacterium bovis est un bacille appartenant au complexe tuberculeux (MCT) regroupant entre autres *M. tuberculosis*, l'agent de la tuberculose humaine et *M. caprae*, parfois responsable de tuberculose bovine. Il existe des mycobactéries dites atypiques (*M. kansasii*, *M. goodii*) engendrant des infections le plus souvent bénignes et non contagieuses mais pouvant interférer avec les tests de dépistage de la tuberculose bovine. Quoique thermorésistantes, ces bactéries sont détruites par les traitements thermiques comme la pasteurisation du lait. Elles sont cependant capables de persister plusieurs mois dans le milieu extérieur (OIE 2015; Vordermeier et al. 2007).

La transmission entre animaux se fait le plus souvent à partir d'un animal excréteur, par voie aérienne (aérosols), mais peut aussi être due à l'ingestion de matières contaminées (lait contaminé, nourriture souillée). La lésion caractéristique est le tubercule caséux, foyer inflammatoire créé autour du lieu d'implantation du bacille, détectable si visible à l'œil nu à l'inspection de première intention à l'abattoir, mais pas toujours présent chez les animaux infectés (Liebana et al. 2008).

La durée d'incubation est longue et l'animal excrète le bacille avant l'apparition de signes cliniques qui sont rares et discrets chez les bovins. Dans un troupeau infecté de tuberculose bovine, il y a plus d'animaux infectés que de malades, d'où l'importance de la détection précoce des animaux excréteurs pour limiter au maximum la dissémination à bas bruit de la maladie.

b. Le statut officiellement indemne.

La directive européenne 64/432/EEC fixe les conditions pour être reconnu officiellement indemne (OI). La France a obtenu le statut OI car :

- L'incidence cheptel annuelle a été inférieure à 0,1% pendant 6 ans ;
- La prévalence cheptel instantanée au 31 Décembre était inférieure à 0,1% depuis 6 ans ;
- Chaque bovin est identifié conformément à la législation européenne ;
- Tous les bovins abattus sont soumis à une inspection post-mortem ;
- Les procédures de suspension et de retrait du statut officiellement indemne pour les élevages sont respectées.

Ce statut a un impact sur le commerce intra et extra-communautaire des animaux vivants et des denrées d'origine animale, puisqu'il s'effectue entre les pays ayant le même statut sanitaire. La France est ainsi particulièrement concernée par son statut OI de tuberculose bovine car l'exportation de bovins vivants vers des pays détenteurs de ce même statut constitue un marché important. En effet, plus de 1,4 million de bovins sont exportés chaque année pour une valeur de 1,3 milliards d'euros par an, toutes destinations confondues (Institut de l'élevage et CNE, 2015).

c. Une situation épidémiologique variable selon les régions dans l'UE et en France

La décision 2003/467/CE du 23 Juin 2003 indique que 18 pays européens, dont la France, sont reconnus officiellement indemnes de tuberculose bovine. Quatre pays (dont le Royaume Uni), ont des statuts intermédiaires avec seulement certaines régions reconnues OI. Les autres pays ne sont pas cités donc ne sont pas OI (Annexe 1).

Au début de la mise en place de mesures de contrôle de la tuberculose bovine en France dans les années 1960, le pourcentage d'élevages infectés (prévalence annuelle) était d'environ 25% (Bénet et al. 2006). Il a chuté jusqu'à atteindre son minimum en 2014 avec moins de 0.02% des élevages français infectés. Cela a permis dès 2001 l'obtention du statut officiellement indemne. Mais depuis 2004, une recrudescence progressive des foyers est observée (Figure 1). En 2014, la prévalence annuelle était de 0.089% et l'incidence annuelle de 0.05% avec environ 105 nouveaux foyers par an (Cavalerie et al. 2014).

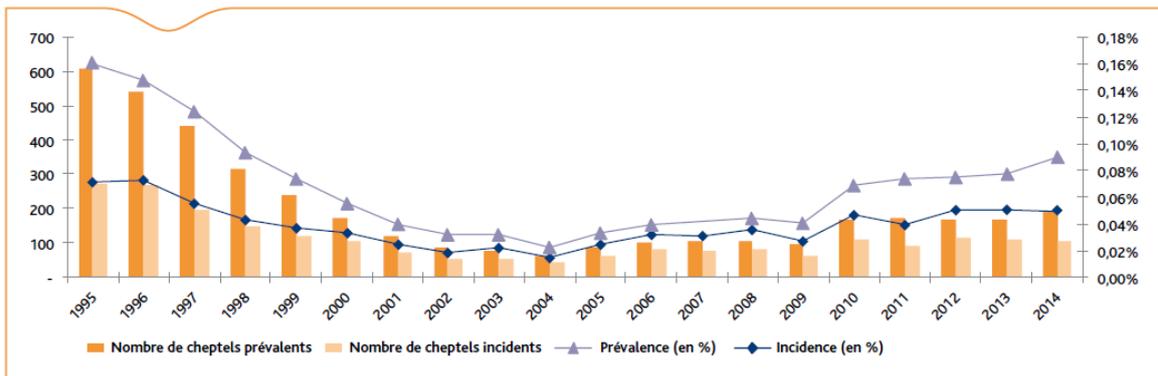


Figure 1 : Evolution de la prévalence et de l'incidence de la tuberculose bovine de 1995 à 2014 (Cavalerie et al. 2014)

Les départements les plus concernés sont la Côte d'Or et la Dordogne qui en 2012 cumulaient presque la moitié des foyers Mais dont l'incidence ne cesse de diminuer depuis. Les Landes et les Pyrénées Atlantiques sont également particulièrement touchés avec en 2014, 46% des foyers incidents détectés en Aquitaine (Figure 2).

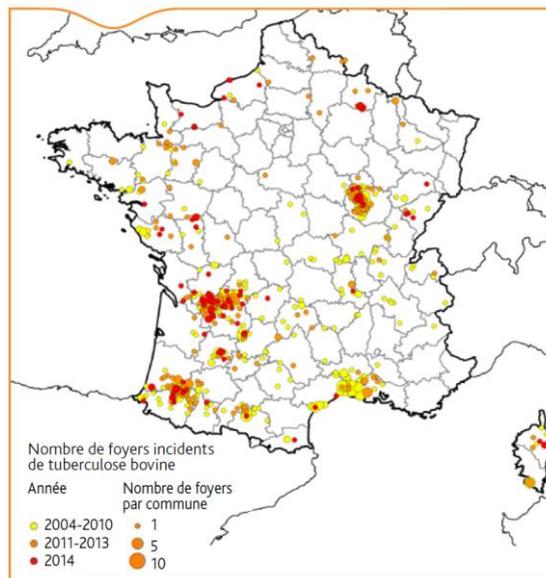


Figure 2 : Distribution par commune des foyers incidents de tuberculose bovine en France de 2000 à 2014 (Cavalerie et al. 2014)

d. Faune sauvage

La surveillance de la tuberculose bovine dans la faune sauvage en France est organisée par le réseau Sylvatub (Rivière et al. 2013, NS DGAL/SDSPA 2015-556, NS DGAL/SDSPA/2017-589). Des animaux sauvages, notamment blaireaux, sangliers et cervidés, sont régulièrement trouvés infectés par *M. bovis*. Des études sont actuellement menées pour quantifier le risque de recontamination de la faune domestique par la faune sauvage. De plus, les chercheurs se demandent si certaines populations sauvages ne pourraient pas constituer un réservoir (c'est-à-dire une population capable de maintenir l'infection et la retransmettre aux bovins), comme cela a été montré dans certaines régions du Royaume Uni avec les blaireaux ou de l'Espagne avec les sangliers (Griffin et al. 2005).

2) Gestion de la tuberculose bovine et évolutions

a. Surveillance

En France, la surveillance est organisée selon trois axes principaux.

- (i) Une surveillance systématique des carcasses est réalisée à l'abattoir par les services vétérinaires, dans le but de détecter des lésions caractéristiques de tuberculose.
- (ii) Des campagnes de dépistage en élevage, réalisées par les vétérinaires sanitaires, sont organisées par les directions départementales (de la cohésion sociale) et de la protection des populations (DD(cs)PP). Leur fréquence varie en fonction de la situation épidémiologique de la zone (Figure 3).
- (iii) Pour finir, un contrôle des documents sanitaires (ASDA) est réalisé par les DD(cs)PP à l'introduction des bovins achetés dans un élevage. Celui-ci peut cependant être accompagnée de mesures plus strictes (mise en quarantaine et test de dépistage), mais seulement dans de rares cas étant donné le statut OI de la France (transports excédant 6 jours, animaux provenant de troupeaux classés à risque).

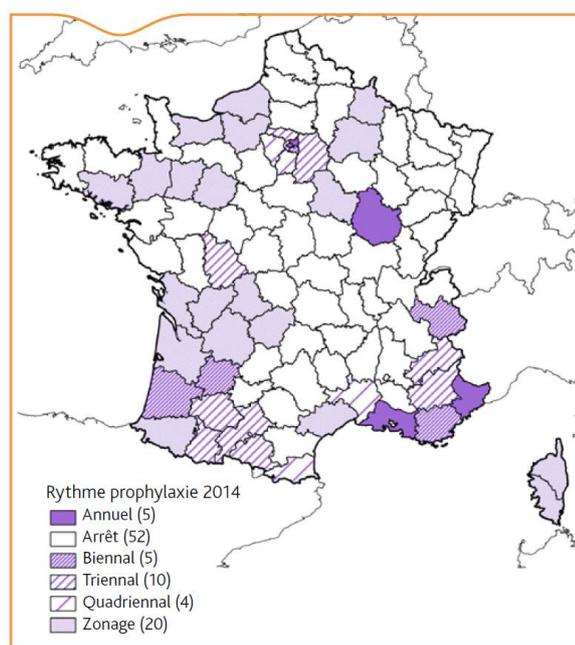


Figure 3 : Rythmes de dépistage prophylactique de la tuberculose bovine par département en 2014 (Cavalerie et al. 2014)

b. Gestion des suspicions

Suspicion

Dès lors qu'un test de dépistage revient non négatif (positif ou douteux), ou qu'une lésion évoquant la tuberculose est détectée à l'abattoir (Annexe 2), une suspicion est portée. L'élevage concerné est alors placé sous Arrêté Préfectoral de Mise sous Surveillance (APMS). Cet acte consiste en la mise en place de mesures de blocage de l'exploitation, d'enquêtes et la réalisation d'analyses pour infirmer ou confirmer la suspicion. Les DD(cs)PP sont en charge de la mise en place des mesures et de leur coordination.

Il existe plusieurs protocoles dits de gestion de suspicion en fonction de la qualification de la suspicion : forte ou faible. Cette qualification se fait par la DD(cs)PP qui peut faire appel à des expertises :

- Si au moins une IDC (voir définition p.13) est positive, la suspicion est forte.
- Sinon, des experts étudient si le contexte est globalement favorable (suspicion faible) ou défavorable (suspicion forte). Le contexte dépend de trois éléments présentés dans le tableau 1 (NS DGAL/SDSPA 2016-1001).

Tableau 1 : Eléments de contexte aidant à l'évaluation du niveau de suspicion

Suspicion	Suspicion forte	Suspicion faible
Elément de contexte		
Circonstances de dépistage	Investigation d'un lien épidémiologique	Prophylaxie de routine
Historique du troupeau	Classé à risque sanitaire, achats fréquents de bovins d'origines variées, circuits de commercialisation indirects	Troupeau régulièrement dépisté et résultats négatifs, peu d'introductions
Voisinage	Elevage voisin d'un élevage infecté, zones où la faune sauvage a été récemment infectée	Elevage isolé, importantes mesures de biosécurité

Confirmation

L'une des mesures de l'APMS est l'abattage diagnostique des animaux réagissant. On soumet alors les prélèvements (nœuds lymphatiques) à des tests de confirmation (culture, PCR et histologie, voir ci-dessous, partie abattage partiel) pour infirmer ou confirmer la maladie. De plus, le laboratoire national de référence (LNR) de Maisons-Alfort reçoit et analyse (PCR et culture) les échantillons du cas index ayant donné des résultats douteux (et positifs depuis peu, communication personnelle 2017 : M-L. Boschioli, responsable LNR tuberculose Maisons-Alfort) pour confirmer le résultat. La culture bactérienne est 100% spécifique, donc les faux négatifs sont impossibles. Un résultat positif signe la présence de la tuberculose.

Définitions : Un animal est déclaré infecté après identification par culture d'une espèce de mycobactérie du complexe tuberculeux (MTC) et/ou lorsque le LNR rend un résultat positif à l'un des tests de confirmation qu'il a réalisés. Un troupeau est reconnu infecté lorsque au moins un animal est confirmé infecté.

La confirmation de l'infection par le LNR, entraîne la mise sous Arrêté Préfectoral portant Déclaration d'Infection (APDI) de l'élevage en vue de son assainissement. Cet acte implique la mise

en place de différentes mesures visant à juguler, évaluer et contrôler le risque (identification, recensement de tous les animaux sensibles présents sur l'exploitation, biosécurité renforcée, enquêtes, gestion des produits). Les mouvements (entrées et sorties de bovins) sont interdits sauf dérogation accordée par La DD(cs)PP. Pour finir, une discussion avec l'éleveur et l'évaluation des ressources disponibles conditionnent le choix du mode d'assainissement dans lequel il s'engage : abattage total ou partiel. Le bilan de la gestion est présenté en figure 4.

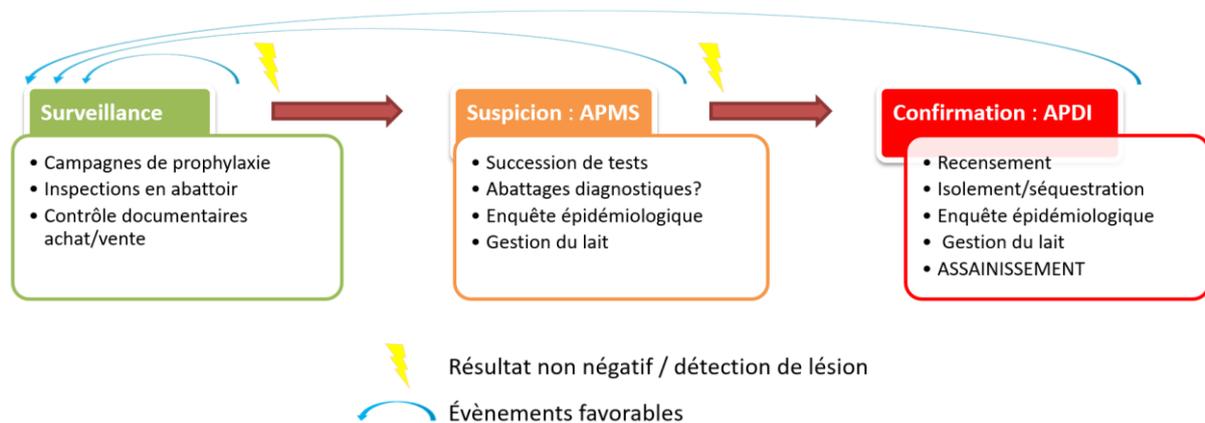


Figure 4 : Etapes de la gestion des suspicions de tuberculose bovine en France (Arrêté ministériel du 15 Septembre 2003).

c. Assainissement : de l'abattage total à l'abattage partiel.

L'abattage total, obligatoire depuis 1999 était justifié par l'importance économique et sanitaire de la tuberculose bovine, impliquant la nécessité d'éradication. Il a permis la quasi-éradication de la maladie en France en faisant passer la prévalence des troupeaux infectés en dessous du seuil des 0,1%. Les mesures mises en œuvre impliquent le marquage puis l'abattage de tous les bovins ainsi que des animaux des autres espèces sensibles présents sur l'exploitation. La sortie de l'exploitation des animaux n'est alors autorisée que pour un transport direct, soit vers l'abattoir agréé, soit vers un équarrissage (Arrêté ministériel du 15 Septembre 2003). Cet abattage s'accompagne d'un nettoyage et d'une désinfection de l'exploitation, ainsi qu'une période conseillée de vide sanitaire. Cela permet de limiter le risque de résurgence de l'infection.

Ainsi, une seule confirmation de l'infection suffit à déclencher l'APDI et donc l'abattage total du troupeau. On peut donc abattre l'ensemble du cheptel pour un seul animal infecté.

3) L'abattage partiel

L'abattage partiel était couramment pratiqué avant 1999, avant d'être interdit au profit de l'abattage total. En 2008, il a été autorisé à nouveau pour certains élevages et sous dérogation, notamment en Camargue, Dordogne et Côte d'Or. C'est en 2014 que cette autorisation a été élargie à tout le territoire sous certaines conditions strictes. Les modalités concernant l'abattage partiel sont décrites dans la NS DGAL/SDSPA 2014-541.

a. Elevages éligibles : mesures à mettre en place

L'éleveur formule une demande d'assainissement par abattage partiel qui lui est accordée ou non après délibération par la DD(cs)PP. Différents critères d'éligibilité sont indispensables pour prétendre à ce protocole. Les conditions zootechniques doivent garantir la bonne réalisation des opérations (notamment une bonne contention des animaux) et l'éleveur ainsi que le vétérinaire sanitaire s'engagent au strict respect du protocole proposé. Les animaux réagissant aux tests et en lien épidémiologique proche d'animaux reconnus infectés (même élevage d'origine, veau sous la mère, contacts étroits et répétés) doivent pouvoir être identifiés et éliminés rapidement. La biosécurité doit pouvoir être renforcée pour éviter la transmission aux élevages voisins, à la faune sauvage et à l'éleveur.

Pendant toute la durée du protocole, les mouvements sont limités et les seuls animaux sortants sont soit les réformes et animaux finis sous dérogation, soit les animaux à abattre car présentant un risque (résultat non négatif à un test). Toutes les sorties sont faites sous laissez-passer et après marquage des animaux pour prévenir l'abatteur. Les animaux sont donc destinés à la consommation sous réserve d'une inspection des carcasses favorable.

b. Tests ante-mortem utilisés :

Le protocole repose sur la soumission des animaux à une combinaison de tests, l'élimination systématique des animaux réagissant et sur des recontrôles du troupeau à intervalle de deux mois. Les dépistages consistent en l'utilisation en parallèle des tests d'intradermotuberculation (ID) et de dosage de l'interféron gamma (IFG).

L'intradermotuberculation

L'ID est une technique de dépistage allergique de la tuberculose. Elle est basée sur la détection d'une réaction d'hypersensibilité retardée déclenchée par l'infection. L'acte consiste en l'inoculation dans le derme de tuberculine qui provoque une réaction locale chez le bovin tuberculeux, évaluable via la mesure de l'épaisseur de la peau au lieu d'injection. La réaction est tardive, progressive et durable (Annexe 3). La lecture doit être réalisée par le vétérinaire ayant procédé à l'injection minimum 72h après pour écarter les réactions non spécifiques. Le résultat dépend de la différence entre l'épaisseur de la peau mesurée avant l'injection, et celle mesurée au moment de la lecture. L'ID provoque une désensibilisation importante des animaux testés, qui implique le respect impératif d'un délai de 6 semaines entre deux injections de tuberculine, pour limiter le risque de ne pas détecter un animal réellement infecté. On distingue deux types d'ID : la simple (IDS) et la comparée (IDC).

IDS

Elle consiste en une unique injection de tuberculine bovine (Figure 5). La réaction est dite positive si l'augmentation de l'épaisseur de la peau est supérieure ou égale à 4mm. On obtient un résultat négatif si cette augmentation ne dépasse pas 2 mm. Entre les deux, le résultat est considéré comme douteux (Tableau 2).

Tableau 2 : Résultats de l'IDS (Bénet et al. 2017)

Lecture	Résultat
$\Delta \geq 4 \text{ mm}$	Positif
$\Delta \leq 2 \text{ mm}$	Négatif
$2\text{mm} \leq \Delta \leq 4\text{mm}$	Douteux

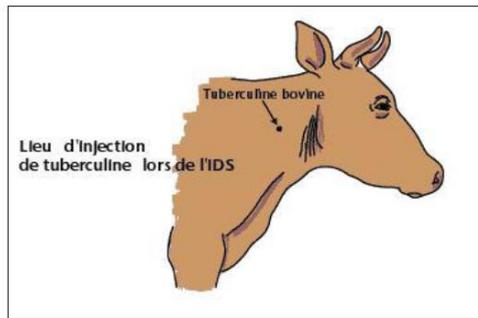


Figure 5: Lieu d'injection de la tuberculine pour une IDS (Source : GDS 18)

L'IDS a une spécificité individuelle moyenne (médiane : 0,91 [0,63-1,00]). Les réactions faussement positives ont comme conséquence de considérer à tort un animal comme suspect. Sa sensibilité est bonne avec une médiane de 0,81 [0,52-0,94] (Nuñez-Garcia et al. 2017).

IDC

Ce test consiste cette fois en l'injection de deux tuberculines, l'une bovine l'autre aviaire, pour le rendre plus spécifique du complexe MTC que l'on cherche à détecter (Figure 6). La lecture dépend comme pour l'IDS des différences d'épaisseurs de peau, mesurées à chaque site d'injection. Les résultats sont interprétés selon le tableau 3.

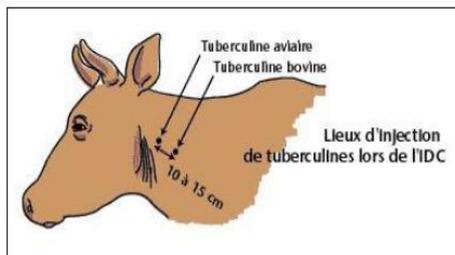


Tableau 3 : Résultats de l'IDC (Bénet et al. 2017)

Tuberculine bovine (B)	Différence avec tuberculine aviaire (A)	Résultat
$\Delta B > 2 \text{ mm}$	$\Delta B - \Delta A > 4 \text{ mm}$	Positif
	$1 \text{ mm} > \Delta B - \Delta A > 4 \text{ mm}$	Douteux
	$\Delta B - \Delta A < 1 \text{ mm}$	Négatif
$\Delta B \leq 2 \text{ mm}$	Peu importe	Négatif

Figure 6 : Lieux d'injection des tuberculines pour une IDC (GDS 18)

L'IDC a une spécificité quasi-parfaite (médiane : 1 [0,99-1,00], (Nuñez-Garcia et al. 2017)) du complexe MTC que l'on cherche à détecter, car on compare des réactions induites par des tuberculines de complexes différents. Elle est cependant moins sensible que l'IDS avec une médiane de 0,75 [0,61-0,86] (Nuñez-Garcia et al. 2017).

Le test de dosage de l'interféron- γ

Le test à l'interféron gamma (IFG) est un test sanguin *in vitro* qui repose sur la quantification de l'interféron gamma, cytokine libérée principalement par les lymphocytes T après stimulation à la tuberculine (de la Rua-Domenech et al. 2006). Il révèle donc l'état allergique de l'hôte. Il comporte deux phases : une phase d'incubation des aliquotes sanguins avec les tuberculines et une phase de quantification de l'IFG via la méthode ELISA. La méta-analyse de J. Nuñez-Garcia en 2017 a montré une sensibilité de 0,70 [0,55-0,92] inférieure à celle de l'IDS et de l'IDC. Par contre, la spécificité du test est bonne (médiane : 0,94 [0,88-0,97], (Nuñez-Garcia et al. 2017)).

Ce test comporte certains avantages car il permet une mesure plus standardisée et objective que l'IDS ou l'IDC et évite une deuxième visite à la ferme pour la lecture du test. Cependant, l'acheminement des prélèvements au LDA doit se faire dans les six à huit heures dans les meilleures conditions de conservation et il demeure plus onéreux (de la Rua-Domenech et al. 2006).

Le test utilisé en abattage partiel est appelé « Bovigam modifié » car il utilise deux combinaisons d'antigènes en parallèle : les antigènes **PPD aviaires et bovines** du test Bovigam®, et un mélange de peptides composé des antigènes recombinants **ESAT-6 et CFP-10**, spécifiques des mycobactéries. Cela a pour effet d'optimiser la spécificité du test (OIE 2015). L'interprétation des résultats se fait selon des seuils définis par le LNR (Tableau 4). Le résultat peut être positif, négatif, douteux ou non conclusif (NC).

En abattage partiel, le test IFG est utilisé en parallèle de l'ID pour augmenter la sensibilité globale de la détection des animaux infectés dans un foyer. Cette utilisation en parallèle est le seul usage reconnu par l'Union Européenne (Directive 64/432/CEE 2017).

Tableau 4 : Grille d'interprétation des résultats du test à l'IFG (Boschioli 2014, Anses)

		PPD		
		< 0,05	≥0,05	≥ 0,3
Mix	< 0,03	NEGATIF	NON CONCLUSIF	POSITIF
	≥ 0,03	NON CONCLUSIF	POSITIF	POSITIF
		POSITIF SI PPD BOV > 0,7		
≥ 0,1	POSITIF	POSITIF	POSITIF	

Sérologie

La méthode immuno-enzymatique ELISA est utilisée ici pour détecter la présence d'anticorps anti-*M.bovis* dans le sérum. L'échantillon de sérum est appliqué dans des puits contenant l'antigène spécifique connu. Des anticorps secondaires couplés à une enzyme sont ensuite appliqués pour se lier aux éventuels anticorps du sérum. Pour finir, le substrat de l'enzyme est appliqué et libère un marqueur, mesurable par spectrophotométrie, s'il est converti par l'enzyme (Annexe 4).

La méthode ELISA utilisant plusieurs antigènes augmente la sensibilité du test et peut être utilisée pour détecter des individus infectés anergiques, c'est-à-dire non détectables via les épreuves cutanées ou le test à l'IFG. Néanmoins, la réponse immunitaire humorale détectable ne se met en place que tardivement (Figure 7). La sensibilité des tests ELISA est alors faible (médiane : 0,60 [0,31-0,86], (Nuñez-Garcia et al. 2017)) comparée aux tests dermatologiques mais l'utilisation d'antigènes plus spécifiques de *M. bovis* ont permis d'augmenter la spécificité (médiane : 0,93 [0,84-0,97], (Nuñez-Garcia et al. 2017)). Ces tests peuvent constituer une alternative avantageuse aux politiques de « test and slaughter » conduites dans les pays en voie de développement qui demeurent très onéreuses (de la Rua-Domenech et al. 2006). La sérologie peut être utilisée en parallèle de l'ID et du test à l'IFG dans les deux premiers contrôles du protocole d'abattage partiel (NS DGAL/SDSPA/2014-541). Elle est systématique en Côte d'Or (communication personnelle 2017 : F. Chevalier, référent national tuberculose bovine).

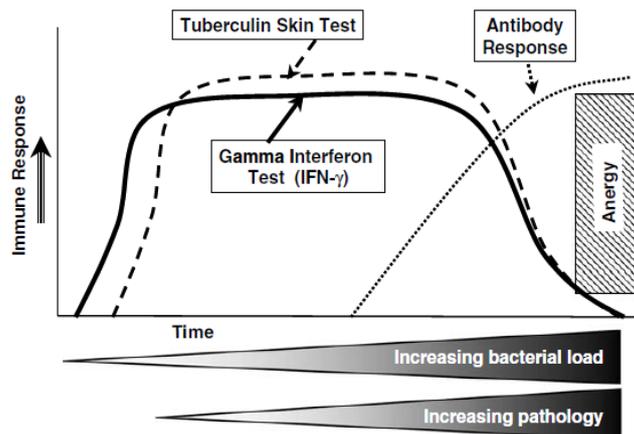


Figure 7 : Représentation schématique des réponses du système immunitaire bovin aux différents tests ante mortem utilisés en tuberculose (de la Rua-Domenech et al. 2006)

c. Tests post-mortem utilisés

Les animaux abattus pendant le protocole doivent faire l'objet d'une série de tests, afin de confirmer, infirmer, ou détecter fortuitement dans le cas d'une réforme, une infection.

Inspection renforcée

Dans le cadre d'un assainissement, toutes les carcasses sont inspectées de manière renforcée. Le temps d'inspection est allongé et les organes plus finement incisés. La sensibilité est alors bien augmentée (sensibilité médiane de 0,71 [0,37-0,92] pour une inspection normale contre 0,96 [0,82-1,00] en inspection renforcée, (Nuñez-Garcia et al. 2017)). En fonction du type d'abattage (voir section « Abattage des animaux » p. 16), les nœuds lymphatiques sont prélevés pour réaliser des tests de confirmation : histologie en présence de lésions, PCR et culture dans tous les cas.

Histologie

L'examen microscopique de frottis réalisés sur des lésions suspectes et après coloration (e.g. coloration de Ziehl-Neelsen) permet d'observer, dans le cas d'échantillons positifs, des lésions caractéristiques provoquées par *M. bovis* comme une nécrose caséuse, une minéralisation, des cellules épithélioïdes, des cellules géantes multinucléées et des macrophages (OIE 2015). La sensibilité est moyenne mais la spécificité est parfaite avec respectivement une médiane de 0,66 [0,41-0,84] et de 1 [0,95-1,0] (Nuñez-Garcia et al. 2017).

PCR

La PCR (Polymerase Chain Reaction) est utilisée pour détecter le complexe MTC. Son principe repose sur l'utilisation d'amorces spécifiques du complexe MTC (séquences d'insertion IS6110 ou IS1081). Après amplification des échantillons, les produits sont révélés par hybridation avec des sondes ou électrophorèse sur gel et permettent de détecter les individus positifs. La sensibilité est légèrement supérieure à celle de la culture (médiane : 0,86 [0,65-0,96], (Nuñez-Garcia et al. 2017)). Sa spécificité est parfaite. L'avantage de la PCR est sa rapidité d'exécution et sa flexibilité comparée à la culture (de la Rua-Domenech et al. 2006).

Culture

La culture est considérée comme le test de référence pour la détection de *M. bovis* dans les tissus. Elle possède une spécificité parfaite (médiane : 1 [0,74-1,00], (Nuñez-Garcia et al. 2017)). Néanmoins, c'est un test diagnostique très long avec une incubation des cultures à 37°C de 8 semaines pour un résultat positif, et jusqu'à 3 mois pour un résultat négatif (OIE, 2005). De plus, la sensibilité est moyenne (médiane : 0,74 [0,46-0,94], (Nuñez-Garcia et al. 2017)).

d. Organisation des contrôles

Le protocole implique trois contrôles successifs espacés de deux mois. Les deux premiers sont une IDS, un dosage de l'IFG et une sérologie, réalisés en parallèle. Le dernier, dit test de requalification, est une IDC (Figure 8).

Lorsque le département utilise l'IDC dans son protocole de surveillance (prophylaxie), les IDS des deux premiers contrôles sont souvent remplacées par des IDC. C'est notamment le cas en Côte d'Or où la prophylaxie se fait en IDC à cause de la présence de nombreuses mycobactéries atypiques qui justifie le recours à un test plus spécifique.

e. Abattage des animaux

Les animaux abattus pendant le protocole sont de deux types :

- **Abattages sanitaires** = animaux tués sur ordre administratif
 - o Animaux réagissant = IDS ou IDC non-négative et/ou IFG non-négatif et/ou sérologie positive. Ces animaux doivent être abattus dans les 10 jours.
 - o Animaux à risque = ce sont les animaux qui ont présenté un résultat non négatif au test de dépistage initial (animaux non abattus car le test de recontrôle avait été négatif) et ceux en lien épidémiologique étroit avec le cas index.

Dans ce cas, on réalise une inspection renforcée. Les nœuds lymphatiques sont prélevés et analysés systématiquement, même en l'absence de lésions visibles.

- **Abattages zootechniques** = réformes et animaux finis

Même si les mouvements d'animaux (achats, ventes) sont interdits pendant le protocole (sauf dérogation rare), l'éleveur peut continuer d'envoyer des bovins à l'abattoir, sous laissez-passer. Cela lui permet de maintenir un taux de réforme constant et de limiter ses pertes de revenu à court terme.

Ces animaux doivent être abattus dans les mêmes conditions que les abattages sanitaires. On réalise une inspection renforcée mais les nœuds lymphatiques ne sont pas systématiquement prélevés en l'absence de lésion.

f. Contrôle défavorable

Un contrôle est considéré comme défavorable si :

- o Au moins un animal est positif en IDC,
- o Au moins un animal est positif au dosage de l'IFG et non négatif (positif ou douteux) à l'ID,
- o L'infection est confirmée sur au moins un animal abattu (NS DGAL/SDSPA 2014-541). En réalité, sur le terrain, dès qu'une lésion est détectée à l'inspection, le

contrôle est considéré comme défavorable (communication personnelle 2017 : F. Chevalier, référent national tuberculose bovine). En l'absence de lésion visible, les prélèvements sont quand même mis en culture. Il est alors possible que la culture donne, dans les 3 mois, un résultat positif. Peu importe où l'on se situe dans le protocole, on est alors face à un contrôle défavorable.

A chaque fois qu'un contrôle est considéré comme défavorable, on retourne au premier contrôle.

g. Contrôle favorable et requalification

Un contrôle est considéré comme favorable dans tous les autres cas. On passe alors au contrôle suivant. Le cheptel est requalifié quand les trois contrôles ont été favorables successivement. Il est alors considéré officiellement assaini. Il reste néanmoins sous surveillance renforcée avec prophylaxie annuelle pendant 10 ans.

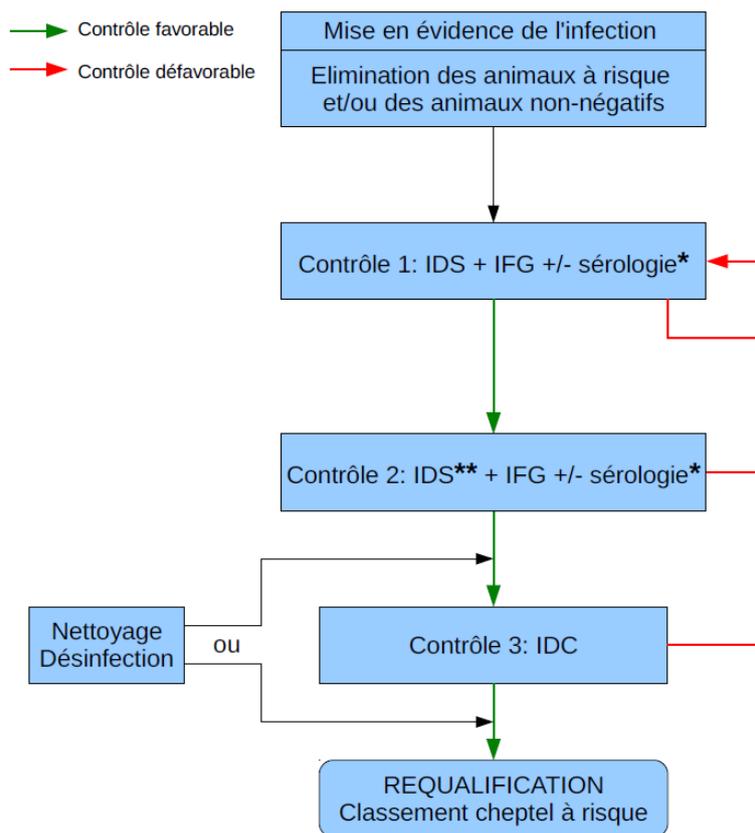


Figure 8 : Protocole d'abattage partiel (NS DGAL/SDSPA 2014-541)

h. L'abattage partiel, observations terrain

Utilisation de l'abattage partiel en France

Dans les départements de Côte d'Or, de Dordogne, des Ardennes, des Landes et des Pyrénées-Atlantiques, l'abattage partiel a été la méthode majoritairement utilisée entre Juillet 2014 et Janvier 2017. Sur 127 élevages étudiés, 76 ont entamé un protocole d'abattage partiel, et 68 sont allés au bout. En effet, 10,5 % en moyenne des élevages concernés abandonnent l'abattage partiel en cours de route pour finalement choisir l'abattage total (Figure 9).

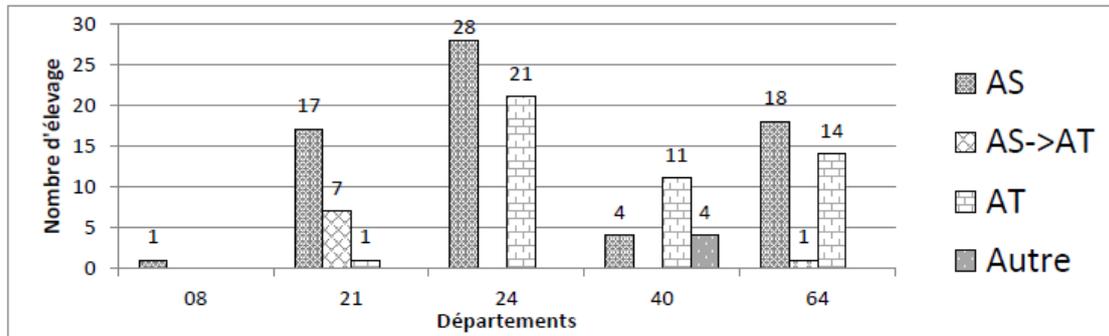


Figure 9 : Répartition des modalités d'assainissement utilisées dans les différents départements entre les 04/07/2014 et le 18/01/2017 (Poirier 2017)

AS = Abattage sélectif ou partiel, AT = abattage total, AS → AT = élevages ayant initié un abattage partiel mais ayant fini en abattage total

Impact de l'historique de l'élevage

L'historique de l'élevage ne semble pas avoir eu d'impact sur le mode d'assainissement choisi. Les élevages ayant déjà subi un abattage partiel et ceux ayant subi un abattage total peuvent se tourner vers l'abattage partiel de la même manière (Annexe 5).

Type d'élevages

Activité

La majorité des élevages ayant fait l'objet d'un abattage partiel étaient des élevages allaitants. Cela s'explique par différentes circonstances :

- Les départements étudiés comptent une majorité d'élevages allaitants
- La majorité des foyers français sont des élevages allaitants
- La NS DGAL/SDSPA 2014-541 déconseille l'abattage partiel pour les élevages laitiers.

Effectifs

D'après Poirier (2017), la taille des élevages assainis en abattage partiel était assez grande, avec une médiane de 127 bovins dans les élevages étudiés. C'est significativement plus que les élevages s'étant orientés vers l'abattage total (74 bovins en médiane).

Écarts à la réglementation

Il s'avère que la note de service est plus une ligne directrice qu'une réglementation strictement respectée concernant les mesures mises en place. Les DD(cs)PP et les éleveurs semblent choisir ensemble un schéma à appliquer, en fonction de la réalisabilité sur le terrain et de la situation épidémiologique. Deux écarts majeurs ont été soulignés (Poirier 2017) :

- (i) Les délais inter-contrôles : la médiane observée sur le terrain était de 102 jours (soit un peu plus de 3 mois). Cependant, même si le protocole indique un délai de 2 mois, la note de service précise que ce délai peut être allongé à 6 mois maximum.
- (ii) Le délai d'abattage des animaux réagissant : les animaux réagissant sont censés être abattus dans les 10 jours pour limiter au maximum la transmission intra-troupeau (et à l'éleveur) et la dissémination de la maladie. La médiane observée sur le terrain était de 47 jours, soit 1 mois et demi.
- (iii) L'abattage des animaux réagissant : plus de 50% des animaux réagissant ne sont pas abattus sur le terrain, contrairement à ce qu'indique la note de service. Mais plus de

80% de ces animaux-ci sont en réalité des animaux ayant eu pour seule réaction, un test IFG non conclusif (NC). Cependant, 1,5 % des animaux réagissant épargnés étaient quand même positifs en ID et 6,6 % étaient positifs en IFG.

Ces observations justifient le besoin d'évaluer l'impact épidémiologique, économique et social de ces protocoles appliqués sur le terrain.

4) Les différents coûts liés à l'assainissement : une première motivation au passage à l'abattage partiel

Tous les actes imposés par la police sanitaires sont indemnisés par l'Etat selon l'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.

Les coûts liés à l'assainissement des foyers sont de différentes natures :

a. Coûts pour l'éleveur

En 2013, sur les 193M d'euros dédiés par l'UE aux plans nationaux de surveillance et d'éradication, plus de 71M étaient dédiés à la tuberculose bovine (Delmotte 2013). A une échelle nationale, l'Etat français a déboursé en 2014, plus de 17M d'euros dans la lutte contre la maladie, dont plus de 60% ont couvert les indemnités des animaux abattus. En 2014, la moyenne nationale du coût de l'assainissement (tous types confondus) d'un foyer était de 107 000 euros (Cavalerie et al. 2014).

Frais liés à l'abattage sur ordre administratif des animaux

Les animaux réagissant aux tests pendant l'assainissement (ou tout l'élevage en cas d'abattage total) doivent être abattus dans un délai de 10 jours (30 jours en abattage total) quel que soit leur état de production et leur état corporel (Arrêté ministériel du 15 Septembre 2003). Cela entraîne donc pour l'éleveur des pertes à court terme correspondant à la différence de prix entre l'animal non encore engraisé et l'animal normalement fini. Des pertes à long terme sont aussi possibles, via la perte du potentiel génétique du troupeau (Brochet 2004).

Valeur marchande objective

D'après l'Arrêté ministériel du 30 Mars 2001 fixant les modalités de l'estimation des animaux abattus et des denrées et produits détruits sur ordre de l'administration, l'Etat demande une expertise pour permettre une indemnisation de ces animaux. Les experts estiment une valeur marchande objective (VMO) pour chaque animal selon le poids carcasse, la valeur bouchère, les charges alimentaires d'engraissement et l'état de gestation des vaches (on applique une plus-value si la vache est gestante) (Rapports d'expertise communiqués par les DD(cs)PP Dordogne et Côte d'Or).

$$VMO = Poids \times valeur\ bouchère + plus\ value\ de\ gestation$$

Le coût réel pour l'Etat est défini après déduction de la valorisation bouchère de l'animal (coût de revient de la viande), indiqué sur les factures de l'abattoir.

Dans le cas d'un abattage partiel, l'Etat indemnise aussi, au prix des cotations de viande, les animaux abattus hors ordre administratif (réformes, animaux finis) pour « pallier, le cas échéant, la

déévaluation du prix de la viande consécutive à l'abattage d'animaux sous Laissez-Passer Sanitaire » (Arrêté ministériel du 30 Mars 2001). Ce phénomène n'a cependant pas été clairement reconnu et son ampleur n'a pas pu être évaluée.

Frais liés au renouvellement

Ils se décomposent de la manière suivante (Arrêté ministériel du 30 Mars 2001, rapports d'expertise) :

- (i) Frais de nettoyage/désinfection (souvent pris en charge par les GDS Mais parfois indemnisés par l'Etat à hauteur de 75%).
- (ii) Frais sanitaires d'introduction : tests et contrôles documentaires réalisés à l'introduction pour la requalification officielle du cheptel (environ 70 euros par bovin).
- (iii) Frais de transport des animaux réintroduits, charge de travail supplémentaire (participation forfaitaire de 75 euros par bovin).
- (iv) Besoins supplémentaires en repeuplement : on considère qu'une vache reproductrice « vaut plus » qu'un autre bovin, l'Etat donne alors une indemnisation supplémentaire pour chaque vache reproductrice réintroduite (15% de la valeur des vaches reproductrices de plus de 2 ans).

Déficit momentané de production suite à l'abattage des animaux.

Pour les élevages laitiers, le déficit correspond au prix moyen de la production laitière vendue l'année précédente, diminué du coût de l'alimentation.

Pour les élevages allaitants, le déficit est évalué « par différence entre la valeur bouchère attendue au terme de l'engraissement des animaux entretenus pour être abattus pour la boucherie (...) et leur valeur marchande objective à la date de l'expertise, après déduction du coût de leur alimentation. » (Arrêté ministériel du 30 Mars 2001).

Bilan de l'indemnisation nette versée par l'Etat :

$$\text{Indemnisation} = \underbrace{\text{VMO} + \text{frais de renouvellement}}_{\text{valeur de remplacement}} + \text{déficit momentané de production} - \text{valorisation à l'abattoir}$$

Frais liés au blocage de l'élevage : indemnisés par le FMSE

Un élevage sous APMS ou APDI est dit « bloqué ». En effet, même si en abattage partiel l'éleveur continue d'envoyer quelques animaux sains à l'abattoir sous laissez-passer, l'achat et la vente de bovins pour l'élevage, ainsi que la vente de lait cru pour les élevages laitiers, sont en revanche impossibles. Les pertes engendrées par ce blocage sont diverses (Institut de l'élevage 2012) :

- Coût de l'alimentation, des soins et de la main d'œuvre supplémentaire concernant les animaux qui auraient dû sortir de l'exploitation.
- Dépréciation des animaux qui n'ont pas pu être vendus : indemnité calculée en fonction du nombre d'animaux supposés sortir pour chaque catégorie d'âge (vu les ventes des 5 dernières années).

- Perte de revenu pour cause de non commercialisation du lait cru : indemnité basée sur le volume de lait produit pendant le blocage, auquel est appliquée la différence de prix entre le lait cru et le lait pasteurisé.

Le fonds national agricole de mutualisation du risque sanitaire et environnemental (FMSE) a été agréé par arrêté du ministre de l'Agriculture en 2013. Il a pour but d'indemniser les pertes des éleveurs et agriculteurs subissant des incidents sanitaires et environnementaux. Il est financé à 65% par des fonds publics (Union Européenne surtout, Etat français dans une moindre mesure), et à 35% par les cotisations des éleveurs et agriculteurs (FMSE 2017).

b. Frais de laboratoires et vétérinaires pris en charge par l'Etat

Actes vétérinaires

Dès l'APMS, ces frais correspondent aux visites d'exploitation et aux actes vétérinaires réalisés. L'Etat indemnise alors (article 2 de l'Arrêté ministériel du 17 Juin 2009) :

- Le déplacement du vétérinaire (selon les modalités fixées par l'Arrêté ministériel du 30 Septembre 2004)

- La visite, comprenant :

- *l'examen clinique des animaux
- *l'envoi des prélèvements
- *la prescription à l'éleveur des mesures sanitaires à mettre en place
- *le recensement de toutes les espèces sensibles
- *la rédaction et l'envoi des documents réglementaires

- Les prises de sang

- Les tests de dépistage (voir ci-dessous)

- L'identification et le marquage des animaux

Analyses laboratoires

L'Etat prend en charge le coût des analyses de diagnostic réalisées par les laboratoires agréés. Cela comprend la réception et le déconditionnement des prélèvements, les analyses sensu stricto et la communication des résultats.

c. Conclusion

L'abattage partiel a comme intérêt économique de diminuer les coûts liés à l'abattage des animaux. Cependant, il existe un antagonisme entre la baisse des coûts d'abattage et l'augmentation des coûts de tests. En effet, de nombreux tests sont réalisés en abattage partiel, contrairement à l'abattage total. Il convient donc d'évaluer l'impact économique global de l'abattage partiel par rapport à l'abattage total.

5) Bilan : problématique et objectifs du mémoire

Pour l'obtention et le maintien du statut indemne d'un pays, dans un contexte de faible prévalence troupeau, l'abattage total est le mode d'assainissement recommandé, car son efficacité épidémiologique (définie comme la probabilité de ne pas avoir d'animaux infectés non détectés dans

un troupeau considéré assaini) est parfaite. Néanmoins, le contexte de recrudescence de la tuberculose bovine en France, observé depuis 2004, révèle les aspects négatifs de cette méthode.

Elle s'avère d'abord extrêmement coûteuse. Dans un contexte de maîtrise des dépenses publiques, l'importance de la réduction des coûts par la mise en place de nouvelles mesures d'assainissement, qui se doivent d'être efficaces, apparaît alors essentielle (Direction générale de l'alimentation 2012). Dans un deuxième temps, l'acceptabilité des mesures d'abattage total par les éleveurs apparaît logiquement difficile. En plus des raisons éthiques évidentes, tant pour l'animal que l'on abat que pour l'homme qui l'éleve, les situations dans lesquelles un éleveur voit son troupeau abattu totalement deux voire trois fois d'affilée ne sont pas rares. Ce phénomène, qui peut être dû à des recontaminations ou des résurgences de l'infection (i.e. recontamination par la même souche bactérienne ayant persisté dans l'élevage, d'où un échec de l'assainissement), participe fortement à la mauvaise acceptabilité des mesures imposées. De plus, la prévalence de l'infection étant très faible dans les troupeaux, très peu d'animaux sont confirmés infectés au cours d'un abattage total (3 animaux ou moins dans 75% des foyers (Bénet et al. 2017)). Cela participe encore à la mauvaise acceptabilité de l'abattage total. Il convient cependant de rappeler que très peu d'animaux infectés présentent effectivement des lésions, et que la sensibilité de l'inspection n'est pas de 100%. L'absence de lésion ne veut donc pas dire que l'animal est sain.

Ces considérations peuvent donc justifier en partie le passage progressif à la mise en place d'abattages partiels dans les foyers.

Un protocole d'abattage partiel est officiellement décrit actuellement, mais les décideurs se demandent s'il ne pourrait pas être amélioré, en termes de coût pour l'Etat, d'acceptabilité pour les éleveurs, et d'efficacité épidémiologique. En effet, l'importance portée par la France au statut OI explique pourquoi, si l'on souhaite généraliser l'abattage partiel pour des raisons économiques et sociales, le protocole proposé se doit d'être d'une grande efficacité épidémiologique, au plus proche de celle de l'abattage total.

L'étude de Valentine Poirier (Poirier 2017) montre une grande disparité des mesures d'abattage partiel mises en place entre les départements. La réglementation n'est donc pas toujours appliquée, notamment concernant l'abattage des animaux réagissant et les délais entre les contrôles. Cela témoigne d'un besoin de standardisation des méthodes et peut encore une fois marquer un manque d'acceptabilité des mesures de gestion.

Ce travail s'inscrit dans une demande de la DGAL d'évaluer le protocole d'abattage partiel officiel (NS DGAL/SDSPA 2014-541) et de le comparer avec d'autres scénarios d'assainissement (que nous détaillerons en seconde partie), en prenant comme référence l'abattage total. A terme, il devrait pouvoir aider les décideurs dans le choix des stratégies d'assainissement des troupeaux infectés de tuberculose bovine, en leur apportant des éléments de justification de ces choix auprès des différents acteurs (éleveurs, vétérinaires, inspecteurs).

Pour chaque scénario d'assainissement considéré, l'analyse se décline en trois points :

- (i) L'évaluation de l'efficacité épidémiologique du scénario définie comme la probabilité qu'il n'y ait plus d'animaux infectés non détectés dans le troupeau au moment de sa requalification (point de vue de l'épidémiologiste)

- (ii) L'évaluation des coûts engendrés par le scénario et pris en charge par l'Etat (point de vue de l'Etat)
- (iii) L'évaluation de l'acceptabilité des mesures (point de vue de l'éleveur et de la société)

En effet, l'efficacité épidémiologique de l'abattage total est parfaite par définition. Il convient donc d'évaluer dans quelle mesure l'abattage partiel peut s'en approcher. De plus, on suppose que l'abattage partiel est moins cher que l'abattage total vu la part importante de l'indemnisation des animaux abattus dans les dépenses de l'Etat, mais il est nécessaire de quantifier ces économies. Pour finir, l'acceptabilité semble à première vue meilleure pour l'abattage partiel que pour l'abattage total. Elle peut toutefois être limitée car le protocole d'abattage partiel induit des contraintes fortes pour l'éleveur (périodes de blocage, biosécurité renforcée, incertitude sur la suite des événements). Il convient alors d'évaluer le risque d'une moins bonne acceptabilité de l'abattage partiel par rapport à l'abattage total.

Nous évaluerons ces trois aspects, pour plusieurs scénarios d'assainissement en abattage partiel et pour l'abattage total, en utilisant la modélisation.

Partie II : Matériel et méthode

1) Modèle

a. La modélisation en épidémiologie

Le premier modèle mathématique appliqué à l'épidémiologie fut présenté par Bernoulli en 1760, qui évalua l'intérêt de la variolisation dans la lutte contre la variole (Bernoulli 1760). Même si la modélisation mathématique a longtemps été délaissée dans le domaine de l'épidémiologie vétérinaire (et médicale en général), elle est depuis quelques années, très utilisée et développée. Les modèles mathématiques sont d'un grand intérêt pour l'épidémiologie des maladies, infectieuses ou non (Sabatier et al. 2005). Ils permettent de décrire des données complexes, d'expliquer la diffusion d'épidémies, d'estimer des paramètres inobservables à l'œil nu. La modélisation dynamique permet de prévoir l'évolution d'une épidémie et en ce qui nous concerne d'optimiser des plans de contrôles des maladies (Valleron 2000).

Il existe différents types de modèles dynamiques (Vynnycky et White 2010):

Déterministe VS stochastique

- Un modèle déterministe décrit ce qu'il se passe dans une population en moyenne. Les paramètres d'entrée sont fixes et les prédictions sont alors prédéterminées. Chaque simulation donnera le même résultat.

- Un modèle stochastique prend en compte le hasard. Les paramètres d'entrée sont tirés au sort dans une loi de distribution. Chaque simulation donnera un résultat différent permettant alors d'estimer la variabilité des situations.

A compartiment VS individu-centré

- Dans un modèle à compartiments, les individus de la population sont répartis en classes homogènes en fonction de leurs caractéristiques. La caractéristique principale est l'état de santé des individus (Figure 10).

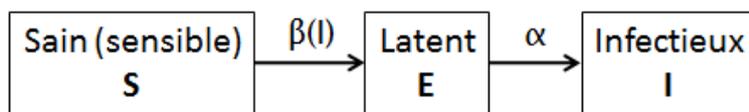


Figure 10 : Exemple d'un modèle à trois compartiments S (Sensible), E (Infecté mais non infectieux) et I (Infectieux)

β est le taux de transmission de l'infection (c'est-à-dire le taux de contact nécessaire à la transmission de l'infection) entre les individus S et les individus I. α est le coefficient de transition du compartiment E au compartiment I. La transition de S à E (et donc le risque d'infection) dépend du nombre d'animaux infectieux présents dans la population.

- Dans un modèle individu centré, les individus et leurs caractéristiques sont représentés individuellement et non regroupés en classes.

b. Le modèle utilisé (Bekara et al. 2014) et sa mise à jour

Un modèle dynamique de transmission intra-élevage de la tuberculose bovine en France a été développé dans l'unité EPI par Mohammed El Amine Bekara durant sa thèse (Bekara, 2014). L'objectif de ce travail de thèse était d'évaluer l'impact des pratiques d'élevage et des mesures de dépistage et de contrôle de l'infection sur la dynamique de l'infection intra-élevage entre 1965 et 2000. A cette époque, toutes les confirmations d'infection entraînaient un abattage total. Le modèle a donc été adapté au contexte de 2017. Les stratégies d'abattage partiel ont été codées, avec l'aide de Benoit Durand et Mathilde Saccareau.

Description générale du modèle

Le modèle simule l'évolution de l'infection dans un élevage bovin à partir de l'introduction d'un animal infecté et jusqu'à l'assainissement de l'infection.

Il s'agit d'un modèle stochastique à compartiments et à temps discret, le pas de temps étant le mois. L'élevage étudié est un élevage allaitant. Chaque bovin est défini par son âge et son état de santé :

- S (sensible) : l'animal est sain
- E (latent) : l'animal est infecté mais ne présente pas encore de lésions et n'excrète pas la bactérie
- I (infectieux) : l'animal est infecté, porteur de lésions et excrète la bactérie

Les animaux d'un troupeau sont répartis en lots selon leur âge, un lot pouvant contenir plusieurs âges. En pratique, ces lots sont séparés (pâtures voire bâtiments différents). Trois processus constituent le modèle (bilan en Figure 11) :

1. Processus infectieux

- Les animaux naissent dans l'état S. L'hypothèse a été faite que l'infection ne se transmettait qu'entre animaux d'un même lot. Elle se propage néanmoins entre les lots via le passage des animaux d'un lot à l'autre (voir processus démographique).

- Le taux de transmission de l'infection β détermine le passage de l'état S à l'état E. Il dépend du mois de l'année car les conditions d'entretien des animaux changent en fonction des saisons : β est plus grand lorsque les animaux sont à l'étable (contact augmenté) que lorsqu'ils sont au pâturage.
- Le coefficient de transmission α détermine le passage de l'état E à l'état I. Il est l'inverse de la durée moyenne passée dans l'état E (Bekara 2014).

2. Processus de dépistage et d'assainissement

Mesures représentées

On distingue la surveillance (dépistage ou prophylaxie, qui peut entraîner un APMS si un animal réagit ou si une lésion évocatrice de tuberculose bovine est détectée à l'abattoir) de l'assainissement (à partir de l'APDI). Le processus de dépistage et d'assainissement permet de représenter les mesures de surveillance et de gestion mises en œuvre : tests ante-mortem (ID, IFG, sérologie), abattages diagnostiques en surveillance, abattages sanitaires en assainissement, et tests post mortem (inspection, PCR, culture, histologie).

Animaux détectables

Par définition, les animaux E sont infectés et sensibilisés mais ne présentent pas encore de lésions et n'excrètent pas la bactérie. Ils sont alors détectables à l'ID, à l'IFG et à la sérologie. Ils ne sont détectables ni à l'inspection, ni aux tests de confirmation (culture, PCR, histologie). Les animaux I sont détectables à tous les tests.

3. Processus démographique

Les animaux représentés dans le modèle sont les femelles impliquées dans le renouvellement du troupeau et la reproduction d'un troupeau allaitant. Les animaux sont répartis en lots selon leur âge. Le troupeau représenté est un troupeau fermé en auto-renouvellement (pas d'achats ni de ventes d'animaux pour l'élevage).

Trois événements constituent ce processus démographique :

- (i) Les naissances : dans le modèle, on a considéré que les naissances permettaient de remplacer chaque animal abattu. La taille du troupeau est donc constante tout au long de l'assainissement.
- (ii) Les réformes, c'est-à-dire les sorties d'animaux pour l'abattoir : le taux de réforme μ dépend du lot d'animaux et de la saison. L'âge minimum de réforme est en effet de 4 ans et les réformes sont regroupées entre Janvier et Mars.
- (iii) Le changement de lot via le vieillissement des animaux.

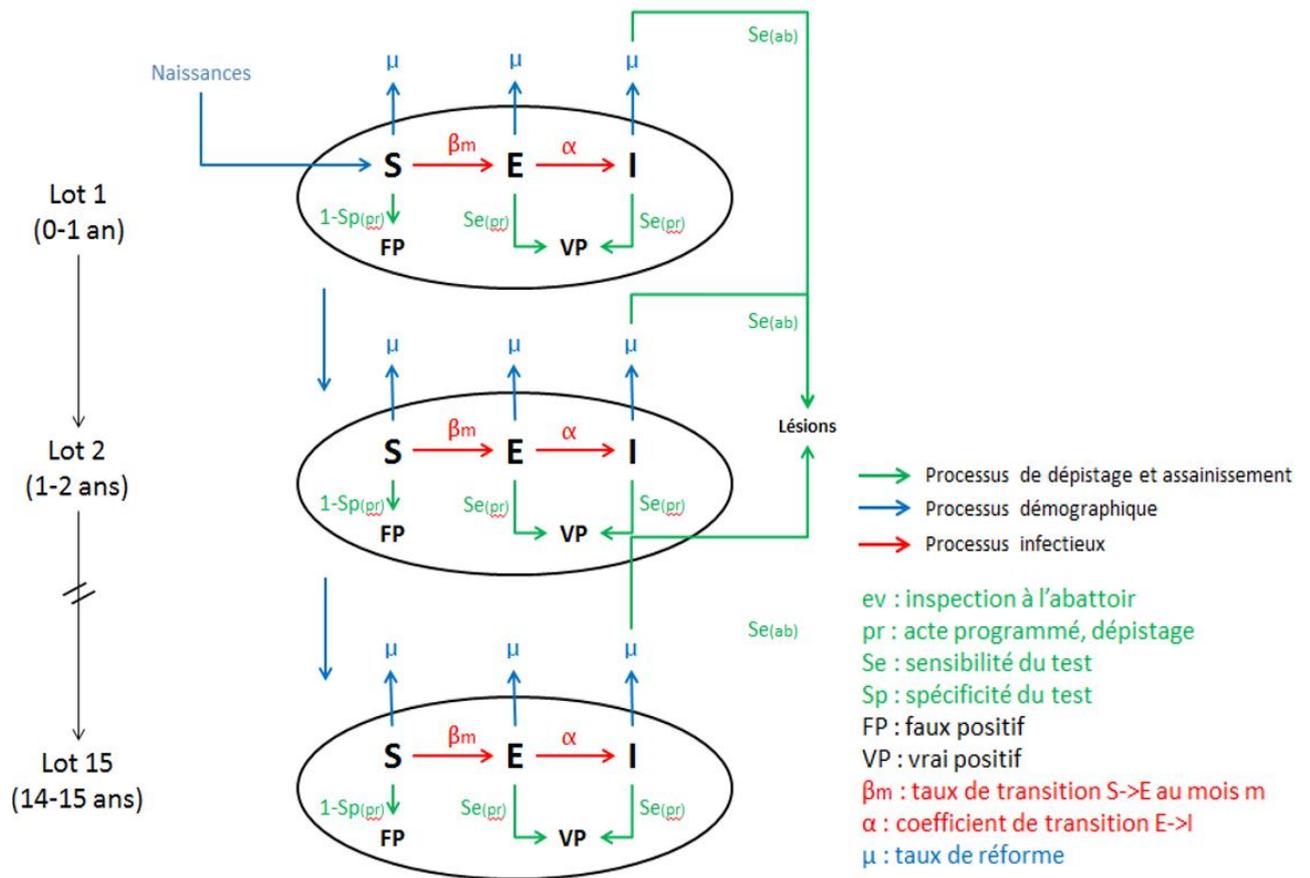


Figure 11 : Bilan du fonctionnement du modèle (d'après Bekara 2014)

Paramètres estimés et fixés

Les paramètres de transmission de l'infection (α et β) ont été estimés par A. Bekara dans sa thèse. D'autres paramètres ont en revanche été fixés :

Caractéristiques des lots

Les animaux sont répartis en 3 lots selon les pratiques d'élevages en système allaitant (Bekara 2014) :

- Lot 1 : génisses de 1 an
- Lot 2 : génisses de 2 à 3 ans, mises à la reproduction
- Lot 3 : vaches allaitantes et génisses sous la mère

Sensibilités et spécificités des tests

Les sensibilités et spécificités des tests ont été fixées d'après la littérature et le LNR de Maisons-Alfort. Elles sont présentées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Sensibilités et spécificités des tests utilisées dans le modèle

Test	Sensibilité (médiane et [IC 95%])	Spécificité (médiane et [IC 95%])	Référence
IDS	0,81 [0,53 ; 0,94]	0,91 [0,63 ; 1,00]	Nuñez-Garcia et al. 2017
IDC	0,75 [0,61 ; 0,86]	1 [0,99 ; 1,00]	Nuñez-Garcia et al. 2017
IFG bovine and avian PPD	0,70 [0,55 ; 0,92]	0,94 [0,88 ; 0,97]	Nuñez-Garcia et al. 2017
IFG ESAT6	0,79 [0,64 ; 0,89]	0,99 [0,98 ; 1,00]	Nuñez-Garcia et al. 2017
Sérologie	0,60 [0,31 ; 0,86]	0,93 [0,84 ; 0,97]	Nuñez-Garcia et al. 2017
PCR	0,86 [0,65 ; 0,96]	1 [1,00 ; 1,00]	Nuñez-Garcia et al. 2017
PCR LNR	1	1	M-L Boschioli, LNR
Histologie	0,66 [0,41 ; 0,84]	1 [0,95 ; 1,00]	Nuñez-Garcia et al. 2017
Culture	0,74 [0,46 ; 0,94]	1 [0,73 ; 1,00]	Nuñez-Garcia et al. 2017
Inspection classique	0,71 [0,37 ; 0,92]	1 [0,99 ; 1,00]	Nuñez-Garcia et al. 2017
Inspection renforcée	0,96 [0,82 ; 1,00]	1 [0,99 ; 1,00]	Nuñez-Garcia et al. 2017

Age minimal des animaux testés

Réglementairement, tous les animaux de plus de six semaines devraient être testés (NS DGAL/SDSPA 2014-541). Néanmoins, sur le terrain, les animaux de moins d'un an ne sont pas soumis au test de l'IFG. Comme la plupart des protocoles que nous avons testés impliquent l'IFG, nous avons fixé l'âge minimal des animaux testés à un an.

Dynamique de population

Elle est caractérisée par les paramètres présentés dans le tableau 6. L'effectif du troupeau et le taux de réforme ont été modifiés afin de représenter un troupeau allaitant typique de 2017. Nous avons défini une moyenne de 141 bovins par troupeau. Pour cela, nous avons utilisé le nombre moyen de vaches allaitantes par élevage en France soit 44,3 vaches (Agreste, statistique agricole annuelle 2017; Institut de l'élevage et CNE 2015). La dynamique classique d'un troupeau allaitant (dépendant du taux de réforme et de l'âge minimal de réforme) implémentée dans le modèle a ensuite permis de déterminer l'effectif moyen des troupeaux allaitant en France.

Tableau 6 : Bilan des paramètres fixés

Paramètre fixé	Valeur	Source
Effectif total de l'élevage	141 animaux	Agreste, statistique agricole annuelle 2017 ; Institut de l'élevage et CNE 2015 ; Bekara 2014
Age maximal	15 ans	Bekara 2014
Période de stabulation	Novembre à Mars	Bekara 2014
Taux de réforme annuel	35%	Roche et al. 2001, INRA
Age minimal de réforme	4 ans	Bekara 2014
Période de réforme	Janvier à mars	Bekara 2014

Protocoles de surveillance et d'assainissement

Ils sont les principaux paramètres que l'on fixe au début de chaque simulation. Nous détaillons ces différents protocoles dans la partie ci-dessous.

2) Les protocoles de surveillance et d'assainissement, paramètres du modèle

On appelle « **protocole de surveillance** » la combinaison de tests allant du début de la prophylaxie à l'infirmité ou la confirmation d'une suspicion. Ce protocole de surveillance comprend i) la surveillance programmée, dans notre cas une prophylaxie annuelle (IDS ou IDC) réalisée en élevage, ii) la surveillance événementielle, c'est-à-dire l'inspection systématique des animaux à l'abattoir et iii) en cas de suspicion de l'infection, une série de tests visant à infirmer ou confirmer la suspicion.

Lorsqu'il y a confirmation (cf. définition animal **infecté p.10**), l'APDI est déclaré et le « **protocole d'assainissement** » est mis en place, jusqu'à la requalification de l'élevage (Figure 12).

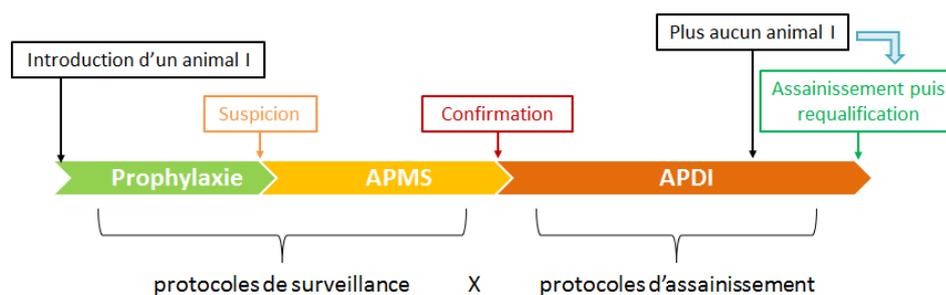


Figure 12 : Déroulement des mesures de gestion

a. Surveillance

Nous avons codé deux protocoles de surveillance, sur la base de la NS DGAL/SDSPA 2016-1001, qui différencie les cas où la suspicion est forte et ceux où elle est faible (Figure 13).

- Si la suspicion est forte, tous les animaux réagissant sont abattus. Si au moins un animal est positif, l'infection est confirmée. Sinon, le troupeau est reconstrôlé et les réagissants sont de nouveau abattus.
- Si la suspicion est faible, la levée ou la confirmation de la suspicion peut suivre deux schémas diagnostiques :
 - La voie « rapide » où l'on fait l'abattage diagnostique de tous les animaux réagissant,
 - La voie « conservatoire » qui consiste au reconstrôlé des animaux réagissant. C'est cette voie que nous avons étudiée ici pour la gestion des suspicions faibles, en raison de sa plus grande fréquence d'application (Communication personnelle 2017 : F. Chevalier, référent national tuberculose bovine).

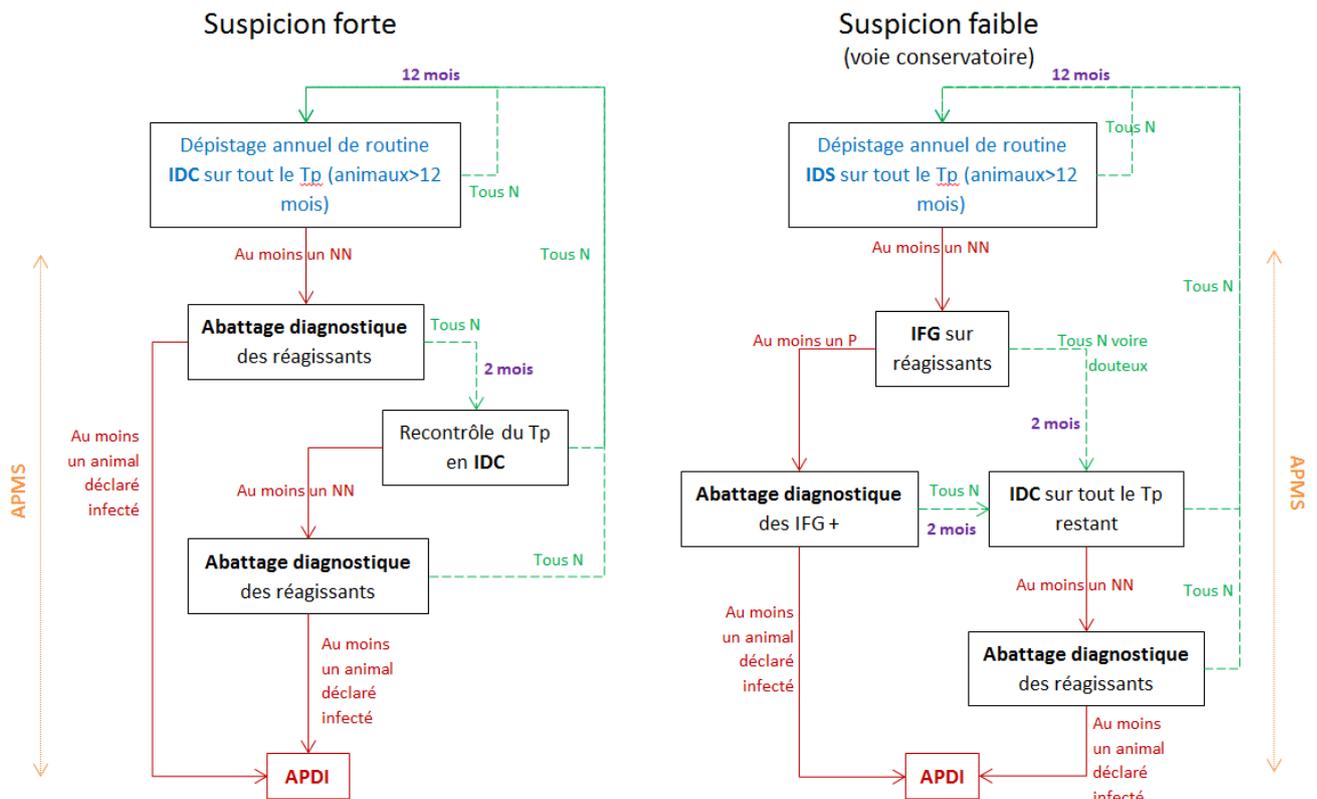


Figure 13 : Protocoles de surveillance modélisés (d'après NS DGAL/SDSPA 2016-1001)

N = négatif, NN = non négatif, P = positif, Tp = Troupeau

b. Assainissement

Le but du travail est de comparer différents protocoles d'abattage partiel d'un point de vue de leur efficacité épidémiologique, de leurs coûts et de leur acceptabilité sociale. Les 11 protocoles étudiés peuvent être regroupés en trois catégories : les protocoles officiels, les protocoles observés sur le terrain, et de nouveaux protocoles que l'on a voulu tester (Figure 14).

Des protocoles officiels

Un seul protocole est décrit dans la note de service 2014-541 (deux combinaisons IDS+IFG+sérologie à deux mois d'intervalle, suivis d'une IDC deux mois plus tard). Il existe cependant des variantes, tolérées par la réglementation, d'où la pluralité des protocoles dits « officiels ».

La NS DGAL/SDSPA 2014-541 présente un protocole utilisant l'IDS. Lorsque la prophylaxie s'effectue en IDC (suspicion forte, voir protocole de surveillance ci-dessus), on peut remplacer les IDS du protocole par des IDC (donnant alors un protocole avec deux IDC+IFG+sérologie à deux mois d'intervalle, suivis d'une IDC deux mois plus tard). Cette modification concernerait environ 50% des élevages concernés par l'abattage partiel (communication personnelle 2017 : F. Chevalier, référent national tuberculose bovine). C'est pourquoi nous avons représenté deux protocoles « Officiels », le premier en IDS et le second en IDC.

La NS DGAL/SDSPA 2014-541 indique que tous les animaux non négatifs à l'un des tests du contrôle doivent être abattus. Or l'un des résultats non négatifs est le résultat « non conclusif » de l'IFG (voir section « Le test de dosage à l'interféron γ » et l'annexe III de la NS DGAL/SDSPA 2014-864). Cependant, il a été montré que très peu d'élevages inclus dans le protocole abattent effectivement les animaux non conclusifs au test de l'IFG, plus de 80% des animaux réagissant mais

épargnés (à l'encontre de la note de service donc) étant des animaux uniquement non conclusifs au test de l'IFG (Poirier 2017). Ainsi, nous avons représenté quatre protocoles « officiels » :

- Les deux premiers où les animaux non-conclusifs (NC) sont effectivement abattus, notés « **Officiel IDS, NC abattus** » et « **Officiel IDC, NC abattus** »
- Les deux derniers où les animaux NC ne sont pas abattus, notés « **Officiel IDS** » et « **Officiel IDC** ».

Dans tous les autres protocoles testés, les animaux NC à l'IFG ne sont pas abattus.

Des protocoles observés sur le terrain

Les protocoles « Terrain » ont été construits selon les résultats du travail de Valentine Poirier sur la typologie des élevages en abattage partiel (2017). Elle a montré que dans les élevages ayant fait l'objet d'un abattage sélectif entre Juillet 2014 et Janvier 2017, l'intervalle inter-contrôles théoriquement de 2 mois était de 102 jours en médiane et que le délai d'abattage des animaux réagissant (fixé à 10 jours maximum dans la note de service) était de 47 jours en médiane (Poirier 2017). Etant donné que le pas de temps du modèle est le mois, nous avons proposé deux protocoles « Terrain », respectivement nommés « **Terrain IDC** » et « **Terrain IDS** » selon le type d'ID utilisé, avec un intervalle inter-contrôles de trois mois et un délai d'abattage des animaux de deux mois.

De nouveaux protocoles

Différents paramètres du protocole ont été modifiés par rapport au schéma officiel : les délais inter-contrôles (6 mois au lieu de deux mois), le nombre de contrôles nécessaires à la requalification (2 ou 4 contrôles à la place de trois) et le type de test utilisé (IDC seule à la place d'IDS+IFG+sérologie). Au final, cinq protocoles « Test » ont été étudiés :

- i) « **3 contrôles/6-2 mois d'intervalle** »,
- ii) « **3 contrôles/2-6 mois d'intervalle** »,
- iii) « **4 contrôles/2 mois d'intervalle** »,
- iv) « **2 contrôles/6 mois d'intervalle** »,
- v) « **IDC seulement** ».

NB : Le protocole « 3 contrôles/2-6 mois » a été codé pour évaluer l'impact de l'allongement du délai entre les deux derniers contrôles. En effet, il est parfois dit que ce dernier test IDC (ou test de requalification) devrait être le plus long possible pour permettre de détecter tous les animaux qui n'auraient pas réagi aux deux premiers car testés trop précocement.

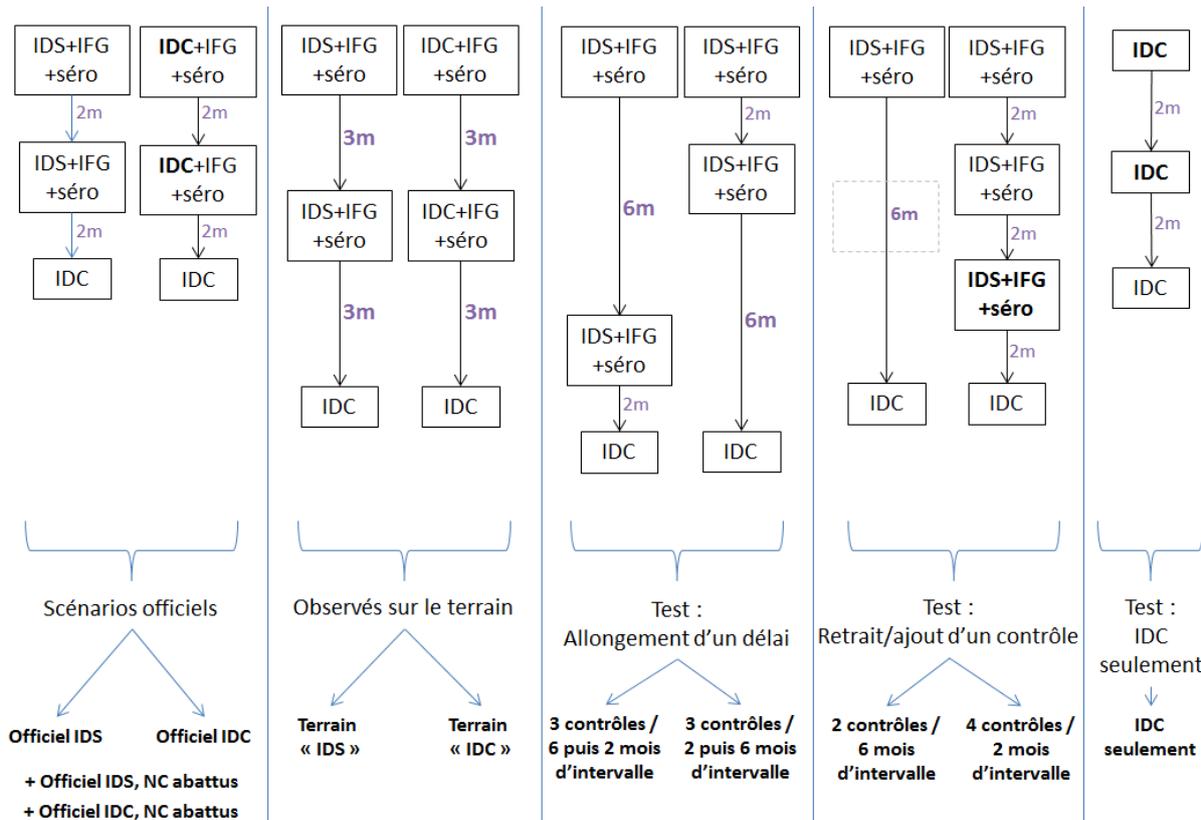


Figure 14 : Bilan des 11 protocoles d'abattage partiel modélisés

Conditions initiales et d'arrêt des simulations

Celles-ci sont fixées. On introduit à t=0 un animal infecté dans un lot tiré au sort d'un troupeau entièrement sensible. La simulation s'arrête lorsque deux critères sont remplis : tous les animaux doivent être sains et l'élevage doit être considéré comme requalifié.

3) Plan d'expérience

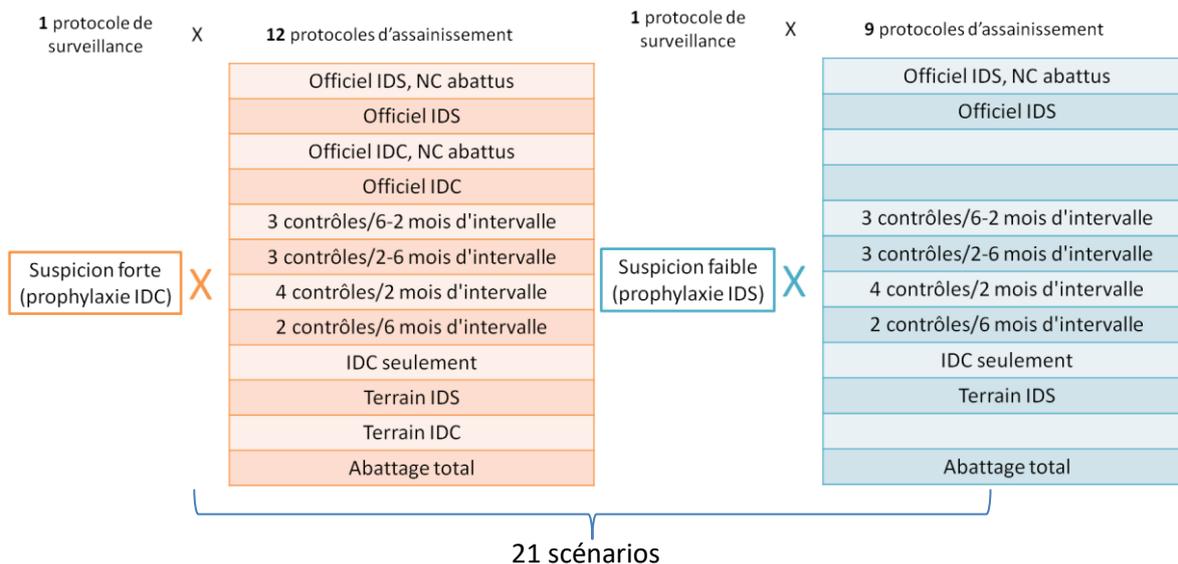


Figure 15 : Plan d'expérience suivi

Le modèle simule la propagation de la tuberculose, de son introduction dans l'élevage à l'assainissement de cet élevage. Il représente donc la surveillance et l'assainissement. Nous avons 2 protocoles de surveillance que nous avons combinés avec plusieurs protocoles d'assainissement : 12 pour le premier (suspicion forte), et 9 pour le deuxième (suspicion faible). Cette différence est due au fait que les protocoles d'assainissement officiels et terrains utilisant l'IDC ne sont réalisés que lorsque la surveillance est en IDC (donc en suspicion forte). 21 scénarios ont donc été simulés.

4) Indicateurs calculés

L'objectif de ce travail étant de comparer différentes stratégies d'assainissement par abattage partiel, tous les indicateurs ont été calculés à partir de la mise en place de l'APDI. Les simulations sans APDI (c'est-à-dire celles pour lesquelles l'infection est passée inaperçue et l'élevage s'est assaini par simple réforme du ou des bovins infectés) n'ont pas été conservées. Toutes les simulations ici présentent donc au moins un APDI et une requalification et parfois même plusieurs APDI et requalifications (en cas de requalification à tort, la simulation continue jusqu'à la requalification finale, celle pour laquelle il n'y a plus d'animaux infectés dans l'élevage, i.e. tous les animaux sont dans l'état de santé « S »).

a. Point de vue de l'épidémiologiste : l'efficacité

Probabilité qu'un élevage soit requalifié à tort

Pour évaluer l'efficacité épidémiologique des différents scénarios, nous avons calculé la **probabilité qu'un élevage soit requalifié à tort**, c'est-à-dire qu'il soit considéré comme assaini alors qu'il reste des animaux infectés (animaux latents E ou infectieux I) non détectés dans le troupeau. La requalification à tort témoigne d'une défaillance du système de dépistage des animaux infectés et de leur élimination (défaut de sensibilité, animaux testés trop tôt, animaux non testés...), et donc de l'efficacité épidémiologique du protocole.

$$\begin{aligned} & \text{Probabilité qu'un élevage soit requalifié à tort} \\ &= \frac{\sum \text{Simulations avec au moins une requalification à tort}}{\sum \text{Simulations}} \end{aligned}$$

Efficacité = 1 - probabilité de requalifier à tort
--

Nombre d'animaux infectieux - mois

Cet indicateur permet de quantifier le risque de transmission de l'infection, autant aux élevages voisins (même si lors d'un abattage partiel, la biosécurité est renforcée pour éviter la contamination des élevages voisins), qu'à l'éleveur et au personnel de l'élevage. La durée d'infectiosité est la durée passée dans l'état I.

$$\boxed{\text{Nombre d'animaux I - mois} = \sum_i \text{durée totale d'infectiosité de l'animal } i}$$

b. Point de vue de l'Etat : les coûts

Les coûts étudiés sont ceux exclusivement indemnisés par l'Etat. Ils sont divisés en deux catégories :

Coûts éleveur = indemnisation des animaux abattus

Définition

Seule l'indemnisation des animaux abattus suite aux mesures de police sanitaire (abattages sanitaires) a été prise en compte. Les coûts de blocage n'étant pas exclusivement indemnisés par l'Etat (cf. section « Coûts pour l'éleveur ») et étant difficilement évaluables ont été exclus. La rémunération des experts, prise en charge par l'Etat, n'a également pas été comptabilisée dans les calculs de coûts. Les coûts d'indemnisation des animaux pour chaque classe d'âge ont été calculés grâce à plusieurs documents communiqués par les DD(CS)PP de Côte d'Or et de Dordogne :

- 1) Arrêtés préfectoraux : expertises pour l'estimation de chaque animal
- 2) Factures de l'abattoir : prix de revient de la viande pour chaque animal

Les documents de 3 élevages de Dordogne assainis en abattage partiel entre 2014 et 2015 et de 4 élevages de Côte d'Or assainis en abattage partiel entre 2016 et 2017 ont été étudiés. Au total, l'indemnisation des 197 animaux entrant dans nos critères (femelles destinées au renouvellement ou à la reproduction) a été prise en compte.

Nous avons regroupé les animaux en 6 classes d'âge pour lesquelles le prix d'indemnisation était sensiblement différent : les animaux de 0-1 an, 1-2 ans, 2-3 ans, 3-6 ans, 6-10 ans et 10-15 ans. Un prix moyen d'indemnisation par classe d'âge a alors été estimé. Des extractions BDNI ont été réalisées pour retrouver l'âge des animaux pour lesquels les dates de naissance n'étaient pas renseignées.

Calculs effectués et valeurs retenues

Le coût moyen d'indemnisation des animaux de chaque classe d'âge a été calculé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} & \text{Indemnisation animal } i \\ &= \text{estimation globale animal } i \text{ (rapport d'expertise)} - \text{valeur bouchère animal } i \text{ (factures abattoirs)} \\ & \text{Indemnisation moyenne pour la classe d'âge } j = \frac{\sum \text{indemnisations des animaux de la classe d'âge } j}{\text{Nombre d'animaux dans la classe d'âge } j} \end{aligned}$$

Les valeurs obtenues pour chacune des 6 classes d'âge sont présentées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Montant moyen calculé des indemnisations par classe d'âge

Classe d'âge	Indemnisation moyenne (€HT)
1 (0-1 an)	507
2 (1-2 ans)	712
3 (2-3 ans)	1232
4 (3-6 ans)	906
5 (6-10 ans)	758
6 (10-15 ans)	759

Ainsi, pour chaque simulation, le coût d'indemnisation total a été calculé en sommant les coûts d'indemnisation moyens des classes d'âge des animaux simulés abattus :

$$\sum_{j=1}^6 \text{nombre d'animaux de la classe } j \times \text{indemnisation moyenne pour la classe } j$$

Frais de laboratoire et vétérinaires = prise en charge des actes et analyses

Définition

Pour ces coûts, nous avons comptabilisé le nombre de tests réalisés et le nombre de visites vétérinaires effectuées pour chaque simulation, que nous avons multiplié par leurs prix moyens respectifs. Par exemple : IDS = Nombre d'IDS X prix moyen d'une IDS ; IFG = Nombre d'IFG X (prix de la prise de sang + prix de l'analyse), etc.

Le nombre de visites correspond au nombre de sessions de contrôle effectuées de l'APDI jusqu'à la requalification finale.

Prix moyens retenus

Les valeurs (Tableau 6) sont issues du Rapport CGAAER concernant les modalités de fixation des tarifs des prophylaxies animales (CGAAER 2015), des grilles tarifaires de deux laboratoires (LAPVSO Toulouse et Vet diagnostics Lyon), et de communications personnelles de deux laboratoires départementaux d'analyses (LDA Dordogne et LDA Côte d'Or).

Tableau 8 : Prix des actes vétérinaires et analyses laboratoires utilisés

Acte/Analyse	Prix moyen (€HT)	Sources
Visite vétérinaire	27,7	CGAAER 2015
Prise de sang	2,77	CGAAER 2015
IDS	2,77	CGAAER 2015
IDC	6,93	CGAAER 2015
IFG	50	Communication personnelle 2017 : LDA 24
Sérologie	12	Communication personnelle 2017 : LDA 24 et LDA21
PCR	50	Communication personnelle 2017 : LDA 24
Culture	50	Communication personnelle 2017 : LDA 24
Histologie	50	Grilles tarifaires LAPVSO, Vet diagnostics

Coût global

Le coût global pour l'Etat a été calculé en faisant la somme des deux indicateurs précédents.

Indemnisations à tort

Pourcentage d'animaux abattus étant sains

Il nous a paru intéressant d'évaluer combien d'animaux sains avaient été abattus suite à des abattages sanitaires. Ces animaux ont donc été abattus à tort et ainsi indemnisés à tort. Cet indicateur permet aussi d'évaluer l'efficacité du protocole, les animaux sains abattus étant victimes d'un défaut de spécificité des tests (faux positifs).

Nombre d'abattages sanitaires (AS)

Cet indicateur indique l'ensemble des animaux abattus suite à des mesures de police sanitaire sous APDI (abattages sanitaires). Il aide à l'interprétation de l'indicateur « pourcentage d'animaux abattus étant sains ».

c. Point de vue de l'éleveur : l'acceptabilité

Nombre total d'animaux abattus

Cet indicateur a été calculé pour évaluer le nombre d'animaux épargnés par rapport à un abattage total. Il compte tous les abattus entre le premier APDI et la dernière requalification, hors abattages zootechniques. Il inclut donc les abattages sanitaires réalisés sous APDI et les abattages diagnostiques réalisés pendant les éventuelles périodes de requalification à tort.

Nombre d'animaux abattus confirmés en culture

Un animal confirmé est un animal infecté, mais un animal non confirmé n'est pas forcément un animal sain. Cependant, le statut réel d'infection des animaux abattus n'est pas connu. Le peu d'animaux abattus confirmés est vu le plus souvent par les éleveurs comme un trop grand nombre d'animaux « abattus pour rien », ce qui est l'une de leurs plus grandes sources de frustration.

Durée d'assainissement totale

C'est la durée totale, du premier APDI à la dernière requalification. Cet indicateur représente la durée totale nécessaire pour se débarrasser réellement de l'infection et être requalifié. Il inclut les périodes de requalifications à tort.

Durée sous APDI stricte

Cet indicateur ne comprend que les durées passées sous APDI, strictement. On peut qualifier ces périodes comme durées de blocage de l'élevage.

Durée passée sous APDI à tort

C'est la durée entre l'abattage du dernier animal infecté et la requalification.

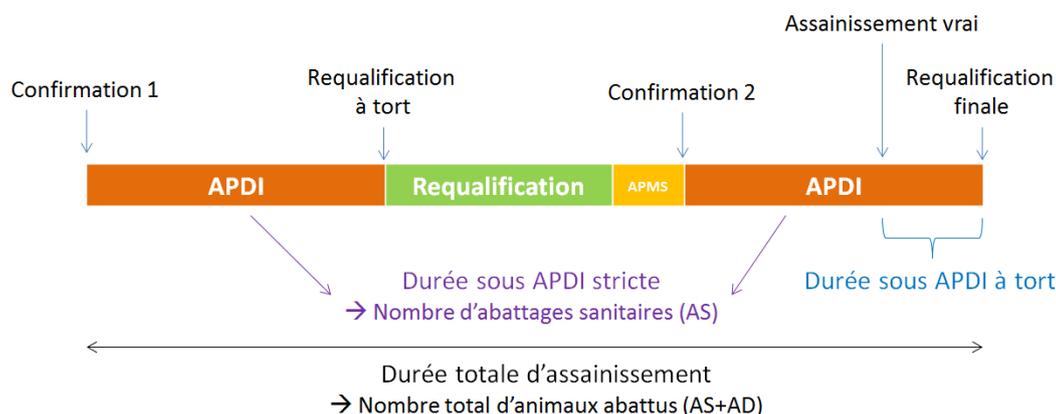


Figure 16 : Illustration des différents nombres d'animaux abattus et des différentes durées

Pourcentage d'abandon

L'acceptabilité des mesures par les éleveurs est une notion difficile à évaluer sans enquête sociologique. Nous nous sommes donc basés sur les recommandations de la NS DGAL/SDSPA 2014-541, les communications du référent national, ainsi que sur des données terrain (Poirier 2017).

L'acceptabilité a été évaluée pour chaque scénario via le **pourcentage de simulations pour lesquelles l'élevage aurait abandonné l'abattage partiel** pour finir l'assainissement en abattage total. Pour déterminer ce pourcentage, nous avons considéré que l'élevage serait passé en abattage total si :

(i) Le nombre d'animaux confirmés était supérieur à 3

On parle ici des animaux abattus, pour lesquels la culture rend un résultat positif. La note de service donne pour information un nombre maximal d'animaux confirmés en culture au-delà duquel il serait préférable d'abandonner l'abattage partiel pour passer en abattage total : 3 bovins ou 5 % du cheptel.

(ii) Et/ou si la durée de l'APDI était supérieure à 26 mois

En moyenne, 10 % des élevages abandonnent l'abattage partiel (Poirier 2017). Nous avons considéré que parmi ces 10%, la moitié abandonnait à cause d'une durée passée sous APDI trop importante. Nous avons donc utilisé le percentile à 95% des durées passées sous APDI pour le scénario « Terrain IDS » comme seuil, soit 26 mois. Le référent national tuberculose bovine nous avait communiqué un seuil moyen d'une vingtaine de mois, ce qui est cohérent.

d. Calcul des indicateurs pour chaque scénario

Pour chaque scénario, 1000 simulations présentant au moins un APDI ont été réalisées. Les indicateurs présentés, lorsque ce ne sont pas des pourcentages, sont les médianes et les percentiles à 2,5% et à 97,5% des indicateurs calculés sur l'ensemble des 1000 simulations.

5) Analyse des résultats

Les résultats sont présentés par protocole d'assainissement et pour chaque protocole de surveillance. Ainsi, dans une première partie sont présentés les 12 protocoles d'assainissement faisant suite au protocole de surveillance « suspicion forte » et dans la seconde partie les 9 protocoles d'assainissement faisant suite au protocole de surveillance « suspicion faible ».

Dans chaque partie, nous exposerons les valeurs de tous les indicateurs calculés puis nous représenterons graphiquement trois indicateurs clé :

- a. Efficacité : **la probabilité qu'un élevage soit requalifié à tort**
- b. Coûts : **le coût global pour l'Etat** (frais de laboratoire et vétérinaires, indemnités)
- c. Acceptabilité : **le pourcentage d'abandon du protocole d'abattage partiel**

Enfin, les différents protocoles d'assainissement seront classés selon ces trois indicateurs clé. Cela vous permettra de voir si le protocole de surveillance impacte le classement des schémas d'assainissement.

Partie III : Résultats

1) Suspicion forte

a. Valeurs des indicateurs calculés

Efficacité épidémiologique

Les valeurs des indicateurs d'efficacité pour chaque scénario sont présentées dans le tableau 9.

Tableau 9 : Indicateurs d'efficacité pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion forte »

Protocole d'assainissement	Probabilité de requalifier à tort (%)	Nombre d'animaux infectieux-mois Médiane et [percentiles à 2,5% et 97,5%]
Officiel IDS, NC abattus	4	1 [0-45]
Officiel IDS	7,3	2 [0-92]
Officiel IDC, NC abattus	8,0	1 [0-86]
Officiel IDC	8,3	2 [0-80]
Terrain IDS	3,1	2 [0-68]
Terrain IDC	3,6	1 [0-70]
3 contrôles/6-2 mois d'intervalle	0,5	1 [0-24]
3 contrôles/2-6 mois d'intervalle	1,4	1 [0-50]
4 contrôles/2 mois d'intervalle	5,0	2 [0-52]
2 contrôles/6 mois d'intervalle	4,4	1 [0-54]
IDC seulement	7,5	2 [0-65]
Abattage total	0	0

Parmi les scénarios d'abattage partiel, le « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » est le plus efficace avec un risque de requalification à tort de 0,5%. Les scénarios les moins efficaces sont « Officiel IDC, NC abattus » et « Officiel IDC » avec 8,0% et 8,3% de risque de requalifier à tort.

Quel que soit le scénario, le nombre d'animaux infectieux-mois reste faible (1 ou 2 en médiane). Rappelons que les animaux infectieux-mois n'ont été comptabilisés qu'à partir de la confirmation de l'infection (déclaration d'APDI).

Coûts pour l'Etat

Les valeurs des indicateurs de coûts pour chaque scénario sont présentées dans le tableau 10.

Tableau 10 : Indicateurs de coûts pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion forte »
Médiane et [percentiles à 2,5% et 97,5%]

Protocoles d'assainissement	Coûts labo/véto (K€ HT)	Coûts indemnisations (K€ HT)	Total (K€ HT)	Nombre d'abattages sanitaires	Pourcentage d'abattus étant sains
Officiel IDS, NC abattus	32,8 [18-109]	70,7 [36-202]	103 [55-306]	78 [40-241]	100 [89-100]
Officiel IDS	20,1 [18-55]	35,6 [23-102]	56 [41-158]	39 [25-107]	100 [83-100]
Officiel IDC, NC abattus	20,7 [18-58]	31,7 [21-89]	52,5 [40-147]	35 [23-94]	100 [80-100]
Officiel IDC	20,3 [18-63]	18,4 [9-62]	40 [27-131]	20 [10-66]	100 [69-100]
Terrain IDS	20,2 [18-64]	36,1 [23-106]	57,7 [40-169]	40 [22-120]	100 [83-100]
Terrain IDC	20,1 [17-66]	18,2 [9-64]	38,6 [27-128]	20 [10-73]	100 [68-100]
3 contrôles/6-2 mois d'intervalle	20,4 [17-55]	35,3 [23-89]	55,7 [41-144]	39 [25-101]	100 [86-100]
3 contrôles/2-6 mois d'intervalle	20,2 [18-57]	36,0 [24-95]	56,9 [42-151]	40 [26-101]	100 [83-100]
4 contrôles/2 mois d'intervalle	27,1 [23-68]	46,0 [34-115]	73,2 [58-182]	50 [37-127]	100 [88-100]
2 contrôles/6 mois d'intervalle	11,2 [9-41]	20,3 [10-68]	31,6 [20-106]	22 [11-74]	100 [79-100]
IDC seulement	2,7 [2-10]	0,0 [0-12]	2,7 [2-21]	0 [0-12]	0,0 [0-0]
Abattage total	0 [0-1]	120 [115-125]	120 [115-125]	141	100 [94-100]

L'abattage total est le scénario le plus cher avec un coût total médian de 120 K€ HT. Le scénario « Officiel IDS, NC abattus », est le plus cher des abattages partiels avec un coût total médian de 103 K€ HT.

Le scénario le plus économique est le « IDC seulement » avec un coût total médian de 2,7 K€ HT. En effet, très peu d'animaux ont été abattus (nombre d'abattages sanitaires médian de 0). De plus, ce scénario n'utilise pas du tout d'IFG qui est un test de dépistage cher.

Quel que soit le scénario, la médiane du pourcentage d'animaux abattus étant sains est de 100%, sauf pour le scénario « IDC seulement » (l'IDC étant supposée parfaitement spécifique, il n'est pas possible dans ce scénario d'abattre un animal non infecté).

Acceptabilité des éleveurs

Les valeurs des indicateurs d'acceptabilité sont présentées dans le tableau 11.

Tableau 11 : Indicateurs d'acceptabilité pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion forte »
Médiane et [percentiles à 2,5% et 97,5%]

Protocoles d'assainissement	Nombre total d'animaux abattus jusqu'à l'assainissement	Nombre d'animaux confirmés	Durée totale de l'assainissement (mois)	Durée sous APDI stricte (mois)	Durée sous APDI à tort (mois)	Nombre de visites	Pourcentage d'abandon (%)
Officiel IDS, NC abattus	78 [40-244]	0 [0-6]	10 [6-34]	10 [6-28]	10 [6-26]	5 [3-14]	10,1
Officiel IDS	39 [25-119]	0 [0-6]	6 [6-32]	6 [6-11]	6 [4-7]	3 [3-9]	10,7
Officiel IDC, NC abattus	35 [23-103]	0 [0-7]	6 [6-32]	6 [6-10]	6 [6-7]	3 [3-8]	10,8
Officiel IDC	20 [10-74]	0 [0-7]	7 [6-32]	7 [6-11]	6 [5-7]	3 [3-9]	11,3
Terrain IDS	40 [25-121]	0 [0-10]	9 [8-33]	8,5 [8-24]	8 [4-9]	3 [3-9]	12,7
Terrain IDC	20 [10-77]	0 [0-12]	8 [8-34]	8 [8-24]	8 [7-9]	3 [3-9]	12,8
3 contrôles/6-2 mois d'intervalle	44 [30-108]	0 [0-5]	10 [10-24]	10 [10-23]	10 [8-11]	3 [3-8]	5,7
3 contrôles/2-6 mois d'intervalle	40 [26-111]	0 [0-6]	10 [10-26]	10 [10-25]	10 [8-11]	3 [3-8]	8,5
4 contrôles/2 mois d'intervalle	55 [42-138]	0 [0-6]	8 [8-33]	8 [8-20]	8 [6-9]	4 [4-10]	9,6
2 contrôles/6 mois d'intervalle	27 [16-89]	0 [0-6]	8 [8-33]	8 [8-20]	8 [6-9]	2 [2-6]	7,8
IDC seulement	6 [3-29]	0 [0-6]	7 [6-33]	6 [6-18]	6 [6-6]	3 [3-10]	12,8
Abattage total	141	0 [0-4]	/	/	/	/	/

Le scénario « Officiel IDS, NC abattus » abat le plus d'animaux (après l'abattage total) avec une médiane de 78 animaux. Il est suivi du scénario « 4 contrôles/2 mois d'intervalle » (médiane : 55 bovins). Le scénario abattant le moins d'animaux est le « IDC seulement » avec une médiane de 6 bovins. Les scénarios « Officiel IDC » et « Terrain IDC » sont ex-aequo avec une médiane à 20 animaux abattus. Tous les autres scénarios (sauf « 2 contrôles/6 mois d'intervalle ») abattent entre 35 et 44 animaux en médiane, ce qui est proche.

Les médianes du nombre d'animaux confirmés sont nulles quel que soit le scénario. Rappelons que très peu d'animaux sont infectieux (nombre d'animaux infectieux-mois) et que la grande majorité des abattus sont sains (pourcentage d'abattus étant sains).

La durée totale d'assainissement varie entre 6 mois en médiane (scénarios « Officiel IDS » et « Officiel IDC, NC abattus ») et 10 mois. En abattage total, le délai d'abattage réglementaire est de 30 jours (NS DGAL/SDSPA 2016-1001). Il faut cependant ajouter à cela le nettoyage-désinfection, le repeuplement, et la réalisation des tests sur les nouveaux animaux pour réobtenir la qualification. Cette durée est donc difficilement comparable à celle des abattages partiels.

La durée médiane sous APDI stricte ne diffère de la durée totale d'assainissement médiane que dans 2 cas : pour le scénario « Terrain IDS », de seulement 2 semaines (médiane de 8,5 mois par rapport à 9 mois) et pour le scénario « IDC seulement », de seulement un mois (médiane de 6 mois par rapport à 7 mois). En effet, dans la plupart des cas, il n'y a pas de périodes de requalification à tort. Cependant, en comparant les percentiles à 97,5%, on remarque que ces deux durées peuvent différer jusqu'à 21 mois pour les scénarios « Officiel IDS » et « Officiel IDC ». Ainsi, les requalifications à tort sont rares, mais lorsqu'elles ont lieu, elles durent longtemps (entre 6 et 21 mois), sauf pour les deux scénarios « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » et « 3 contrôles/2-6 mois d'intervalle » où la différence n'est que d'un mois.

Les durées passées sous APDI à tort sont pour la plupart égales aux durées totales d'assainissement. La quasi-totalité des APDI ont donc été déclarés alors que le troupeau était déjà assaini (les animaux infectés avaient été abattus lors de l'APMS). Seuls les scénarios « Officiel IDC », « Terrain IDS » et « IDC seulement » présentent des différences d'un mois.

Le nombre médian de visites (ou sessions de contrôles) montre que la plupart des élevages sont assainis avec le nombre de sessions de contrôle prévu initialement. Néanmoins, dans certains cas, le nombre de visites requis est important (97.5^{ème} percentile de 6 visites et plus pour tous les scénarios). Le scénario « Officiel IDS, NC abattus » est une exception avec un nombre de visites médian de 5, alors que le protocole n'en prévoit que 3. Soit il y a des périodes de requalification à tort, soit ce scénario engendre plus de « contrôles défavorables ».

Le scénario « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » est le plus acceptable avec seulement 5,7% d'abandon. Les scénarios les moins acceptables sont « IDC seulement » et « Terrain IDC » avec 12,8% d'abandon.

b. Représentation graphique de trois indicateurs clé

L'efficacité des scénarios en fonction de leur coût global est présentée figure 17. Le pourcentage d'abandon est indiqué sous forme d'étiquette pour chaque scénario.

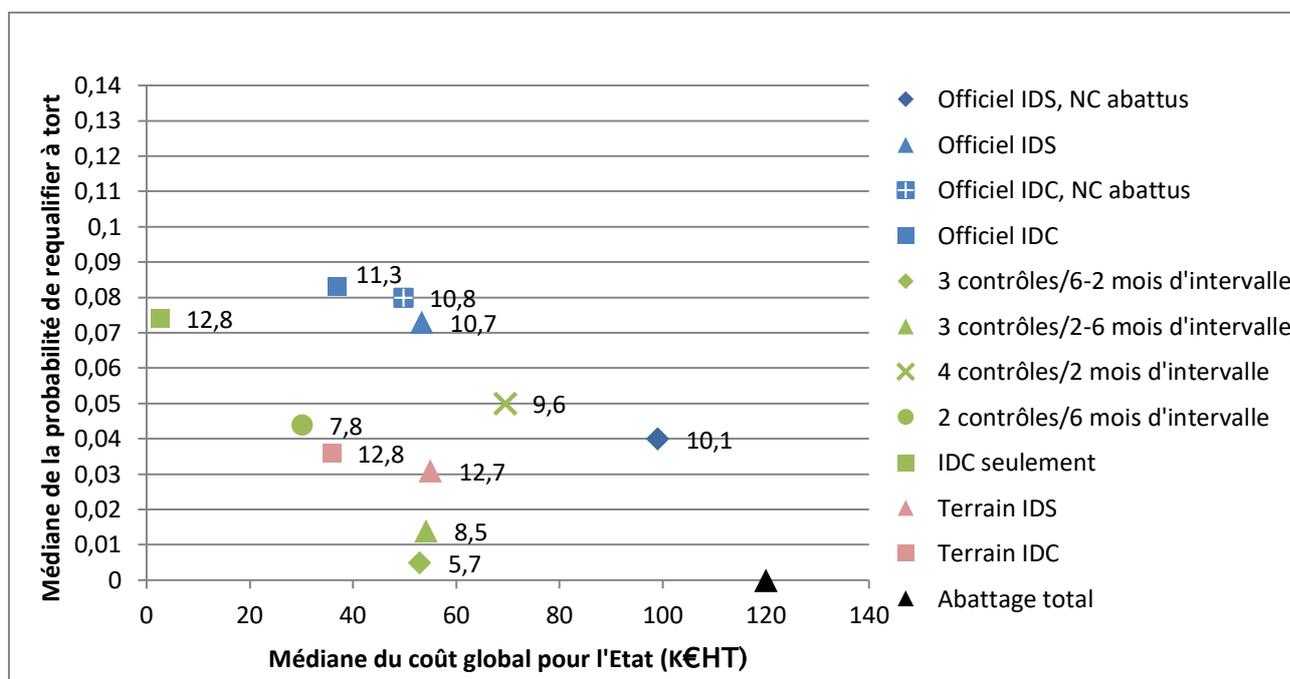


Figure 17 : Efficacité des scénarios impliquant la suspicion forte en fonction de leur coût global et le pourcentage d'abandon

Le scénario « Officiel IDS, NC abattus » est le plus cher des abattages partiels et son efficacité ainsi que son acceptabilité sont moyennes. Les « Officiel IDS », « Officiel IDC » et « Officiel IDC, NC abattus » sont moins chers mais aussi moins efficaces, pour une acceptabilité similaire.

Le scénario « IDC seulement » est certes très économique, mais il est l'un des moins efficaces et des moins acceptables.

Les scénarios « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » et « 3 contrôles/2-6 mois d'intervalle » combinent une bonne efficacité, un coût moyen et une acceptabilité moyenne à bonne.

Les scénarios terrains sont plus efficaces que les scénarios officiels, et présentent des coûts similaires (sauf au scénario « Officiel IDS, NC abattus » qui est presque deux fois plus cher) mais une acceptabilité légèrement moins bonne.

c. Classement des scénarios selon les trois indicateurs clé

Le classement de chaque scénario selon les 3 indicateurs clés est présenté dans le tableau 12.

Tableau 12 : Classement des scénarios en fonction des trois indicateurs clé

Protocoles d'assainissement	Rang en termes de :		
	Efficacité	Coûts	Acceptabilité
Officiel IDS, NC abattus	6	11	7
Officiel IDS	9	7	6
Officiel IDC, NC abattus	11	5	5
Officiel IDC	12	4	8
Terrain IDS	4	9	9
Terrain IDC	5	3	10
3 contrôles/6-2 mois d'intervalle	2	6	1
3 contrôles/2-6 mois d'intervalle	3	8	3

4 contrôles/2 mois d'intervalle	8	10	4
2 contrôles/6 mois d'intervalle	7	2	2
IDC seulement	10	1	10
Abattage total	1	12	12

Le classement des scénarios dépend du critère étudié. En termes d'efficacité et d'acceptabilité le scénario « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » est le meilleur des abattages partiels. En termes de coûts, c'est le scénario « IDC seulement » mais ce scénario est mal classé en termes d'efficacité et d'acceptabilité.

Si l'on attribue la même importance aux 3 critères, c'est le scénario « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » qui donne le meilleur compromis (moyenne des rangs de 3), suite des scénarios « 2 contrôles/6 mois d'intervalle » et « 3 contrôles/2-6 mois d'intervalle ».

2) Suspicion Faible

a. Valeurs des indicateurs calculés

Efficacité épidémiologique

Les indicateurs d'efficacité calculés pour chaque scénario sont présentés dans le tableau 13.

Tableau 13 : Indicateurs d'efficacité pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion faible »

Protocole d'assainissement	Probabilité de requalifier à tort (%)	Nombre d'animaux infectieux-mois Médiane et [percentiles à 2,5% et 97,5%]
Officiel IDS, NC abattus	6,2	2 [0-104]
Officiel IDS	12,4	4 [0-140]
Terrain IDS	3,5	8 [0-146]
3 contrôles/6-2 mois d'intervalle	1,4	3 [0-60]
3 contrôles/2-6 mois d'intervalle	1,5	4 [0-92]
4 contrôles/2 mois d'intervalle	5,0	3 [0-77]
2 contrôles/6 mois d'intervalle	6,5	3 [0-111]
IDC seulement	5,4	3 [0-89]
Abattage total	0 par définition	0 par définition

Le scénario « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » est de nouveau le plus efficace avec un risque de requalification à tort de 1,4%, suivi de près par le scénario « 3 contrôles/2-6 mois d'intervalle » (1,5%). Le scénario le moins efficace, est de loin l'« Officiel IDS » avec un risque à 12,4%. Le nombre d'animaux infectieux-mois est le plus élevé pour le scénario « Terrain IDS » avec une médiane de 8 animaux infectieux-mois. Pour tous les autres scénarios d'abattage partiel, il varie de 2 à 4 en médiane.

Coûts pour l'Etat

Les valeurs des indicateurs de coûts pour chaque scénario sont présentées dans le tableau 14.

Tableau 14 : Indicateurs de coûts pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion faible »
Médiane et [percentiles à 2,5% et 97,5%]

Protocoles d'assainissement	Coûts labo/véto (K€ HT)	Coûts indemnités (K€ HT)	Total (K€ HT)	Nombre d'abattages sanitaires	Pourcentage d'abattus étant sains
Officiel IDS, NC abattus	34,8 [19-111]	73,5 [36-219]	108 [55-329]	81 [40-260]	99,4 [84-100]
Officiel IDS	26,9 [18-69]	44,8 [25-130]	71,7 [43-201]	49 [28-131]	95,9 [66-100]
Terrain IDS	28,3 [18-79]	47,2 [26-133]	76 [44-211]	52 [28-151]	95,5 [68-100]
3 contrôles/6-2 mois d'intervalle	26,2 [16-57]	41 [21-97]	67,2 [38-154]	46 [23-111]	97,8 [78-100]
3 contrôles/2-6 mois d'intervalle	27,1 [18-69]	44,2 [25-112]	71,3 [31-185]	49 [27-135]	95,9 [69-100]
4 contrôles/2 mois d'intervalle	29,5 [22-69]	48,5 [31-120]	78 [54-187]	54 [34-131]	98,1 [82-100]
2 contrôles/6 mois d'intervalle	17,7 [9-47]	26,4 [10-82]	44,8 [20-126]	29 [12-90]	96,4 [70-100]
IDC seulement	3,6 [2-13]	0,9 [0-22]	4,8 [2-35]	1 [0-25]	0 [0-0]
Abattage total	0,2 [0-1,8]	120 [115-125]	120 [116-126]	141	99,3 [84-100]

L'abattage total est toujours le scénario le plus cher avec un coût total médian de 120 K€ HT. Le scénario « Officiel IDS, NC abattus » est aussi le plus cher des abattages partiels avec un coût total médian de 108 K€ HT.

Le scénario le plus économique est de nouveau le « IDC seulement » avec un coût total médian de 4,8 K€ HT.

Les médianes des pourcentages d'animaux abattus étant sains sont très hautes, sauf pour le scénario « IDC seulement » (médiane de 0%). Elles vont de 95,5% (sur 52 abattages sanitaires) pour le « Terrain IDS » à 99,4% (sur 81 abattages sanitaires) pour le « Officiel IDS, NC abattus ».

Acceptabilité des éleveurs

Les valeurs des indicateurs d'acceptabilité sont présentées dans le tableau 15.

Tableau 15 : Indicateurs d'acceptabilité pour les scénarios impliquant le protocole de surveillance « suspicion faible ».
Médiane et [percentiles à 2,5% et 97,5%]

Protocoles d'assainissement	Nombre total d'animaux abattus jusqu'à l'assainissement	Nombre d'animaux confirmés	Durée totale de l'assainissement (mois)	Durée sous APDI stricte (mois)	Durée sous APDI à tort (mois)	Nombre de visites	Pourcentage d'abandon (%)
Officiel IDS, NC abattus	81 [40-260]	0 [0-14]	12 [6-36]	11 [6-30]	10 [6-26]	6 [3-15]	15,5
Officiel IDS	49 [28-138]	1 [0-20]	8 [6-34]	8 [6-17]	6 [4-7]	4 [3-10]	22
Terrain IDS	52 [28-151]	1 [0-26]	11 [8-37]	11 [8-27]	7 [4-9]	4 [3-10]	27,4
3 contrôles/6-2 mois d'intervalle	56 [35-130]	1 [0-14]	12 [10-25]	12 [10-24]	10 [8-11]	4 [3-8]	17,3
3 contrôles/2-6 mois d'intervalle	49 [27-135]	1 [0-22]	12 [10-28]	12 [10-27]	10 [8-11]	4 [3-10]	20,1
4 contrôles/2 mois d'intervalle	66 [47-159]	1 [0-12]	10 [8-34]	10 [8-21]	8 [6-9]	5 [4-11]	16
2 contrôles/6 mois d'intervalle	40 [22-123]	1 [0-15]	10 [8-34]	10 [8-21]	8 [6-9]	3 [2-7]	21,1
IDC seulement	14 [4-49]	1 [0-17]	8 [6-34]	8 [6-21]	6 [6-7]	4 [3-11]	22
Abattage total	141	1 [0-9]	/	/	/	/	/

Le scénario « Officiel IDS, NC abattus » abat encore le plus d'animaux (après l'abattage total) avec une médiane de 81 animaux. Il est toujours suivi du scénario « 4 contrôles/2 mois d'intervalle » (médiane : 66 bovins). Le protocole abattant le moins d'animaux est le « IDC seulement » avec une

médiane de 14 bovins. Les scénarios « Officiel IDS » et « 3 contrôles/2-6 mois d'intervalle » sont exaequo avec une médiane à 49 animaux abattus. Tous les autres scénarios abattent entre 40 et 56 animaux en médiane.

Les médianes du nombre d'animaux confirmés sont très faibles quelque soit le scénario : médiane de 0 pour le scénario « Officiel IDS, NC abattus » et de 1 animal confirmé pour tous les autres.

La durée totale d'assainissement varie entre 8 mois en médiane (scénarios « Officiel IDS » et « IDC seulement ») et 12 mois pour les scénarios « Officiel IDS, NC abattus », « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » et « 3 contrôles/2-6 mois d'intervalle ».

La durée sous APDI stricte ne diffère de la durée totale d'assainissement que pour le scénario « Officiel IDS, NC abattus » et de seulement 1 mois (médiane de 11 mois par rapport à 12 mois). Dans la plupart des élevages, il n'y a donc pas de requalification à tort. Par contre lorsqu'il y en a, elles durent plusieurs mois (percentiles à 97,5%).

Les durées passées sous APDI à tort sont en médiane plus courtes que les durées totales d'assainissement. Les élevages sont donc cette fois assainis après l'APDI. Pour le scénario « Terrain IDS », sur 11 mois d'assainissement, 7 mois sont passés sous APDI à tort. L'assainissement se fait alors en médiane dans les 4 premiers mois. Il se fait en médiane dans les 2 premiers mois pour tous les autres scénarios.

Le nombre médian de visites montre cette fois qu'il faut dans plus de la moitié des simulations au moins un contrôle supplémentaire pour assainir l'élevage, et 3 contrôles supplémentaires pour le scénario « Officiel IDS, NC abattus ».

Le pourcentage d'abandons est plus élevé qu'en assainissement suite à une suspicion forte. Le scénario « Officiel IDS, NC abattus » est le plus acceptable avec 15,5% d'abandon (soit 10% de plus qu'en suspicion forte). Le protocole « Terrain IDS » est le moins acceptable avec 27,4% d'abandon.

b. Représentation graphique de trois indicateurs clé

La figure 18 montre l'efficacité des scénarios en fonction de leur coût global et leur efficacité.

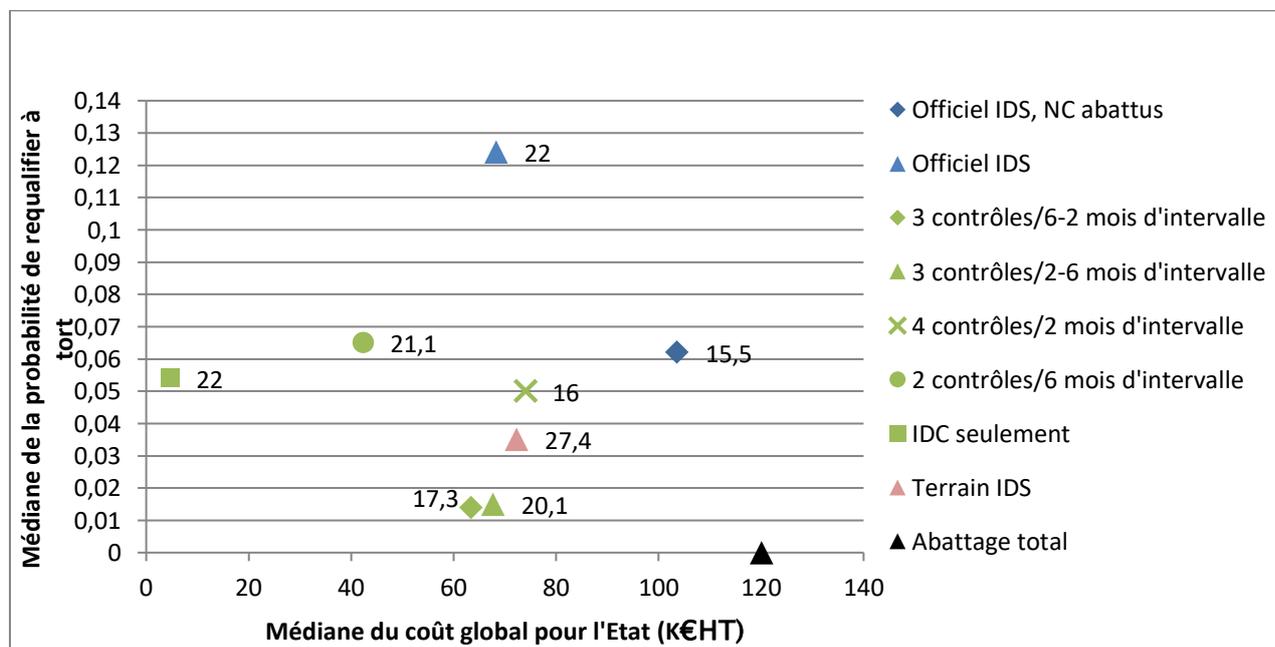


Figure 18 : Efficacité des scénarios impliquant la suspicion faible en fonction de leur coût global et le pourcentage d'abandon

Le scénario « Officiel IDS, NC abattus » est encore le plus cher des abattages partiels et son efficacité ainsi que son acceptabilité sont moyennes. L'« Officiel IDS », est moins cher mais présente la plus mauvaise efficacité, ainsi qu'une acceptabilité médiocre.

Le scénario « IDC seulement » est certes très économique mais son efficacité est moyenne et son acceptabilité médiocre.

Les scénarios « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » et « 3 contrôles/2-6 mois d'intervalle » combinent une bonne efficacité, un coût moyen (le « 3 contrôles/2-6 mois d'intervalle » étant légèrement plus cher) mais une acceptabilité médiocre à mauvaise.

Le scénario terrain est plus efficace que les scénarios officiels. Il est légèrement plus cher que l'« Officiel IDS » mais moins cher (de presque 30K€HT) que l'« Officiel IDS, NC abattus ». Il est cependant bien moins acceptable.

c. Classement des scénarios selon les trois indicateurs clé

Le classement de chaque scénario selon les 3 indicateurs clés est présenté dans le tableau 16.

Tableau 16 : Classement des scénarios en fonction des trois indicateurs clé

Scénario	Rangs en termes de :		
	Efficacité	Coûts	Acceptabilité
Officiel IDS, NC abattus	7	8	1
Officiel IDS	9	5	6
Terrain IDS	4	6	8
3 contrôles/6-2 mois d'intervalle	2	3	3
3 contrôles/2-6 mois d'intervalle	3	4	4
4 contrôles/2 mois d'intervalle	5	7	2
2 contrôles/6 mois d'intervalle	8	2	5
IDC seulement	6	1	6
Abattage total	1	9	9

En termes d'efficacité, le scénario « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » est encore le meilleur des abattages partiels. En termes de coûts, c'est toujours le scénario « IDC seulement ». Mais le plus acceptable est le scénario « Officiel IDS, NC abattus ».

Si l'on attribue la même importance aux 3 critères, c'est le scénario « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » qui donne le meilleur compromis (moyenne des rangs de 2.7), suite des scénarios « 3 contrôles/2-6 mois d'intervalle » et « IDC seulement ».

3) Différences majeures suspicion forte / suspicion faible

Finalement, la plus grande différence observée entre une gestion en suspicion forte et une gestion en suspicion faible concerne le pourcentage d'abandon est donc l'acceptabilité des scénarios. Celui-ci atteint en effet 27,4% suite à une suspicion faible (scénario « Terrain IDS ») alors qu'il n'atteint que 12,8% suite à une suspicion forte (scénario « IDC seulement », et 12,7% pour le scénario « Terrain IDS »). A l'inverse, le scénario le plus acceptable suite à une suspicion forte présente 5,7% d'abandon. Suite à une suspicion faible, le meilleur scénario présente 15,5%, soit presque 10% de plus.

Le total des animaux abattus est aussi une différence notable entre suspicion forte et faible. La médiane minimale suite à une suspicion forte est de 6 animaux abattus (scénario « IDC seulement »), contre 14 suite à une suspicion faible (même scénario).

En termes d'efficacité, la probabilité de requalifier à tort est en moyenne augmentée suite à une suspicion faible (de 1,4 à 12,4% contre 0,5 à 8,3% en suspicion forte). Le nombre d'animaux infectieux-mois médian monte aussi à 8 (scénario « Terrain IDS ») en suspicion faible alors qu'il reste entre 1 et 2 pour tous les scénarios en suspicion forte.

Pour finir, tous les scénarios présentent des médianes de coût total plus grandes lorsqu'ils font suite à une suspicion faible. Par exemple, le scénario le moins cher (« IDC seulement ») coûte 2,7 K€HT en médiane suite à une suspicion forte alors qu'il coûte 4,8 K€HT en médiane suite à une suspicion faible. De même, le scénario « Officiel IDS » coûte 56 K€HT en médiane suite à une suspicion forte alors qu'il coûte 71,7 K€HT en médiane suite à une suspicion faible.

Partie IV : Discussion et perspectives

1) Résultats clés

a. Bilan

Cette étude est originale et novatrice car c'est la première à évaluer l'efficacité épidémiologique du protocole d'abattage partiel officialisé par la NS DGAL/SDSPA 2014-541. Cela n'était réalisable que par modélisation, permettant de révéler l'état réel des animaux, et donc d'apprécier des paramètres tels que la requalification à tort.

L'objectif était ensuite de comparer différentes stratégies d'abattage partiel d'un point de vue épidémiologique, économique et social, pour proposer des pistes d'améliorations du protocole officiel.

Il a été montré que le scénario le plus efficace était l'un des nouveaux scénarios testés, « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle », peu importe le protocole de surveillance préalablement mis en place. Dans le cas d'un protocole de surveillance de suspicion forte, c'était aussi le scénario le plus acceptable (pourcentage d'abandon le plus faible). Il avait cependant un coût moyen.

L'« IDC seulement » était de loin le scénario le moins cher. L'IDC est beaucoup moins chère que le test à l'IFG et sa spécificité est parfaite. Seuls les animaux infectés sont détectés, abattus puis indemnisés. Il a de plus été montré que très peu d'animaux dans un troupeau infecté étaient réellement infectés (0 ou 1 animaux infectieux-mois suite à une suspicion forte, entre 2 et 8 suite à une suspicion faible). L'indemnisation des animaux était donc minime dans ce scénario. Néanmoins, son efficacité est médiocre suite à une suspicion forte (probabilité de requalification à tort de 7,5%) et moyenne suite à une suspicion faible (probabilité de requalification à tort de 5,4%). De plus, son acceptabilité est médiocre suite à une suspicion forte (12,8% d'abandon, c'est alors l'un des scénarios les moins acceptables en suspicion forte) et mauvaise suite à une suspicion faible (plus de 20% d'abandon).

Les scénarios officiels ont montré une efficacité médiocre. Suite à une suspicion forte, les deux protocoles officiels utilisant l'IDC étaient les moins efficaces. Suite à une suspicion faible, c'était

le protocole « Officiels IDS ». Dans les deux cas, le protocole « Officiel IDS, NC abattus » avait une efficacité moyenne pour un coût des plus importants après l'abattage total.

Les scénarios terrains se sont avérés bien plus efficaces que les scénarios officiels. Cela montre que les acteurs mettent en place des mesures certes améliorables mais a priori adaptées au contexte et cohérentes. Ces scénarios étaient cependant moins acceptables et légèrement plus chers.

La bonne efficacité des scénarios « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » et des scénarios terrain met en évidence l'importance de délais inter-contrôles longs pour l'efficacité des scénarios. En gardant 3 contrôles, une augmentation des délais inter-contrôles augmenterait l'efficacité du scénario. Cela apparaît être valable même si très peu d'animaux sont effectivement infectés. On aurait au contraire pu penser qu'un raccourcissement des délais diminuerait la durée de blocage à tort, diminuerait alors les coûts et augmenterait l'acceptabilité d'un tel scénario. Ce n'est pas ce qu'ont montré les simulations.

La proportion d'animaux abattus à tort semble importante. Suite à une suspicion forte, les élevages sont très souvent assainis soit au moment de la déclaration d'APDI, soit dans les premiers mois qui suivent cet APDI. Les défauts de sensibilité des tests IDS et IFN entraînent néanmoins l'abattage de nombreux animaux, et cela à tort. Ce phénomène est atténué lors de l'utilisation du protocole de surveillance « suspicion faible », mais la proportion simulée d'animaux abattus à tort est quand même élevée, avec un minimum à 95,5%, (protocole « IDC seulement » exclu).

Finalement, même si les classements des scénarios simulés sont relativement similaires suite à une suspicion forte et faible, on souligne l'importance du protocole de surveillance. En suspicion forte, la plupart des troupeaux ne renferment pas d'animaux infectés à l'entrée dans le protocole d'abattage partiel, contrairement aux troupeaux gérés en suspicion faible. Les troupeaux gérés en suspicion forte ont ainsi un assainissement plus court (d'environ 3 mois en médiane) que ceux gérés en suspicion faible. Le pourcentage d'abandons est d'ailleurs plus élevé en assainissement suite à une suspicion faible. Par exemple, le scénario le plus acceptable (« Officiel IDS, NC abattus ») présente 15,5% d'abandon, soit 10% de plus qu'en suspicion forte. On peut donc préparer l'éleveur au fait que l'assainissement durera plus longtemps si la suspicion a été faible.

b. Premiers éléments de validation des résultats

La confiance dans les résultats présentés ci-dessus est assez bonne car plusieurs éléments ont permis leur validation.

Indicateurs de coût

Pour les 7 élevages dont les DD(CS)PP 21 et 24 nous ont communiqué les détails des indemnités, le montant des indemnités des animaux abattus allait de 13 à 54 K€ HT, en médiane 21 K€ HT (Annexe 6). Cette valeur est à comparer avec le coût simulé des protocoles terrain (Tableau 10 p.35) : 36,1 K€ HT en médiane [23-106 pour l'intervalle inter-centiles 2.5-97.5] pour le protocole « terrain IDS » et 18,2 K€ HT en médiane [9-64] pour le scénario « terrain IDC » en suspicion forte. Ainsi, les simulations sont cohérentes avec les observations pour cet indicateur.

Indicateurs d'acceptabilité

L'étude sur la typologie des élevages ayant fait l'objet de mesures d'abattage partiel (Poirier 2017) se consacrait exclusivement à l'abattage partiel. Les observations n'ont pas permis de séparer les assainissements faisant suite à une « suspicion forte » de ceux faisant suite à une « suspicion faible ». D'après cette étude, aucun animal n'était confirmé en plus du cas index dans la majorité des élevages étudiés. Dans 95% des foyers, moins de 4 bovins étaient confirmés.

Dans nos simulations, nous avons abouti à un nombre d'animaux confirmés très faible pour les scénarios « Terrain IDS » et « Terrain IDC » impliquant une « suspicion forte » (médianes de 0) et dans le scénario « Terrain IDS » impliquant une « suspicion faible » (médiane de 1 animal confirmé), ce qui est cohérent avec les observations de terrain.

En termes de délais, la durée d'APDI rapportée par Valentine Poirier (2017) était en médiane de 278 j (9 mois) pour les 36 élevages étudiés assainis en abattage partiel. Dans notre étude, la « durée passée sous APDI strictement » était en médiane de 8,5 et 8 mois pour les scénarios terrains suivant une « suspicion forte », et de 11 mois pour le scénario terrain suivant une « suspicion faible ». De la même manière, le nombre de sessions de contrôle observé sur le terrain (en moyenne de 3,3 visites) était proche de celui obtenu par modélisation (médianes de 3 et 4 visites pour les scénarios terrains suivant une suspicion forte et faible respectivement)

Sur le terrain, la majorité des élevages assainis par abattage partiel avaient abattu moins de 20% de leur cheptel : 78,9% des animaux en moyenne étaient épargnés par rapport à un abattage total (Poirier 2017). D'après nos résultats de simulation, les protocoles « Terrain IDS » et « Terrain IDC » faisant suite à une « suspicion forte » permettaient d'épargner respectivement 71,6% et 86% d'animaux et le protocole « Terrain IDS » faisant suite à une « suspicion faible », 63% d'animaux. Nos résultats apparaissent donc cohérents avec les observations même si le pourcentage d'animaux épargnés semble plus faible dans les simulations que dans la réalité : dans le modèle, tous les animaux réagissant sont abattus, excepté les non conclusifs au test de l'IFG. Ceci n'est pas le cas sur le terrain, puisque d'après Poirier (2017), sur les 51,6% des animaux réagissant non abattus, seuls 83,5% étaient des NC. Ainsi, 16,5% des animaux non abattus dans la réalité étaient des animaux représentés comme abattus dans le modèle (Poirier 2017).

On remarque que les observations terrain se rapprochent plus des simulations des scénarios terrains faisant suite à une « suspicion forte ». Il est probable que ce mode de gestion de suspicion ait été le plus utilisé dans les foyers étudiés par Valentine Poirier (2017), d'autant plus que la quasi-totalité d'entre eux provenait des départements les plus infectés (Côte d'Or, Dordogne, Pyrénées-Atlantiques et Landes) : dans ces zones, l'historique des troupeaux et le contexte de voisinage aboutissent fréquemment à considérer une suspicion en « suspicion forte ».

2) Méthodologie

a. Intérêts de la modélisation

La modélisation était le seul moyen de répondre à la question de l'efficacité épidémiologique des stratégies d'assainissement. Elle permet « d'observer l'inobservable » en révélant l'état de santé

réel des animaux, et non l'état révélé par des tests imparfaits. Elle permet un gain de temps et d'argent considérable par rapport à des enquêtes terrain.

b. Limites du modèle

Processus démographique

Quand un animal est abattu, la dynamique de démographie définie dans le modèle fait qu'il est directement remplacé. Les naissances compensent les réformes. Cela peut ne pas représenter précisément la réalité. D'abord, certains éleveurs décident de diminuer la taille de leur élevage à l'entrée dans le protocole d'abattage partiel, pour des raisons de biosécurité et de gestion facilitée des lots à isoler (communication personnelle 2017 : F. Chevalier, référent national tuberculose). Ensuite, si de nombreux animaux sont abattus (à tort ou à raison), cela peut surpasser la quantité de naissances et empêcher le renouvellement.

Il serait donc intéressant de modifier à l'avenir le processus démographique du troupeau afin de permettre le non-renouvellement de certains animaux abattus. Mais, le processus démographique tel qu'il est actuellement modélisé ne gonfle artificiellement que le nombre de jeunes. Ceux-ci jouent probablement un rôle mineur dans la dynamique infectieuse et ne sont pas testés car trop jeunes.

Seules les femelles sont représentées dans le modèle. On pourrait penser que la non représentation des mâles fait qu'on sous-estime la transmission de l'infection. Or les taureaux sont peu nombreux en élevage allaitant et les broutards de moins de 9 mois, certes en contact étroit avec leur mère, n'ont pour futur proche que l'abattoir. Leur impact épidémiologique est donc négligeable et il ne semble pas nécessaire de les représenter dans le modèle.

Processus infectieux

La transmission représentée dans le modèle ne se fait qu'au sein d'un même lot. Cette approche exclut les phénomènes de transmissions indirectes (via les véhicules, le matériel, le sol ou la faune sauvage) et qui pourraient engendrer une transmission inter-lots (Barbier et al. 2016). Cependant, étant donné qu'un élevage entrant en abattage partiel doit justifier d'une biosécurité renforcée, il est peu probable que ce phénomène impacte de manière importante les résultats de notre étude. De plus, le modèle a été calibré et validé et il reproduit de façon satisfaisante des observations terrain d'élevages en abattage total (Bekara 2014).

Processus de surveillance et de contrôle de l'infection

Concernant les tests, leurs sensibilités et spécificités ont été issues de la littérature. On ne peut pas exclure un décalage entre ces valeurs et la réalité de terrain. Or, modifier les valeurs de ces paramètres modifierait les résultats des simulations. Il est donc important de disposer de la connaissance la plus précise possible des valeurs de ces paramètres. Les valeurs de la dernière méta-analyse publiée (Nuñez-Garcia et al. 2017) sont néanmoins une information de qualité qui devrait cependant limiter cet éventuel décalage entre littérature et réalité de terrain.

Dans nos simulations, seuls les animaux de plus d'un an sont testés. La note de service indique de tester les plus de 6 semaines Mais pour des questions de spécificité, le test à l'IFG n'est réalisé sur le terrain que sur les animaux de plus d'un an. Il pourrait être intéressant à l'avenir de simuler l'apport de la prise en compte des animaux de 6 mois à un an dans les tests de dépistage et d'assainissement.

Il convient de rappeler que tous les résultats présentés sont basés sur des tests dont les sensibilités sont issues de la littérature. Si par exemple une ID n'est pas réalisée correctement, la sensibilité allouée au test diminue fortement. Dans ce cas, on peut alors penser que lorsqu'on détecte effectivement un animal, l'infection circule déjà depuis longtemps et qu'alors plus d'un animal est en réalité infecté, contrairement à ce que montre le modèle. Cela change les paramètres de transmission, faisant que l'infection peut se disséminer plus largement, et conditionne les résultats des différentes stratégies d'assainissement mises en place.

Indicateurs

L'indicateur global d'acceptabilité a été calculé en prenant en compte le nombre d'animaux confirmés et la durée de l'assainissement. Le nombre de réagissant aux tests aurait été un bon paramètre mais il a été trop difficile d'en estimer un seuil. Sur le terrain, quand le nombre de réagissant au test dépasse un certain seuil, la DD(cs)PP peut conseiller voire imposer à l'éleveur de passer en abattage total. Or, aucune valeur officielle ou de terrain n'existe, et l'abandon dans ce cas dépend énormément des élevages (communication personnelle 2017 : F. Chevalier, référent national tuberculose). Nous avons donc décidé d'exclure ce paramètre.

3) Perspectives

a. Multi-Criteria Decision Analysis

Pour l'instant, les scénarios ont été classés selon les 3 indicateurs clés au même plan d'importance. Associer un poids à chaque indicateur clé permettrait de pouvoir faire un seul classement général des scénarios, selon l'attente des décideurs.

b. Valeur prédictive des caractéristiques des troupeaux observés avant une requalification

A terme, les travaux initiés ici pourraient permettre d'informer les éleveurs avant la mise en place du protocole des chances de réussite de l'abattage partiel dans leur élevage. En effet, une analyse ex-ante pourrait permettre, en générant l'état sanitaire simulé pour un grand nombre de troupeaux, avant une requalification à tort ou avant une requalification à raison, d'identifier les facteurs de risque de requalification à tort (type de protocole de surveillance utilisé, nombre d'animaux réagissant, etc.). Une probabilité de requalifier à tort pourrait alors être calculée pour chaque élevage sur la base de ces facteurs de risque, avant la mise en œuvre du protocole d'assainissement.

Recommandations : conclusion

Nous avons souligné l'importance de l'allongement des délais inter-contrôles pour garantir une bonne efficacité des scénarios d'assainissement par abattage sélectif. Cela appuie les recommandations actuelles de respecter voire d'allonger les délais inter-contrôles. A noter que sur le terrain, selon Poirier (2017), 17% des animaux étudiés avaient été recontrôlés dans un délai inférieur à 2 mois.

Les protocoles « Officiels » appliquant la note de service strictement (c'est-à-dire en abattant même les non conclusifs à l'IFG) ne se sont pas révélés les plus performants. En IDS, l'efficacité était moyenne et l'assainissement était très coûteux. En IDC l'efficacité était médiocre. Il pourrait alors être intéressant de redéfinir dans la note de service le terme « réagissant », en excluant les animaux n'étant que non conclusifs à l'IFG.

Le protocole « IDC seulement » quoique très économique a une efficacité médiocre. Les protocoles « 3 contrôles/6-2 mois d'intervalle » et « 3 contrôles/2-6 mois d'intervalle » ont une très bonne efficacité (risque de requalification à tort inférieur à 2%) et une bonne acceptabilité en suspicion forte comme en suspicion faible. Néanmoins, il ne s'agit pas des protocoles les moins chers. En suspicion forte, les protocoles « Terrain IDS », « Terrain IDC » et « 2 contrôles/6 mois d'intervalle » ont une efficacité certes différente, mais le risque de requalification à tort reste faible (inférieur à 5%). Par contre, leur coût est moins important, d'environ 20 K€ HT par élevage. Le décideur peut alors être tenté de choisir un protocole moins efficace pour économiser cette somme.

Ce dernier exemple met en évidence la balance entre les coûts que l'on peut investir dans l'assainissement et les conséquences du choix de tel ou tel schéma. Tout dépend du but visé : si l'on veut l'éradication de l'infection, on privilégiera les scénarios les plus efficaces et les plus acceptables, peu importe le coût. En effet, sans bonne acceptabilité, les acteurs ne suivront pas les mesures et la stratégie sera perdante. Si cependant on pense pouvoir accepter qu'un petit pourcentage de nos foyers incidents par an soit requalifié à tort, alors on pourra choisir des scénarios moins efficaces mais moins chers, dans un contexte de réduction des dépenses publiques. Dans ce cas, il faudra veiller d'autant plus à ce que les tests de dépistage (notamment les ID) soient réalisés dans des conditions ne dégradant pas leur sensibilité, et à ce que les délais inter-tests soient respectés, pour limiter au maximum la perte d'efficacité du scénario.

Bibliographie

- Agreste, statistique agricole annuelle. 2017. « Effectif des animaux en fin d'année 2015 FRANCE ENTIERE ». <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/saa2017T10bspca.pdf>.
- Barbier, E., M. L. Boschioli, E. Gueneau, M. Rochelet, A. Payne, K. de Cruz, A. L. Blieux, C. Fossot, et A. Hartmann. 2016. « First Molecular Detection of Mycobacterium Bovis in Environmental Samples from a French Region with Endemic Bovine Tuberculosis ». *Journal of Applied Microbiology* 120 (5): 1193-1207. doi:10.1111/jam.13090.
- Bekara, Mohammed El Amine. 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. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127068/>.
- Bekara, Mohammed El Amine, Aurélie Courcoul, Jean-Jacques Bénét, et Benoit Durand. 2014. « Modeling Tuberculosis Dynamics, Detection and Control in Cattle Herds ». *PloS One* 9 (9): e108584. doi:10.1371/journal.pone.0108584.
- Bénét, Jean-Jacques, Maria-Laura Boschioli, Barbara Dufour, et Bruno Garin-Bastuji. 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*, n° 50: 127-43.
- Bénét, Jean-Jacques, Anne Praud, et Barbara Dufour. 2017. « La tuberculose animale. Polycopié des Unités de maladies contagieuses de Ecoles Nationales Vétérinaires françaises ». *Mérial (Lyon)*, 100p.
- Bernoulli, Daniel. 1760. « Essai d'une nouvelle analyse de la mortalité causée par la petite vérole, et des avantages de l'inoculation pour la prévenir », 1-40.
- Brochet, Régis. 2004. « Etude descriptive des disparités départementales des résultats de la lutte contre la tuberculose bovine en France : formulation d'hypothèses explicatives ».
- Cavalerie, Lisa, Aurélie Courcoul, Maria Laura Boschioli, Edouard Réveillaud, et Philippe Gay. 2014. « Tuberculose bovine en France en 2014 : une situation stable ». *Bulletin épidémiologique santé animale et alimentation*, n° 71: 4-11.
- CGAAER. 2015. *Modalités de fixation des tarifs des prophylaxies animales*.
- Delmotte, Didier. 2013. « Tuberculose : il faut soutenir davantage les éleveurs ». *Arsia infos*. <http://www.arsia.be/wp-content/uploads/2013/10/AI-octobre-2013.pdf>.
- Direction générale de l'alimentation. 2012. « Plan national d'action relatif à la lutte contre la tuberculose bovine ». http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/pdf/Plan_action_tuberculose_bovine_v2_2012_06_18_cle8e5188.pdf.
- FMSE. 2017. « Plaquette de présentation FMSE ». http://www.fmse.fr/wp-content/uploads/2015/01/150105_plaquetteFmse9.pdf.
- Griffin, J. M., D. H. Williams, G. E. Kelly, T. A. Clegg, I. O'Boyle, J. D. Collins, et S. J. More. 2005. « The Impact of Badger Removal on the Control of Tuberculosis in Cattle Herds in Ireland ». *Preventive Veterinary Medicine* 67 (4): 237-66. doi:10.1016/j.prevetmed.2004.10.009.
- Institut de l'élevage. 2012. « Les coûts de production en élevage bovins viande ». *idele.fr*. <http://idele.fr/presse/publication/idelesolr/recommends/les-couts-de-production-en-elevage-bovins-viande.html>.
- Institut de l'élevage, et CNE. 2015. « Chiffres clé 2015, productions bovines lait et viande ».
- Liebana, E., L. Johnson, J. Gough, P. Durr, K. Jahans, R. Clifton-Hadley, Y. Spencer, R. G. Hewinson, et S. H. Downs. 2008. « Pathology of Naturally Occurring Bovine Tuberculosis in England and Wales ». *Veterinary Journal (London, England: 1997)* 176 (3): 354-60. doi:10.1016/j.tvjl.2007.07.001.

- Nuñez-Garcia, Javier, Sara H. Downs, Jessica E. Parry, Darrell A. Abernethy, Jennifer M. Broughan, Angus R. Cameron, Alasdair J. Cook, et al. 2017. « 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*. doi:10.1016/j.prevetmed.2017.02.017.
- OIE. 2015. « OIE ». http://www.oie.int/fileadmin/Home/eng/Our_scientific_expertise/docs/pdf/OIE_Register_Bovigam_Abstract_v1_05.2015.pdf.
- O'Reilly, L. M., et C. J. Daborn. 1995. « The Epidemiology of Mycobacterium Bovis Infections in Animals and Man: A Review ». *Tubercle and Lung Disease: The Official Journal of the International Union Against Tuberculosis and Lung Disease* 76 Suppl 1 (août): 1-46.
- Poirier, Valentine. 2017. « Elevages foyers de tuberculose bovine ayant fait l'objet d'un assainissement par abattage partiel depuis son autorisation sur tout le territoire national en 2014 : typologie des élevages concernés, étude de l'efficacité du dispositif ».
- Rivière, Julie, Edouard Réveillaud, Maria-Laura Boschioli, Jean Hars, Céline Richomme, Eva Faure, Pascal Hendrikx, et Alexandre Fediaevsky. 2013. « Sylvatub : bilan d'une première année de surveillance de la tuberculose bovine dans la faune sauvage en France ». *Bulletin épidémiologique santé animale et alimentation*, n° 57: 10-15.
- Roche, B., B. Dedieu, et S. Ingrand. 2001. « Taux de renouvellement et pratiques de réforme et de recrutement en élevage bovin allaitant du Limousin ». *INRA Productions Animales*, n° 14: 255-63.
- Rua-Domenech, R. de la, A. T. Goodchild, H. M. Vordermeier, R. G. Hewinson, K. H. Christiansen, et R. S. Clifton-Hadley. 2006. « Ante Mortem Diagnosis of Tuberculosis in Cattle: A Review of the Tuberculin Tests, Gamma-Interferon Assay and Other Ancillary Diagnostic Techniques ». *Research in Veterinary Science* 81 (2): 190-210. doi:10.1016/j.rvsc.2005.11.005.
- Sabatier, Philippe, Dominique J. Bicot, Benoît Durand, et Marc A. Dubois. 2005. « Le recours à la modélisation en épidémiologie animale », 15-33.
- Valleron, Alain-Jacques. 2000. « Les rôles de la modélisation en épidémiologie ». *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie* 323 (5): 429-33. doi:10.1016/S0764-4469(00)00153-0.
- Vordermeier, H. Martin, Jemma Brown, Paul J. Cockle, Willeke P. J. Franken, Jan Wouter Drijfhout, Sandra M. Arend, Tom H. M. Ottenhoff, Keith Jahans, et R. Glyn Hewinson. 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: CVI* 14 (9): 1203-9. doi:10.1128/CVI.00116-07.
- Vynnycky, Emilia, et Richard G. White. 2010. *An introduction to infectious disease modelling*.

Textes réglementaires

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 24 Août 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 24 Août 2017.

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 25 Août 2017.

Arrêté ministériel du 30 Mars 2001 *fixant les modalités de l'estimation des animaux abattus et des denrées et produits détruits sur ordre de l'administration*.

Arrêté ministériel du 30 Septembre 2004 *relatif à la rémunération des vétérinaires mandatés pour les opérations de police sanitaire*. Version consolidée du 6 Avril 2017.

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.

Décision 2003/467/CE de la Commission du 23 Juin 2003 établissant le statut d'officiellement indemnes de tuberculose, de brucellose et de leucose bovine enzootique des troupeaux bovins de certains États membres et 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/**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/**2014-541** du 4 Juillet 2014 relative à la *dérogation à l'abattage total de certains troupeaux de bovins infectés de tuberculose et aux critères d'éligibilité et protocole applicable*.

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2015-556** du 30 Juin 2016 relative à la *surveillance épidémiologique de la tuberculose dans la faune sauvage en France : dispositif Sylvatub*.

DGAL, Note de service DGAL/SDSPA/**2017-589** du 11 Juillet 2017 relative à *l'application de l'arrêté du 7/12/2016 relatif à certaines mesures de surveillance et de lutte contre la tuberculose lors de la mise en évidence de cette maladie dans la faune sauvage*.

Rapports d'expertise de 4 élevages assainis en abattage partiel, communiqués par la DDPP Dordogne.

Rapports d'expertise de 3 élevages assainis en abattage partiel, communiqués par la DDPP Côte d'Or.

Annexes

ANNEXE 1 : Annexe 1 de la Décision 2003/467/CE de la Commission du 23 Juin 2003 - Etats et régions d'Etat officiellement indemnes de tuberculose bovine.

***37 CHAPITRE 1**

États membres officiellement indemnes de tuberculose

Code ISO	État membre
BE	Belgique
CZ	République tchèque
DK	Danemark
DE	Allemagne
EE	Estonie
FR	France
LV	Lettonie
LT	Lituanie
LU	Luxembourg
HU	Hongrie
MT	Malte
NL	Pays-Bas
AT	Autriche
PL	Pologne
SI	Slovénie
SK	Slovaquie
FI	Finlande
SE	Suède

***26 CHAPITRE 2**

Régions d'États membres officiellement indemnes de tuberculose

***39** En Italie :

- région des Abruzzes : province de Pescara,
- province de Bolzano,
- région d'Émilie-Romagne,
- région de Frioul-Vénétie Julienne,
- région du Latium : provinces de Rieti et de Viterbe,
- région de Ligurie,
- région de Lombardie,
- région des Marches : provinces d'Ancône, d'Ascoli Piceno, de Fermo, de Pesaro-Urbino,
- région du Piémont,
- région de la Sardaigne : provinces de Cagliari, de Medio-Campidano, d'Ogliastra, d'Olbia-Tempio, d'Oristano,

- région de la Toscane,
- province de Trente,
- région de l'Ombrie,
- région de la Vénétie.

Au Portugal :

- Région de l'Algarve : tous les distritos.

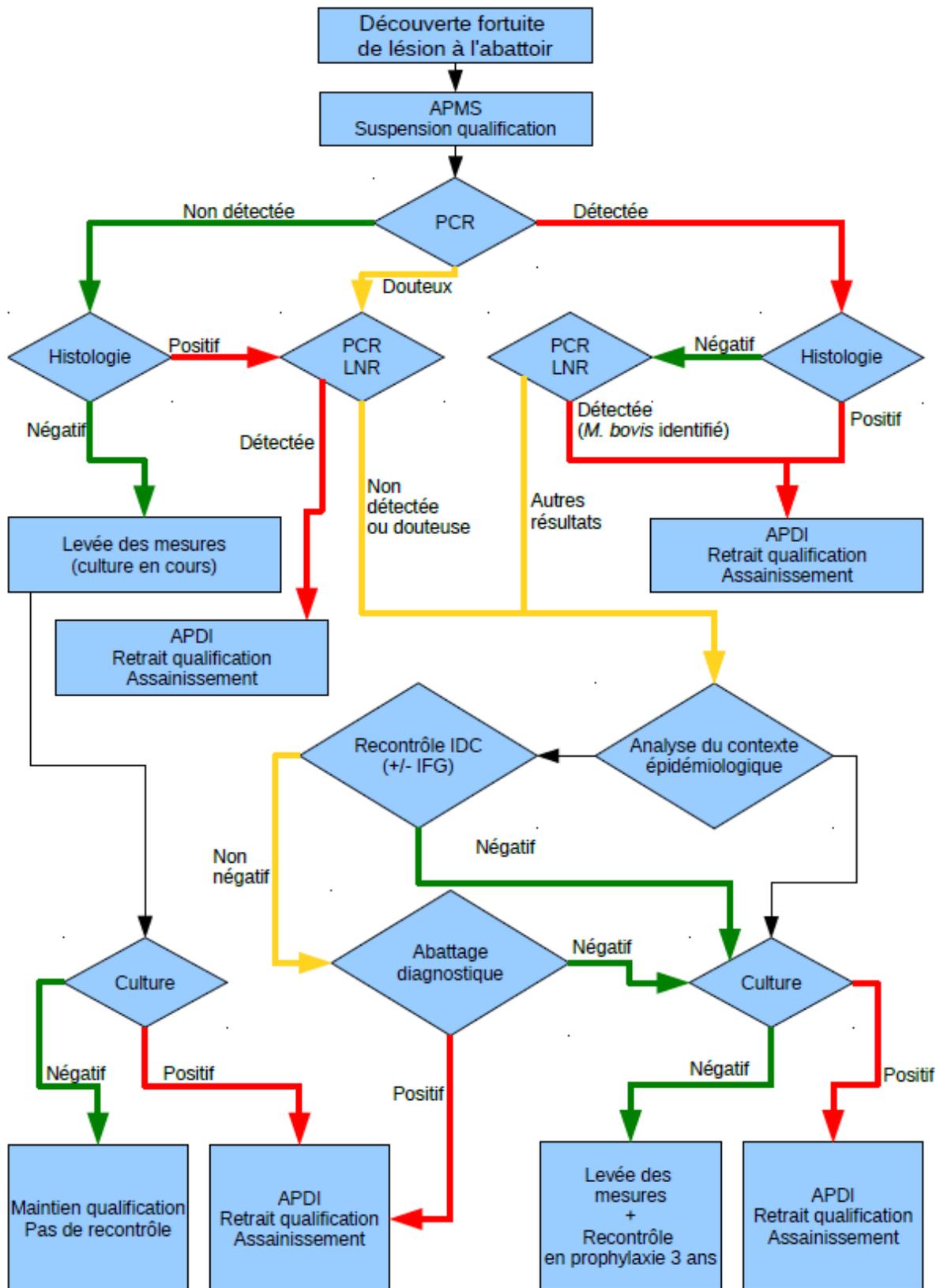
***38** En Espagne :

- Communauté autonome des Îles Canaries.

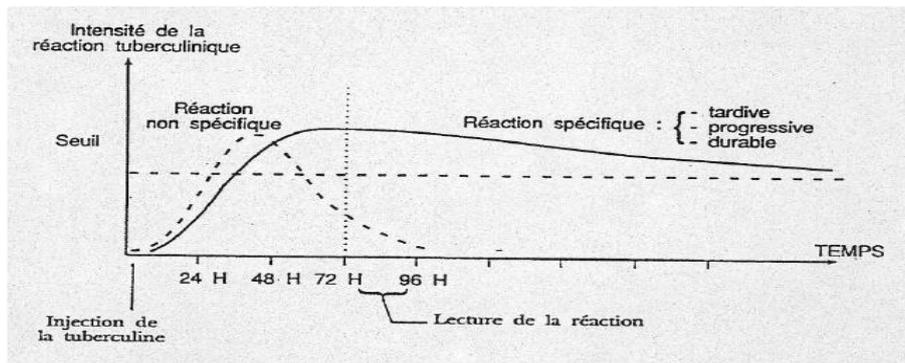
***36** Au Royaume-Uni :

- Grande-Bretagne : Écosse,
- Île de Man.

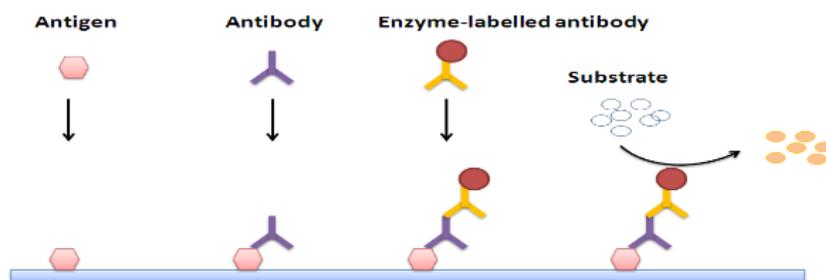
ANNEXE 2 : Arbre décisionnel en cas de découverte de lésion évocatrice de tuberculose bovine à l'abattoir (NS DGAL/SDSPA 2016-1001)



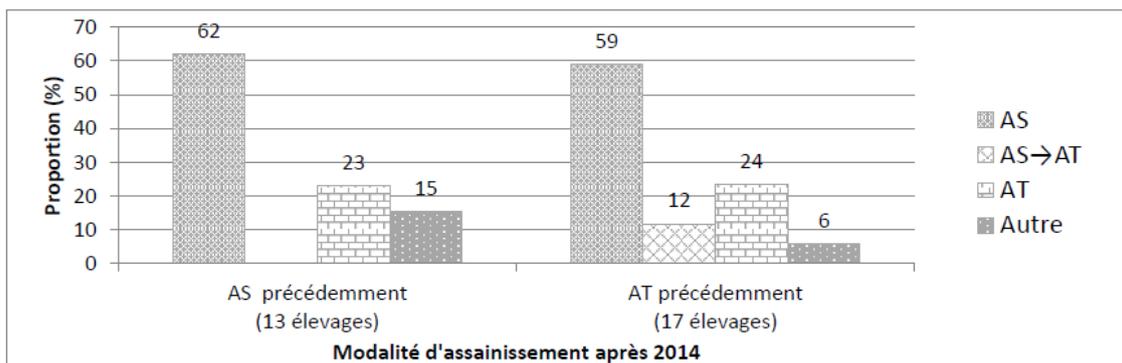
ANNEXE 3 : Caractéristiques de la réaction tuberculinique (Source : GDS 18)



ANNEXE 4 : Mécanisme du test ELISA, d'après Sino Biological®, Pékin



ANNEXE 5 : Proportion (en %) des modalités d'assainissement après 2014, en fonction du type d'assainissement pratiqué avant 2014, dans 30 foyers résurgents ou re-contaminés pour lesquels le type d'abattage pratiqué avant 2014 était disponible dans les données recueillies (Poirier 2017)



ANNEXE 6 : Prix de l'indemnisation de chaque élevage assaini, médiane et percentiles (Rapports d'expertise communiqués par les DDPP Dordogne et Côte d'Or)

Elevage	Coût de l'indemnisation (K€ HT)
1	23
2	14
3	22
4	21
5	13
6	54
7	21
Médiane	21
Percentiles 2,5% et 97,5%	[14-50]

