



MANUEL DE FORMATION SUR LA GESTION DES INFORMATIONS SANITAIRES POUR LA FAUNE SAUVAGE



Sixième Cycle

**Atelier de formation des Points Focaux
Nationaux de l'OMSA pour la Faune
Sauvage**



Organisation mondiale
de la santé animale
Fondée en tant qu'OIE

MANUEL DE FORMATION SUR LA GESTION DES INFORMATIONS SANITAIRES POUR LA FAUNE SAUVAGE

Sixième cycle

**Atelier de formation des Points
Focaux Nationaux
de l'OMSA pour la faune sauvage**

Toutes les publications de l'Organisation mondiale de la santé animale (OMSA) sont protégées par le droit d'auteur international. La copie, la reproduction, la traduction, l'adaptation ou la publication d'extraits, dans des journaux, des documents, des ouvrages ou des supports électroniques et autres supports destinés au public, à des fins d'information, didactiques ou commerciales, requièrent l'obtention préalable d'une autorisation écrite de l'OMSA.

Les désignations et dénominations utilisées ainsi que la présentation des données figurant dans cette publication ne reflètent aucune prise de position de l'OMSA quant au statut légal de quelque pays, territoire, ville ou zone que ce soit, à leurs autorités, aux délimitations de leur territoire ou au tracé de leurs frontières.

Les auteurs sont seuls responsables des opinions exprimées dans les articles signés. La mention de sociétés spécifiques ou de produits enregistrés par un fabricant, qu'ils soient ou non protégés par une marque, ne signifie pas que ceux-ci sont recommandés ou soutenus par l'OMSA par rapport à d'autres similaires qui ne seraient pas mentionnés.

© Copyright OMSA, 2021

Organisation mondiale de la santé animale
12, rue de Prony, 75017 Paris, France
Tél. : 33(0) 1 44 15 18 88
Fax : 33(0)1 42 67 09 87
<http://www.woah.org/fr/>

Adresses de sites Internet et liens vers les manuels précédents auxquels il est fait référence dans ce manuel :

Manuel de formation sur la surveillance et la déclaration internationale des maladies chez les animaux sauvages : atelier de formation de 2e cycle des points focaux nationaux de l'OMSA pour la faune sauvage

https://www.woah.org/fileadmin/Home/eng/Internationa_Standard_Setting/docs/pdf/WGWildlife/A_Training_Manual_Wildlife_2.pdf

Manuel de formation sur l'évaluation du risque sanitaire pour la faune sauvage comme aide à la décision et à la définition des politiques

https://www.woah.org/fileadmin/Home/eng/Internationa_Standard_Setting/docs/pdf/WGWildlife/A_Training_Manual_Wildlife_3.pdf

Manuel de formation sur les enquêtes relatives aux épidémies de maladies chez les animaux sauvages : atelier de formation de 4e cycle des points focaux nationaux de l'OMSA pour la faune sauvage

https://www.woah.org/fileadmin/Home/esp/Internationa_Standard_Setting/docs/pdf/WGWildlife/A_Training_Manual_Wildlife_4.pdf

Manuel de formation de 5e cycle sur la gestion des informations sanitaires de la faune sauvage : atelier de formation des points focaux nationaux de l'OMSA pour la faune sauvage

https://www.woah.org/fileadmin/Home/esp/Internationa_Standard_Setting/docs/pdf/WGWildlife/A_Training_Manual_Wildlife_5.pdf

AVANT-PROPOS	6
SURVEILLANCE DES MALADIES DE LA FAUNE SAUVAGE.....	7
FORMES DE SURVEILLANCE DES MALADIES DUES A DES AGENTS PATHOGÈNES	9
PROGRAMME DE SURVEILLANCE GENERALE DES AGENTS PATHOGENES DE LA FAUNE SAUVAGE	10
<i>Détection des agents pathogènes et des maladies</i>	<i>10</i>
<i>Identification des agents pathogènes et des maladies.....</i>	<i>11</i>
<i>Gestion de l'information.....</i>	<i>11</i>
<i>Analyse et communication.....</i>	<i>11</i>
<i>Prise de mesures.....</i>	<i>12</i>
<i>Coordination d'un programme de surveillance générale des agents pathogènes de la faune sauvage.....</i>	<i>13</i>
<i>Résumé – Surveillance générale</i>	<i>14</i>
PROGRAMME DE SURVEILLANCE CIBLEE DES AGENTS PATHOGENES DE LA FAUNE SAUVAGE	14
<i>Absence de maladie.....</i>	<i>15</i>
<i>Prévalence</i>	<i>15</i>
<i>Incidence</i>	<i>16</i>
<i>Composantes de la surveillance ciblée des maladies de la faune sauvage</i>	<i>16</i>
<i>Résumé – Programme de surveillance ciblée des agents pathogènes de la faune sauvage.....</i>	<i>17</i>
CONCEPTION D'UN PROGRAMME DE SURVEILLANCE NATIONAL	18
OBJECTIFS	18
PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE	19
<i>Paramètres</i>	<i>20</i>
<i>Quelles espèces d'hôtes doivent être échantillonnées</i>	<i>20</i>
<i>Où faut-il prélever les échantillons ?</i>	<i>21</i>
<i>Taille de l'échantillon – Combien d'unités géographiques doivent être incluses ?.....</i>	<i>24</i>
<i>Taille de l'échantillon – Combien d'échantillons de surveillance doivent être prélevés au sein d'une unité géographique donnée ?.....</i>	<i>25</i>
<i>Qui échantillonner dans une zone ou une population d'intérêt ?.....</i>	<i>28</i>
<i>Biais.....</i>	<i>28</i>
PRÉLÈVEMENT D'ÉCHANTILLONS AUPRÈS D'ANIMAUX SAUVAGE POUR DES TESTS DE DIAGNOSTIC ..	29
CHOISIR UN TYPE D'ÉCHANTILLON	29
<i>Sélection de spécimens individuels en vue d'un prélèvement</i>	<i>29</i>
BIOSECURITE PENDANT LE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS	31
PRELEVEMENT DE SPECIMENS D'ANIMAUX SAUVAGES	32
<i>Prélèvement et conservation des carcasses.....</i>	<i>32</i>
<i>Prélèvement de tissus.....</i>	<i>32</i>
<i>Prélèvement sanguin.....</i>	<i>33</i>
<i>Prélèvement d'échantillons par écouvillonnage</i>	<i>34</i>
<i>Prélèvement d'autres spécimens non invasifs courants.....</i>	<i>34</i>
<i>Prélèvement d'amphibiens.....</i>	<i>34</i>
DECONTAMINATION/DESINFECTION DE L'ÉQUIPEMENT DE TERRAIN	35
PRINCIPES GÉNÉRAUX POUR LES TESTS DE DIAGNOSTIC EFFECTUÉS SUR LA FAUNE SAUVAGE	36
QUALITE DES ECHANTILLONS.....	38
CARACTERISTIQUES DES TESTS	38
DISPONIBILITE DES TESTS	40
BESOINS EN RESSOURCES	41

MANDATS LEGAUX.....	41
RECUEIL DE DONNÉES PENDANT UN ÉVÉNEMENT DE MORTALITÉ	42
BONNES PRATIQUES DE STOCKAGE ET DE GESTION DES DONNEES	43
<i>Lieu de l'événement.....</i>	43
<i>Utilisation des terres et facteurs environnementaux.....</i>	44
<i>Estimation de la date de début et de fin de la morbidité/mortalité.....</i>	44
<i>Espèces touchées</i>	44
<i>Signes cliniques</i>	45
<i>Âge des animaux touchés.....</i>	45
<i>Sexe des animaux touchés.....</i>	45
<i>Nombre d'animaux touchés</i>	45
<i>Diagnostics</i>	46
<i>Construction d'un dictionnaire de données.....</i>	46
GESTION DES MALADIES CHEZ LES ANIMAUX SAUVAGES.....	49
OBJECTIFS DE LA GESTION DES MALADIES	49
POINTS D'INTERVENTION	50
PREVENTION ET CONTROLE – AGENTS ET VECTEURS.....	51
CONTROLE – MANIPULATION DE L'HOTE	53
<i>Théorie.....</i>	53
<i>Considérations sociales.....</i>	56
<i>Considérations systémiques.....</i>	57
Agent	57
Hôte.....	58
Environnement.....	60
<i>Considérations logistiques.....</i>	60
<i>Mesures du succès</i>	61
<i>Manipulations des populations hôtes.....</i>	62
Distribution.....	62
Retrait sélectif.....	66
Réduction de la densité	68
<i>Traitement et immunisation des populations hôtes</i>	75
Traitement.....	75
Vaccination.....	77
<i>Combinaison d'outils.....</i>	85
RÉFÉRENCES.....	89

AVANT-PROPOS

Centre collaborateur OMSA pour la recherche, le diagnostic et la surveillance des agents pathogènes de la faune sauvage

Ce manuel a été développé pour la formation de 6e cycle des points focaux de l'OMSA pour la faune sauvage. Au cours des formations associées aux cycles précédents, les points focaux ont été interrogés pour déterminer les sujets de formation future qui les intéressaient le plus. Cette enquête a montré qu'il était nécessaire de proposer une formation sur la gestion des informations sanitaires pour la faune sauvage. Malgré son importance pratique, ce sujet n'est pas bien représenté dans la littérature relative à la santé de la faune sauvage. Notre objectif était de contribuer à combler cette lacune grâce aux informations présentées dans ce manuel.

Ce manuel est structuré de manière à suivre une progression logique associée à la gestion des informations sanitaires pour la faune sauvage. Nous commençons par expliquer en détail pourquoi il est important de partager des informations sanitaires pour la faune sauvage. Nous examinons les défis communs associés au partage des informations et explorons les possibilités de surmonter ces défis. Ensuite, nous examinons les principes généraux visant à établir un réseau d'information sur la santé de la faune sauvage, et nous fournissons quelques études de cas d'exemples concrets de réseaux réussis. Il s'agit de déterminer qui doit être inclus dans un réseau et comment établir la structure du réseau afin d'acquérir des informations sanitaires pour la faune sauvage. Nous passons ensuite à la discussion sur le type de données à recueillir et décrivons quelques bonnes pratiques de gestion et de conservation des données. Cette section explore ce qu'il faut recueillir et partager en matière d'informations sanitaires pour la faune sauvage. Enfin, nous concluons par une discussion sur la diffusion des données, avec un accent particulier sur l'utilisation des Systèmes d'informations géographiques (SIG) comme outil de diffusion des informations sanitaires pour la faune sauvage. Cette dernière section décrit comment partager les informations sur la faune sauvage, ce qui est généralement le but final de la gestion des informations sanitaires pour la faune sauvage.

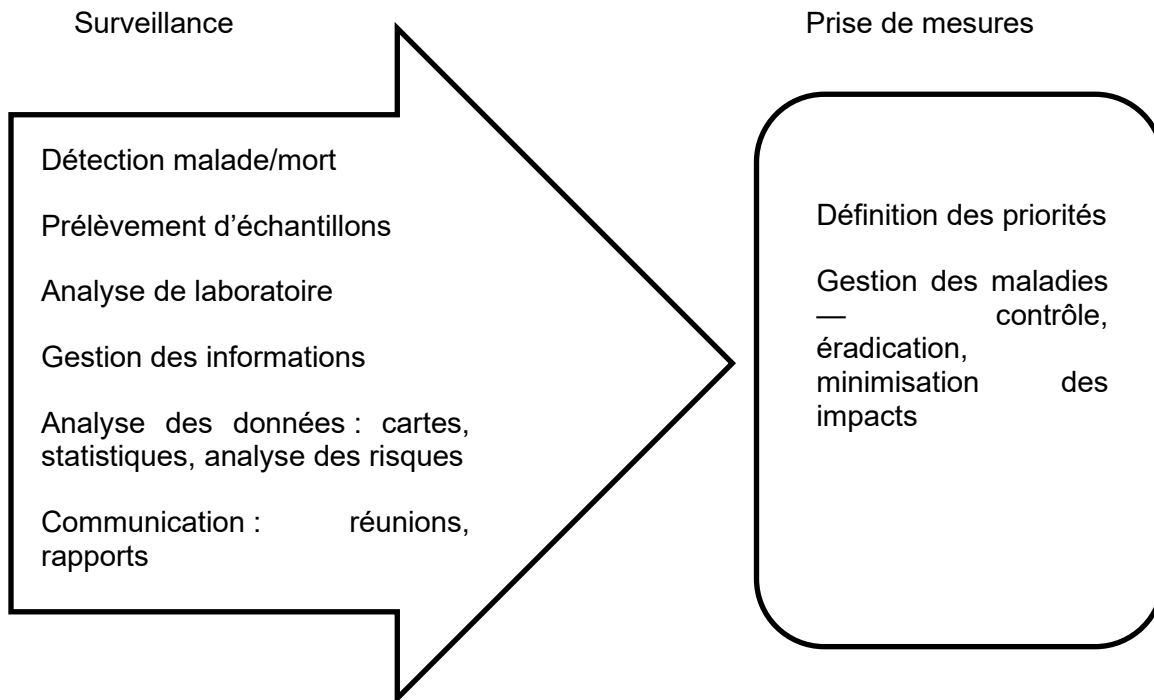
Nous souhaitons que ce manuel constitue une base permettant de développer une compréhension générale de la gestion des informations sanitaires pour la faune sauvage. Cependant, ce sujet est vaste et l'application des concepts présentés dépend souvent fortement des conditions, des difficultés et des structures gouvernementales locales. Par conséquent, ces informations sont présentées à un niveau général en nous appuyant sur la littérature, l'opinion d'experts et l'expérience personnelle. Tout au long du manuel, nous fournissons des références et des liens électroniques vers des ressources supplémentaires pour les lecteurs qui souhaitent avoir une compréhension plus approfondie des sujets présentés.

La gestion des informations sanitaires pour la faune sauvage devient un élément de plus en plus important de la surveillance et de la gestion des maladies de la faune sauvage. Nous espérons que ce manuel aidera les points focaux à maintenir et/ou à améliorer la santé de la faune sauvage dans leur pays, au profit de la faune sauvage, des animaux domestiques et de la santé humaine.

SURVEILLANCE DES MALADIES DE LA FAUNE SAUVAGE

La surveillance des agents pathogènes chez les animaux sauvages est le fondement d'un programme national complet de santé de la faune sauvage. La surveillance est définie comme « le recueil, le rassemblement et l'analyse systématiques et continus d'informations relatives à la santé animale ainsi que la diffusion en temps utile de ces informations à ceux qui doivent en être informés afin que des mesures puissent être prises » (*Code sanitaire pour les animaux terrestres* de l'OMSA). Elle constitue la base du programme de santé de la faune sauvage d'un pays, car elle fournit les informations essentielles pour sélectionner et mettre en œuvre les actions appropriées visant à promouvoir la santé de la faune sauvage, notamment la prévention, la détection, l'analyse des risques ou la gestion. Les principaux attributs d'une surveillance réussie sont les suivants :

1. La surveillance est une activité continue – l'enquête et la vigilance à l'égard des pathogènes présents dans la faune sauvage ainsi que des maladies qu'ils peuvent causer sont plus efficaces si elles sont réalisées en continu
2. La surveillance implique à la fois le recueil et l'analyse de données et d'informations
3. La surveillance comprend la communication des résultats du recueil et de l'analyse des données à l'ensemble des personnes, agences et institutions qui ont besoin de ces informations
4. La surveillance crée des informations permettant de prendre des mesures.



Grâce à la surveillance des agents pathogènes de la faune sauvage, un pays peut détecter la présence de pathogènes dans ses populations d'animaux sauvages, évaluer la répartition géographique de l'infection et déterminer le risque potentiel pour les ressources importantes. Sans surveillance, de nouvelles maladies émergentes peuvent passer inaperçues et la mesure dans laquelle une population a été touchée par une maladie ou un pathogène donné(e) (c'est-à-dire la prévalence de la maladie au sein de la population) restera inconnue. La surveillance fournit les informations dont les points focaux pour la faune sauvage de l'OMSA ont besoin pour assumer leurs responsabilités internationales en matière de déclaration des maladies, ce qui est essentiel pour aider les pays à évaluer les risques associés aux pathogènes au sein de leurs populations humaines, sauvages et agricoles.

Les infrastructures nécessaires à la réussite d'un programme de surveillance comprennent non seulement un réseau d'observation de la faune sauvage et des laboratoires de diagnostic vétérinaire, mais aussi des systèmes de gestion, d'analyse et de communication des informations. Chacun de ces éléments est important lorsqu'un pays décide de réagir à une épidémie et de prendre des mesures de gestion. Ainsi, la surveillance des maladies des animaux sauvages favorise non seulement la santé de ces derniers, mais contribue également à la capacité d'un pays à gérer les événements urgents de santé animale domestique, en particulier les événements transfrontaliers. On ne saurait trop insister sur l'importance de la surveillance de la faune sauvage.

FORMES DE SURVEILLANCE DES MALADIES DUES A DES AGENTS PATHOGÈNES

Il existe deux principaux types de surveillance des agents pathogènes : la surveillance générale et la surveillance ciblée. Les deux formes de surveillance des agents pathogènes sont importantes dans le cadre d'un programme national de santé de la faune sauvage. La surveillance générale analyse les populations d'animaux sauvages pour déterminer quels sont les agents pathogènes existants. La surveillance ciblée vise à déterminer la présence ou l'absence d'un agent pathogène donné au sein des populations sauvages. La surveillance générale ou « scan » des agents pathogènes de la faune sauvage est une composante particulièrement critique d'un programme national de santé de la faune sauvage, car elle contribue à maintenir une vigilance nationale face aux maladies émergentes associées aux agents pathogènes de la faune sauvage.

De nombreux aspects de la surveillance de la santé animale sont décrits dans le chapitre 1.4 du *Code sanitaire pour les animaux terrestres* de l'OMSA. Cependant, certains aspects de la surveillance des agents pathogènes et des maladies chez les animaux sauvages sont uniques et nécessitent une attention supplémentaire. Les animaux sauvages n'ont pas de propriétaire ni de vétérinaire traitant pour identifier les maladies. Les tests de diagnostic de routine pour les agents pathogènes et les maladies développés pour les animaux domestiques ne sont pas nécessairement valables pour les espèces sauvages. La collaboration des biologistes et des écologues de la faune sauvage est nécessaire pour fournir des données sur les populations et autres aspects de la biologie de la faune sauvage ainsi que pour analyser, interpréter et communiquer les résultats d'un programme de surveillance des maladies de la faune sauvage. De plus, au sein des populations d'animaux sauvages, les méthodes traditionnelles basées sur les probabilités pour sélectionner les échantillons (*Code sanitaire pour les animaux terrestres*, chapitre 1.4.4) peuvent rarement être utilisées en raison des problèmes pratiques d'accès aux animaux sauvages, de la difficulté à définir une population ainsi que du manque d'informations précises sur la taille et la structure des populations. Il faut donc utiliser des techniques spécifiques aux animaux sauvages. Par exemple, bien que l'échantillonnage probabiliste ne soit pas pratique pour sélectionner des animaux sauvages à tester, il peut être possible de procéder à un échantillonnage probabiliste de zones géographiques contenant des animaux sauvages lorsque les échantillons sont prélevés sur une étendue spatiale (voir le [Manuel de formation de 4e cycle sur les enquêtes sur les épidémies de maladies dans la faune sauvage](#)). Cependant, en général, la plupart des échantillons obtenus dans le cadre de la surveillance des agents pathogènes de la faune sauvage ne seront pas aléatoires et seront basés sur ce qu'il est possible de réaliser, compte tenu des difficultés à obtenir des échantillons auprès de la faune sauvage (souvent appelé « échantillonnage de convenance »). Cela affectera les approches analytiques qui peuvent être appliquées aux données de surveillance, la nature des conclusions qui peuvent être tirées des données, et doit donc rester limité dans la mesure du possible. Néanmoins, cette surveillance demeure un outil puissant et essentiel dans la gestion nationale et internationale de la santé animale et humaine et devrait être effectuée dans chaque pays.

Programme de surveillance générale des agents pathogènes de la faune sauvage

Comme indiqué précédemment, la surveillance des agents pathogènes de la faune sauvage se compose de plusieurs éléments qui doivent être coordonnés afin de fournir un programme de surveillance cohérent. Chacune de ces cinq composantes implique des personnes différentes, ayant une formation et des compétences différentes et provenant souvent de différentes branches du gouvernement, d'organisations non gouvernementales ou d'universités. Chacune de ces composantes est décrit plus en détail dans les sections suivantes.

Détection des agents pathogènes et des maladies

La plupart des programmes généraux de surveillance des agents pathogènes de la faune sauvage sont basés sur l'examen d'animaux sauvages trouvés malades ou morts. Ainsi, un élément essentiel d'un programme de surveillance générale des agents pathogènes de la faune sauvage est un réseau de personnes susceptibles de rencontrer des animaux sauvages morts ou malades (voir les recommandations supplémentaires pour la création d'un réseau dans le [Manuel de formation de 5e cycle sur la gestion de l'information sur la faune sauvage](#)). Ces mêmes personnes ou d'autres doivent être disposées à signaler ces découvertes aux autorités compétentes et/ou être formées pour prélever en toute sécurité ces animaux sauvages morts et les transporter vers un laboratoire de diagnostic des maladies animales. Une autre possibilité est que ces personnes soient formées pour autopsier ces animaux sur le terrain et envoyer les échantillons adéquats au laboratoire. La question est de savoir qui peut effectuer ce travail ? La réponse variera sans aucun doute d'un pays à l'autre, mais un programme réussi nécessitera un réseau de personnes qui passent du temps dans des zones habitées par des animaux sauvages, qui peuvent reconnaître des événements de maladie ou de mortalité et qui savent comment signaler les animaux sauvages morts ou malades aux personnes chargées de veiller à ce que les spécimens adéquats soient envoyés à un laboratoire approprié. Ainsi, les programmes responsables de la surveillance des agents pathogènes de la faune sauvage doivent susciter l'intérêt et la coopération continue d'un large éventail de personnes qui passent du temps dans les habitats des animaux sauvages. Il peut s'agir d'agents de la faune sauvage et de biologistes du gouvernement, généralement associés à des ministères, départements ou agences (fédéraux, étatiques/provinciaux, régionaux) responsables de la gestion de la faune sauvage. Ces personnes ont besoin de la permission et de l'encouragement de leur employeur pour participer au programme de surveillance. Les autres participants potentiels sont les chasseurs, les pêcheurs, les naturalistes, les scientifiques universitaires, les organisations de conservation non gouvernementales, les réhabilitateurs de la faune sauvage et le grand public. Les responsables du programme de surveillance des agents pathogènes de la faune sauvage devront allouer du temps et des ressources chaque année pour maintenir et soutenir ce réseau de personnes engagées dans la détection des animaux sauvages malades ou morts et dans le transport des spécimens vers les laboratoires.

Pour obtenir une participation active à un programme de surveillance, les participants ont souvent besoin d'être encouragés à donner la priorité aux activités de surveillance. Cela peut être aussi simple que de montrer la valeur de leurs contributions par des mises à jour régulières du programme et de ses résultats. Ils peuvent également avoir besoin d'une aide financière pour effectuer des activités de surveillance. Les coordinateurs du programme de surveillance doivent

être prêts à fournir une assistance technique sous la forme d'un point de contact compétent ou grâce à des sessions de formation périodiques.

Identification des agents pathogènes et des maladies

Lorsque des animaux sauvages morts ou malades sont détectés, ils doivent être examinés pour déterminer la cause de la maladie ou du décès, et pour savoir de quels agents pathogènes ils peuvent être porteurs. Idéalement, ce travail est effectué par des pathologistes animaliers dans des laboratoires de diagnostic des maladies animales équipés de manière appropriée, avec accès à des microbiologistes, des biologistes moléculaires, des virologues, des parasitologues et des toxicologues. Lors des tests de diagnostic, les laboratoires doivent prendre en compte un large éventail d'agents pathogènes infectieux viraux, bactériens, protozoaires, fongiques et métazoaires, ainsi que différentes toxines, différents contaminants et poisons environnementaux. Les laboratoires disposant de ces capacités sont souvent associés au ministère/département/agence responsable de l'agriculture, de la santé des animaux domestiques et des services vétérinaires dans le pays. Ainsi, les ministères ou agences responsables de la faune sauvage et les ministères ou agences responsables des laboratoires de diagnostic vétérinaire doivent généralement collaborer étroitement à tout programme de surveillance des agents pathogènes de la faune sauvage, si ces fonctions sont séparées.

Gestion de l'information

Tout programme de surveillance des maladies doit disposer d'un système permettant d'enregistrer les informations qu'il génère sur la survenue de maladies ou d'agents pathogènes, afin que ces informations puissent être utilisées pour atteindre les objectifs du programme de surveillance et que des mesures appropriées puissent être prises. L'approche la plus adaptée à la gestion des informations de surveillance est une forme de base de données informatisée ou d'archivage des données de surveillance (voir [Manuel de formation de 5e cycle sur la gestion des informations sanitaires pour la faune sauvage](#)). S'il est possible, dans un premier temps, de gérer ces informations à l'aide de feuilles de calcul ou de logiciels de base de données disponibles pour les ordinateurs personnels, ces logiciels deviennent rapidement insuffisants face à de grandes quantités de données. Il est donc utile, avant de lancer un programme de surveillance, de recruter des personnes ayant des connaissances et des compétences en matière de conception et de gestion de bases de données informatiques. Cela garantira qu'une infrastructure adéquate est en place pour saisir efficacement et avec précision les données de surveillance afin de soutenir efficacement les autres composantes du programme national de surveillance.

Analyse et communication

Afin de comprendre la situation sanitaire actuelle de la faune sauvage dans un pays, il faut « séparer les signaux du bruit » inhérent aux informations recueillies dans le cadre de la surveillance générale. Les experts en statistiques et en épidémiologie sont généralement familiers avec ce type de données et les analyses nécessaires pour les examiner et les résumer. Les analyses requises peuvent impliquer l'estimation de paramètres d'intensité tels que la prévalence, la présence/absence d'une maladie dans un paysage, la probabilité qu'une population soit exempte de maladie ou d'autres paramètres épidémiologiques d'intérêt. Cependant, contrairement aux données de surveillance des animaux domestiques, les données de surveillance de la faune sauvage nécessiteront probablement aussi des biologistes et des

écologues spécialistes de la faune sauvage, qui pourront replacer les données dans le contexte approprié (par exemple, fournir des informations sur la présence des espèces, les pratiques de gestion, les interactions intra- et interspécifiques, les besoins en matière d'habitat, etc.).

La communication des résultats de la surveillance est essentielle et son importance ne peut être surestimée. Elle est non seulement importante pour la diffusion des informations nécessaires pour éclairer les actions de gestion des maladies, mais elle contribue également à maintenir l'intérêt à participer au réseau de surveillance. Les participants au programme de surveillance des maladies de la faune sauvage, y compris les groupes gouvernementaux et non gouvernementaux, s'attendent généralement à voir les résultats du programme de surveillance par le biais de diverses communications des coordinateurs du programme.

Il est recommandé d'établir un plan de communication clair pour le programme de surveillance avant le début du recueil des données, afin d'assurer une diffusion rapide des informations et de fournir les recommandations nécessaires pour la communication avec le public, entre agences et au sein des agences, si une épidémie importante est détectée grâce aux efforts de surveillance. En raison des variations dans les structures gouvernementales, la responsabilité de la gestion des agents pathogènes et des maladies chez les animaux sauvages n'est souvent pas clairement attribuée. Certains agents pathogènes peuvent relever du ministère de la santé, tandis que d'autres peuvent relever du ministère de l'agriculture et des services vétérinaires. La responsabilité de la gestion des populations d'animaux sauvages peut fréquemment relever des ministères de l'environnement, des forêts ou de la pêche. Il peut y avoir une certaine confusion quant à la ou les branches du gouvernement qui devraient être responsables des enquêtes, des réponses et des communications sur les épidémies. Par conséquent, les programmes de surveillance réussis reposent sur des collaborations interministérielles ou interdépartementales préétablies, qui s'accordent sur les objectifs et définissent les rôles et les responsabilités de chaque entité, y compris la communication au public. Un bon plan de communication doit également garantir que les responsables de l'agriculture ou de la santé publique sont contactés en cas de découverte d'une maladie agricole ou zoonotique, ou s'il existe un risque quelconque pour la sécurité alimentaire. Les responsables de l'environnement doivent être informés en cas de détection d'un produit chimique toxique ou d'un autre contaminant environnemental. Les efforts de communication doivent également garantir que les points focaux de la faune sauvage fournissent des données de surveillance des maladies de la faune sauvage à l'OMSA par le biais de l'interface WAHIS-WILD afin de promouvoir des connaissances sur la situation et la coordination internationale de la gestion des maladies de la faune sauvage. Il est également essentiel que la communication et les informations mises à la disposition du public ou des membres non scientifiques du réseau de surveillance soient rapides, précises et rédigées avec des termes non scientifiques. Enfin, si possible, le fait d'employer ou de demander conseil à des spécialistes de la communication peut considérablement améliorer l'efficacité des efforts de communication.

Prise de mesures

La surveillance doit fournir des données ou des informations permettant de prendre des mesures. La surveillance implique la nécessité de fournir les connaissances requises pour protéger la santé des animaux sauvages et potentiellement des animaux domestiques et des populations humaines. Le choix du niveau de réponse à la détection d'agents pathogènes ou de maladies dans les populations sauvages sera très variable, en fonction du pathogène et de l'espèce hôte concernés, de la menace pour les ressources d'un pays et de la disponibilité des ressources. Nous décrivons ci-dessous diverses activités pouvant être entreprises sur la base des données

de surveillance pour protéger la santé, mais le message clé à retenir est que la véritable valeur des données de surveillance réside dans la manière dont elles sont utilisées pour éclairer les actions de gestion.

Coordination d'un programme de surveillance générale des agents pathogènes de la faune sauvage

Les cinq composantes d'un programme de surveillance des maladies doivent être continuellement coordonnées, car c'est la coordination qui permet à ces composantes indépendantes de fonctionner comme un programme de surveillance national. La coordination de tout programme à grande échelle peut s'avérer difficile et nécessiter du personnel à temps plein. Ce personnel est chargé de veiller à ce que les composantes du programme fonctionnent ensemble pour atteindre les objectifs établis du programme de surveillance.

Dans presque tous les pays, la responsabilité de la gestion de la santé et des maladies de la faune sauvage est mal définie, et cette responsabilité est partagée – formellement ou non – entre plusieurs branches différentes du gouvernement, notamment la faune sauvage, l'environnement, la santé publique, l'agriculture, les services vétérinaires, le tourisme, l'économie, les services frontaliers et les relations internationales. Étant donné qu'une seule branche ou agence du gouvernement a rarement l'autorité exclusive sur les problèmes liés aux maladies de la faune sauvage, la responsabilité de coordonner la surveillance des maladies de la faune peut également être floue. La surveillance des maladies de la faune sauvage nécessite également un réseau de personnes différent et très diversifié par rapport aux programmes de surveillance des maladies des humains et des animaux domestiques. Ainsi, les modèles organisationnels pour la coordination et le fonctionnement d'autres programmes de surveillance des maladies peuvent ne pas bien fonctionner pour la surveillance des maladies de la faune sauvage. Par exemple, les biologistes et écologues de la faune sauvage sont des participants essentiels à la surveillance des maladies de la faune sauvage. Les agences gouvernementales telles que les services vétérinaires et la santé publique, qui sont familières avec leurs propres formes de surveillance des maladies, peuvent avoir peu d'expérience en matière de collaboration avec les agences responsables de la faune sauvage et de l'environnement où l'expertise biologique et écologique se trouve. En outre, les organisations non gouvernementales, les universités et d'autres groupes extérieurs au gouvernement sont souvent des participants clés dans la surveillance des maladies de la faune sauvage. Le coordinateur doit comprendre et travailler en étroite collaboration avec ces groupes ainsi qu'avec les agences gouvernementales. Compte tenu de ces défis et de la variabilité entre les pays, il existe de nombreuses façons d'organiser la coordination de la surveillance des maladies de la faune sauvage. Quelques exemples sont donnés ci-après :

1. Coordination par une seule agence gouvernementale. Lorsqu'un organisme gouvernemental a besoin d'informations sur la surveillance des maladies de la faune sauvage ou s'il est responsable d'autres aspects de la santé animale, il est courant que cet organisme estime qu'il doit ou devrait se charger de la coordination du programme national de surveillance des maladies de la faune sauvage. Cela peut fonctionner correctement, à condition que le coordinateur dispose de la flexibilité requise pour impliquer l'ensemble des différents groupes gouvernementaux et non gouvernementaux nécessaires à un programme efficace.
2. Coordination par une coalition d'agences gouvernementales qui gèrent le programme ensemble par le biais d'un accord écrit. Cela présente l'avantage que le programme de

surveillance n'est pas considéré comme la propriété d'une seule agence, et que d'autres agences gouvernementales peuvent être plus disposées à soutenir le programme.

3. Coordination par une organisation non gouvernementale. Ce modèle facilite la collaboration entre les agences gouvernementales de différents ministères et entre les participants gouvernementaux et non gouvernementaux au programme de surveillance. Les ressources du programme peuvent être mises en commun et gérées par le coordinateur, et le programme est exécuté sous l'autorité des agences gouvernementales participantes, qui jouent également un rôle de supervision et de gouvernance.

Peu importe de quelle façon ou par qui la coordination de la surveillance des maladies de la faune sauvage est organisée dans un pays, le point focal de l'OMSA pour la faune sauvage peut jouer un rôle clé pour assurer et faciliter une coordination efficace.

Résumé – Surveillance générale

Dans les sections précédentes, nous avons défini la surveillance générale et les cinq composantes nécessaires à l'établissement d'un programme national de surveillance générale de la santé de la faune sauvage. Ces composantes comprennent la détection et l'identification des agents pathogènes et des maladies, ainsi que la gestion, l'analyse et la communication des informations, et enfin la prise de mesures. Ces composantes doivent être intégrées pour que le programme de surveillance soit réussi. Un programme national de surveillance générale constitue le fondement de tout effort visant à comprendre et à gérer les agents pathogènes présents dans la population d'animaux sauvages d'un pays. Il s'agit d'un outil essentiel pour détecter et répondre aux nouvelles maladies émergentes associées aux agents pathogènes de la faune sauvage.

Programme de surveillance ciblée des agents pathogènes de la faune sauvage

La surveillance ciblée des maladies de la faune sauvage (également appelée surveillance « active ») se définit comme la recherche de preuves de la présence d'un ou plusieurs agents pathogènes particuliers (virus, bactéries, champignons, protozoaires) chez une ou plusieurs espèces animales sauvages hôtes. Contrairement à la surveillance générale des maladies de la faune sauvage, les programmes de surveillance ciblée se concentrent généralement sur la détection du ou des agents pathogènes ou de l'infection ciblés, plutôt que sur les animaux malades. Cependant, cette approche n'est pas universelle et certains programmes de surveillance ciblée sont spécifiquement conçus pour exploiter les informations provenant d'individus présentant des signes de maladie (par exemple, surveillance pondérée de la maladie débilitante chronique). Étant donné la spécificité de la surveillance ciblée, il n'est pas pratique d'élaborer des programmes de surveillance ciblée pour chaque maladie ou pathogène. Les priorités et les critères d'inclusion des agents pathogènes pour la surveillance ciblée varient d'un pays à l'autre et entre les différentes régions du monde. Mais quelle que soit la cible, le système de surveillance doit générer les informations nécessaires pour améliorer la compréhension actuelle d'un certain agent pathogène ou d'une certaine infection, identifier les lieux où il se manifeste ou non, comprendre l'évolution de l'incidence du fardeau au sein de la population, et savoir quand des mesures de gestion appropriées peuvent être prises. Le plus souvent, la décision d'inclure un pathogène ou une infection dans un programme de surveillance ciblée des maladies de la faune sauvage repose sur l'importance du pathogène pour la santé publique et le

bien-être de l'Homme, soit directement (par exemple, agents pathogènes zoonotiques), soit indirectement (par exemple, agents pathogènes pouvant avoir des effets importants sur la production ou le commerce du bétail).

Les programmes de surveillance ciblée des maladies de la faune sauvage sont généralement élaborés et mis en œuvre pour l'une des raisons suivantes : démontrer l'absence d'un pathogène ou d'une infection particulière préoccupant(e) ; ou identifier les tendances ou schémas dans la distribution et l'occurrence de l'agent pathogène. Avec des efforts suffisants, la plupart des programmes de surveillance des maladies ciblées qui visent à démontrer l'absence d'infection sont également capables de détecter la présence d'un agent pathogène s'il se propage dans le pays ou la région. Dans le premier cas (démontrer l'absence d'infection), si le résultat est positif pour aucun animal ou peu d'animaux, les données recueillies peuvent fournir la preuve (avec une certaine confiance statistique) que l'agent pathogène n'est pas présent au-delà d'un certain niveau de prévalence. Lorsqu'un programme de surveillance ciblée de la faune sauvage est conçu pour mesurer l'intensité d'une infection ou identifier les tendances et les schémas de distribution d'un agent pathogène particulier, divers paramètres peuvent être utilisés.

Absence de maladie

Établir l'absence d'un agent pathogène particulier (par exemple, agent pathogène ou maladie à déclaration obligatoire auprès de l'OMSA) au sein d'une population ou d'une région implique le recueil de données de présence/absence auprès d'animaux individuels composant ou habitant la population ou la région. Cela signifie que chaque individu ou un sous-échantillon d'individus concernés est testé pour l'agent pathogène d'intérêt. Si la présence (c.-à-d. si l'agent pathogène est identifié) est établie chez un individu, il est clair que les individus ne sont pas exempts de maladie. S'il s'agissait du seul but de l'enquête, il n'est pas nécessaire de poursuivre le travail. Cependant, même si l'agent pathogène est absent des individus testés, il est possible que l'agent pathogène soit présent mais non détecté. Il peut donc être important d'évaluer la probabilité d'infection sous-jacente de l'agent pathogène au sein de la population ou de la région à des niveaux de confiance statistique spécifiés. Cette probabilité d'infection (c.-à-d. la prévalence de conception) peut être connue si la taille exacte de l'échantillon (décrite ci-dessous) nécessaire pour atteindre un niveau de confiance souhaité pour un taux d'infection nominal spécifié a été recueillie. Cependant, il est courant que le nombre d'individus échantillonnés soit inférieur ou supérieur à cette taille d'échantillon cible. Dans ces cas, un cadre statistique bayésien et le nombre d'individus échantillonnés peuvent être utilisés pour estimer le taux d'infection sous-jacent et sa limite crédible supérieure à 95 %. La limite crédible supérieure de 95 %, qui est généralement la valeur la plus intéressante, est la valeur à laquelle la probabilité que le taux d'infection réel soit inférieur est de 95 %. Elle fournit une valeur seuil supérieure pour les taux d'infection potentiels au sein d'une population. Une référence appropriée décrivant cette technique et la manière d'incorporer des informations auxiliaires peut être trouvée sur le site de l'OMSA à l'adresse <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0089843>.

Prévalence

La prévalence est l'un des paramètres les plus couramment utilisés pour mesurer l'intensité d'un agent pathogène ou d'une maladie. Il s'agit de la proportion d'individus dont on découvre qu'ils sont atteints d'une maladie ou sont porteurs d'un agent pathogène au cours de la surveillance, et qui caractérise l'ampleur de l'infection au sein d'une population. Elle est généralement basée sur un échantillon représentatif de la population et, si elle est basée sur un seul événement

d'échantillonnage, elle résulte d'un « instantané » dans le temps. Cependant, au cours des efforts de surveillance, il peut être difficile de déterminer sur quelle durée le paramètre de prévalence s'applique, car les activités peuvent s'être déroulées sur une longue période avant d'être découvertes. La prévalence et la mesure de la précision associée sont faciles à calculer. Des analyses plus sophistiquées peuvent être menées pour examiner les facteurs de risque ainsi que les relations spatiales et temporelles.

Incidence

L'incidence est un paramètre beaucoup moins utilisé dans le domaine des maladies de la faune sauvage. L'incidence est le taux de *nouveaux* cas au sein d'une population pendant une période donnée et représente le risque d'infection. L'une des principales raisons pour lesquelles l'incidence est rarement employée est qu'elle nécessite un suivi fréquent et régulier de la population pour établir le nombre de nouveaux cas survenus depuis la période de suivi précédente. Cela peut être assez difficile pour les populations d'animaux sauvages qui sont souvent capables de se déplacer à l'intérieur et à l'extérieur d'une région et peuvent succomber à une maladie sans être observées. Cependant, l'incidence peut être employée dans certains cas si les objectifs de l'enquête l'exigent. Par exemple, dans le cas de la surveillance fréquente d'un petit étang à la recherche d'amphibiens morts en raison de la chytridiomycose. Tout comme la prévalence, des efforts de modélisation plus sophistiqués peuvent être entrepris pour expliciter divers facteurs de risque et d'autres relations. La différence entre l'incidence et la prévalence est très importante lorsqu'il s'agit d'enquêter sur les infections qui peuvent entraîner des maladies chroniques ; la différence est moins importante lorsque l'on effectue une surveillance des infections qui ne causent que des maladies aiguës.

Quel que soit le paramètre choisi, les données recueillies par le biais de programmes de surveillance ciblée sont utiles pour identifier les tendances et les schémas d'infection, en particulier sur plusieurs années (pour rechercher des tendances temporelles) ou sur plusieurs régions (pour identifier les zones à risque plus élevé et plus faible). Ces informations peuvent ensuite être utilisées pour informer et améliorer les pratiques sanitaires pour les animaux domestiques, ainsi que les plans et activités de gestion de la faune sauvage.

Composantes de la surveillance ciblée des maladies de la faune sauvage

Après l'identification de l'agent pathogène ou de l'infection cible pour le programme de surveillance, le programme de surveillance ciblée a besoin des mêmes composantes qu'un programme de surveillance générale pour être efficace : gestion et analyse des données recueillies, interprétation et communication des résultats, et prise de mesures. De même, les deux types de programmes de surveillance reposent sur l'existence d'un réseau établi de personnes et d'organisations qui travaillent ensemble et communiquent bien. Enfin, tout comme la surveillance générale, la surveillance ciblée doit inclure un coordinateur qui s'assure que le programme de surveillance atteint ses objectifs en garantissant le bon fonctionnement et l'intégration des composantes.

Résumé – Programme de surveillance ciblée des agents pathogènes de la faune sauvage

Dans les sections précédentes, nous avons défini ce qu'est la surveillance ciblée, décrit les paramètres clés associés à ce type de surveillance et souligné les similitudes entre ses composantes nécessaires et l'établissement d'un programme national de surveillance générale de la santé des espèces sauvages. Un programme national de surveillance ciblée peut être utilisé par un pays pour comprendre le risque actuel de présence d'un agent pathogène ou d'une maladie spécifique au sein des populations d'animaux sauvages, pour mesurer l'intensité de cette maladie, pour en déterminer l'étendue spatiale et pour élaborer des mesures de gestion ou de contrôle si cela est justifié.

CONCEPTION D'UN PROGRAMME DE SURVEILLANCE NATIONAL

Nous avons décrit différents types de surveillance qui pourraient constituer la pierre angulaire d'un programme national de santé de la faune sauvage. Cependant, la question qui se pose alors est de savoir comment choisir le type de surveillance approprié et comment concevoir le programme pour répondre à des besoins spécifiques. L'objectif de cette section est de souligner certaines des considérations clés à prendre en compte pour choisir le type de programme de surveillance à utiliser et déterminer la conception du programme choisi. Il est important de définir ce cadre initial et d'établir clairement une conception appropriée avant de lancer des activités. Le fait de ne pas aborder les problèmes de conception peut entraîner un programme de surveillance inefficace ou, dans le pire des cas, une incapacité à atteindre les objectifs du programme national de santé de la faune sauvage.

Objectifs

Les objectifs sont le fondement sur lequel repose l'ensemble du programme. Des objectifs clairement énoncés permettent non seulement de prédéterminer les activités nécessaires, mais aussi de fournir des conseils pendant la surveillance lorsque des questions se posent. Les objectifs définissent également si le programme doit être axé sur une surveillance ciblée, générale ou sur les deux types de surveillance. Voici quelques questions clés qui peuvent aider à formuler les objectifs:

1. Pourquoi dois-je faire de la surveillance ?
2. Qu'est-ce que j'espère apprendre de mon programme de surveillance ?
3. Quelles données devrai-je recueillir ?
4. Quels groupes d'intervenants devront être mobilisés pour soutenir le programme ?
5. De quelle infrastructure ai-je besoin pour que le programme de surveillance soit un succès ?

La première question constitue le fondement d'un programme de surveillance. La réponse à cette question a des conséquences importantes sur le type de surveillance et la conception de l'étude associée. Voici quelques exemples d'objectifs de surveillance potentiels :

1. S'assurer qu'un agent pathogène/une maladie à déclaration obligatoire auprès de l'OMSA n'est pas présent(e) dans mon pays
2. Déterminer s'il existe une maladie nouvellement émergente dans mon pays
3. Surveiller une maladie établie dans mon pays.

La deuxième question est le prolongement de la première et aide à créer un plan d'étude approprié. Par exemple, le but de l'enquête est-il de savoir si un agent pathogène spécifique est

présent chez des animaux individuels d'une espèce particulière dans une région géographique spécifique, d'estimer la prévalence d'un agent pathogène, de déterminer les facteurs de risque potentiels, de déterminer l'étendue spatiale, etc. Ces informations permettront de déterminer combien d'individus devront être échantillonnés, comment l'échantillonnage sera effectué et à quelle échelle. Si elle est correctement élaborée, la réponse à cette question permettra de définir les populations hôtes à échantillonner, l'étendue géographique et les paramètres qui seront utilisés pour le programme de surveillance.

Il est important de comprendre les besoins en données d'un programme de surveillance pour s'assurer que les informations essentielles sont saisies, et tout aussi important, pour ne pas recueillir trop de données. C'est une impulsion courante d'essayer de recueillir trop d'informations car il existe une multitude de données qui peuvent être enregistrées. Lors de la planification d'un programme de surveillance, il est courant que les planificateurs identifient de très nombreux éléments d'information qui *pourraient* être enregistrés pour chaque occurrence de maladie de la faune sauvage détectée et qui pourraient être utiles. Dans la pratique, cependant, les tentatives de recueil systématique de grandes quantités d'informations pour chaque occurrence de maladie échouent souvent en raison du temps et des efforts nécessaires pour recueillir, enregistrer et saisir les données dans des feuilles de calcul ou des bases de données. Finalement, le processus de recueil et d'enregistrement s'effondre, les enregistrements deviennent partiels et incomplets, et certaines données d'importance critique ne sont pas enregistrées. L'enregistrement des données, leur saisie dans les systèmes informatiques et leur conservation nécessitent du temps et des efforts (ressources). Ainsi, le plus souvent, la bonne pratique consiste à définir la quantité minimale d'informations nécessaires pour atteindre les objectifs du programme de surveillance, et à s'assurer que les données essentielles sont toujours enregistrées et intégrées au dossier permanent pour chaque apparition de maladie.

La réponse à la 4^e question est utile pour identifier les groupes d'individus qui peuvent prélever des échantillons sur les animaux ou à qui il peut être nécessaire de demander des informations concernant les événements de morbidité ou de mortalité, et à qui il peut être nécessaire de communiquer les résultats de la surveillance. La participation des intervenants est une condition préalable au prélèvement d'échantillons et à la surveillance de la santé de la population, car souvent les ressources ne sont pas disponibles pour soutenir le personnel adéquat pour le programme de surveillance si la participation des intervenants fait défaut. De plus, l'implication précoce des intervenants peut être bénéfique pour obtenir le soutien politique nécessaire à la mise en place d'un programme de surveillance. De même, l'identification des intervenants jette les bases de l'élaboration d'une stratégie de communication publique efficace à partir de laquelle les résultats de la surveillance peuvent être diffusés.

Enfin, l'identification de l'infrastructure nécessaire pour soutenir un programme de surveillance permettra de définir la quantité et le type de ressources nécessaires, l'expertise requise et d'établir les collaborations nécessaires pour atteindre les objectifs du programme de surveillance. Répondre à cette question permet également de déterminer si les objectifs du programme de surveillance sont réalistes ou s'ils doivent être revus à la baisse pour correspondre aux ressources disponibles. Cela permet également d'évaluer si le personnel disponible disposera des compétences nécessaires, si d'autres personnes doivent être embauchées ou si une collaboration extérieure doit être mise en place pour combler les lacunes identifiées.

Plan d'échantillonnage

Une fois que des objectifs clairs ont été établis, les étapes suivantes consistent à déterminer :

1. À quel endroit et auprès de quelles populations les échantillons seront-ils prélevés ?
2. Quel est le paramètre d'intérêt ?
3. Combien d'échantillons doivent être prélevés et testés ? De quelle manière ?

Il existe de nombreux plans d'échantillonnage différents qui peuvent être mis en œuvre en fonction des objectifs du programme de surveillance. Nous décrivons ci-dessous plusieurs des considérations importantes en matière de conception. Il convient de noter qu'il y a plus d'aspects de conception à prendre en compte lorsque les objectifs nécessitent un système de surveillance ciblée que lorsqu'ils nécessitent un système de surveillance générale. En effet, la surveillance générale porte sur le plus grand nombre possible d'animaux moribonds ou morts. Cependant, certaines des considérations de conception suivantes s'appliquent aux deux types de systèmes de surveillance, et nous essaierons de mettre ces cas en évidence.

Paramètres

Il existe un éventail de paramètres qui peuvent être utilisés pour résumer et analyser les informations recueillies au cours de la surveillance ciblée, mais le paramètre approprié dépend des objectifs et du type de surveillance à entreprendre. Il est nécessaire de comprendre comment les données seront analysées pour déterminer les autres aspects de la conception d'une étude. Nous avons décrit précédemment trois des paramètres les plus courants utilisés pour résumer les données de surveillance.

Pour la surveillance générale, seules les détections de maladies ou d'agents pathogènes sont généralement signalées ; toutefois, les paramètres de l'absence de maladie ou les estimations de la prévalence à partir d'échantillons prélevés après la détection de la maladie pourraient être calculées. Cependant, la détection d'une maladie ou d'un agent pathogène par le biais de la surveillance générale entraîne souvent un effort de surveillance ciblée dans la population ou la région où la maladie ou l'agent pathogène a été initialement détecté(e).

Quelles espèces d'hôtes doivent être échantillonnées

Pour la surveillance ciblée, une considération de conception importante est de savoir quelles espèces dans la gamme d'hôtes d'un pathogène ou lesquelles parmi celles touchées par une maladie seront incluses dans l'effort de surveillance. L'identification des espèces d'animaux sauvages à échantillonner indiquera de quelle façon les animaux seront capturés ou piégés, à quel endroit et par qui. La détermination d'un échantillon de population approprié nécessite des connaissances préexistantes sur l'agent pathogène ou l'infection cible. Les espèces sauvages qui sont des hôtes compétents (c.-à-d. la gamme d'hôtes) pour l'agent pathogène d'intérêt dans le pays doivent être connues, ainsi que la taille approximative de leur(s) population(s) et leur(s) répartition(s) géographique(s). Ces connaissances préliminaires proviennent, le plus souvent, de la surveillance générale des maladies de la faune sauvage, d'études scientifiques ou de connaissances d'experts.

Le choix des espèces hôtes doit évidemment s'aligner sur les objectifs. Cependant, il existe quelques facteurs à prendre en compte qui peuvent augmenter l'efficacité des efforts de surveillance. Tout d'abord, le comportement de l'agent pathogène cible dans les différentes espèces hôtes est essentiel. Par exemple, au vu de la difficulté de capturer des animaux

sauvages, si l'objectif est de déterminer si une maladie ou un agent pathogène particulier est présent chez les animaux sauvages d'un pays, vous pouvez sélectionner une espèce connue pour développer une maladie réelle (c.-à-d. présenter des symptômes cliniques caractéristiques de la maladie causée par l'agent pathogène cible) plutôt qu'une espèce qui ne développe pas la maladie après l'infection. Cela permettra une surveillance plus ciblée avec un délai réduit de détection de la maladie si elle est présente. Toutefois, si l'objectif du programme de surveillance ciblée est d'estimer la prévalence d'une infection, pour laquelle l'animal sauvage peut être porteur de l'agent pathogène mais peut ne pas développer de maladie clinique, vous pouvez alors choisir d'échantillonner à la fois des animaux apparemment sains et des animaux malades.

Un deuxième aspect important à prendre en compte concerne les facteurs logistiques, par exemple le fait que certaines espèces sont plus faciles à trouver et à échantillonner que d'autres. La concentration des efforts sur ces espèces devrait permettre de maximiser l'utilisation de ressources limitées. Dans d'autres cas, il peut être essentiel de concentrer les efforts sur l'échantillonnage d'espèces rares ou menacées pour comprendre les impacts d'une maladie sur de petites populations. Alternativement, si les impacts sur des populations spécifiques sont moins importants que la compréhension de l'étendue spatiale d'une maladie et qu'une espèce de substitution plus commune est disponible, il peut être conseillé d'échantillonner cette espèce au lieu d'échantillonner l'espèce rare pour éviter tout risque associé à la capture et à l'échantillonnage, tout en obtenant des informations sur l'étendue de la maladie.

Une autre considération peut être la probabilité que l'espèce transmette un agent pathogène à l'Homme ou aux animaux domestiques, auquel cas la surveillance pourrait être ciblée sur les espèces ou les populations les plus susceptibles de transmettre le pathogène au-delà de ces frontières. Dans d'autres situations, il peut être approprié d'échantillonner des animaux domestiques pour déterminer si un agent pathogène de la faune sauvage est présent ou absent d'une zone. Par exemple, les chiens de ferme ont été utilisés pour déterminer si la peste (*Yersinia pestis*) était présente chez les rongeurs locaux. Les chiens, qui chassaient les rongeurs, étaient plus faciles à attraper et à manipuler que les rongeurs sauvages eux-mêmes. Enfin, il peut être utile de concentrer les efforts sur les espèces qui « échantillonnent » une série d'autres espèces, notamment pour la détection des maladies. Cela peut impliquer l'échantillonnage d'espèces prédatrices ou vectrices qui se nourrissent d'une variété d'autres espèces. En fin de compte, le choix de l'espèce ou du groupe d'espèces à inclure dépendra de la situation ; cependant, l'évaluation de la biologie et de l'épidémiologie de l'hôte et du pathogène, des contraintes logistiques et des influences sociétales à travers le prisme des objectifs du programme de surveillance, garantira que la surveillance est non seulement efficace mais aussi efficiente.

Où faut-il prélever les échantillons ?

La considération suivante est de savoir où les échantillons doivent être prélevés pour éclairer le programme de surveillance générale ou ciblée. Si un programme de surveillance est mis en place afin de rechercher des agents pathogènes connus pour affecter les animaux dans une juridiction voisine, les activités de surveillance peuvent être concentrées le long de la région frontalière. La décision de savoir où rechercher un agent pathogène dépend également de l'objectif du programme de surveillance. Si l'intention est de détecter un agent de zoonose important pour la santé publique, la surveillance des espèces sauvages sentinelles pourrait se faire principalement dans les zones urbaines, où vivent le plus grand nombre de personnes. De même, si l'objectif est de détecter un agent pathogène important pour les animaux domestiques, la faune sauvage peut être ciblée à l'intérieur et autour des zones agricoles importantes.

Pour la surveillance ciblée, la région géographique à échantillonner dépendra nécessairement de l'endroit où se trouvent les animaux hôtes d'intérêt et du fait que leur emplacement change ou non au fil du temps. Ceci est particulièrement important lorsque les espèces migratrices sont la cible du programme de surveillance. Par exemple, la surveillance de la grippe aviaire chez la sauvagine dans l'hémisphère nord est souvent effectuée à la fin de l'été et au début de l'automne, lorsque les oiseaux se rassemblent dans les aires de repos avant de migrer vers le sud. À cette époque et à cet endroit, beaucoup d'oiseaux sont réunis dans une zone plus petite, ce qui rend le piégeage plus facile. De plus, beaucoup de ces oiseaux sont des juvéniles de l'année et ils ont tendance à être plus sensibles à l'infection par la grippe aviaire que les oiseaux plus âgés.

Une fois que l'étendue spatiale globale qui sera incluse dans le programme de surveillance est établie, des sous-régions ou des unités au sein de cette région doivent être choisies si l'étendue entière ne peut être étudiée. La première étape de l'échantillonnage des unités géographiques consiste à décider si l'étendue spatiale sera traitée comme une surface continue ou si elle sera agrégée (par exemple, divisée en cellules de grille discrètes) et la méthode d'agrégation (par exemple, grille de cellules de taille égale ou polygones décrivant les frontières politiques). L'agrégation est l'approche la plus courante et sera au centre de notre discussion. En général, ces unités d'échantillonnage peuvent être considérées comme des plans d'échantillonnage à une ou deux étapes. Dans un premier temps, un échantillon d'unités géographiques est sélectionné, puis un recensement (une étape) ou un deuxième échantillon d'individus (deux étapes) est réalisé au sein des unités géographiques sélectionnées. De nombreux modèles probabilistes peuvent être utilisés. Nous décrivons plusieurs choix courants en nous concentrant sur la sélection des unités géographiques, mais des procédures similaires peuvent être mises en œuvre lors de la deuxième étape si les animaux individuels ne peuvent pas être échantillonnés complètement au sein des unités géographiques sélectionnées. Remarque : pour mettre en œuvre bon nombre des techniques d'échantillonnage décrites ci-dessous, il faut connaître le nombre total d'unités géographiques qui seront incluses dans le programme de surveillance. Nous décrivons la détermination de ce nombre total dans la section suivante de ce manuel.

L'échantillonnage aléatoire simple est le plan d'échantillonnage probabiliste le plus courant et le plus facile à mettre en œuvre. Il demande à ce que chaque unité ait une probabilité égale d'être incluse dans le programme de surveillance. Si les données sont agrégées, cela peut être réalisé en attribuant à chaque cellule de la grille une probabilité égale d'être sélectionnée. Un échantillon aléatoire peut ensuite être sélectionné à l'aide de nombreux logiciels. Si les données sont traitées en données continues, « n » points aléatoires doivent être générés dans l'étendue spatiale. Il existe plusieurs logiciels spécialisés permettant de faciliter la sélection des points, notamment le programme statistique R (<https://www.r-project.org/>) ainsi que de nombreux logiciels de Systèmes d'information géographique différents.

Un autre type d'échantillonnage courant est l'échantillonnage aléatoire stratifié. Un échantillon aléatoire stratifié est utilisé lorsqu'un échantillon aléatoire est souhaité, mais qu'il existe diverses strates non chevauchantes au sein de l'étendue spatiale qui sont importantes et doivent donc être incluses dans le programme de surveillance. Pour employer cette technique, des échantillons aléatoires indépendants de taille égale sont tirés de chaque strate en utilisant les procédures décrites ci-dessus. Ainsi, le nombre total d'unités géographiques qui seront contrôlées pendant la surveillance est réparti de manière égale entre toutes les strates d'intérêt. Par exemple, supposons que nous ayons des strates développées et non développées par l'Homme dans notre étendue spatiale, et que les régions développées par l'Homme couvrent une zone géographique nettement plus petite. Nous pourrions être intéressés par l'évaluation des différences d'intensité de l'épidémie entre ces strates. Dans ce cas, l'échantillonnage aléatoire stratifié est un plan d'échantillonnage approprié. Il est important de noter qu'il existe plusieurs moyens possibles de

répartir la taille des échantillons entre les strates au-delà des tailles d'échantillons égales. Un statisticien doit être consulté pour s'assurer que des plans d'échantillonnage optimaux sont mis en œuvre.

Dans les approches d'échantillonnage précédentes, la probabilité qu'une unité ou un emplacement géographique soit sélectionné(e) était égale pour l'ensemble des unités ou emplacements. Cependant, les plans d'échantillonnage à probabilité inégale, avec des probabilités de sélection variables, peuvent également être appropriés et sont souvent souhaitables dans certaines situations. L'échantillonnage à probabilité inégale est utilisé lorsqu'il existe des informations auxiliaires qui doivent être prises en compte. Ces informations peuvent ensuite être utilisées pour améliorer nos estimations des paramètres de la maladie (c.-à-d. en réduire la variabilité) ou augmenter notre probabilité de détecter un agent pathogène s'il est présent dans notre étendue spatiale. Par exemple, supposons que nous pensons que la probabilité de détecter un agent pathogène est liée à la densité de l'hôte dans le paysage. De plus, nous disposons d'estimations de la densité des hôtes variant dans l'espace sur l'étendue spatiale qui nous intéresse. Si nous avons agrégé notre étendue spatiale, nous pouvons estimer la densité pour chaque cellule. Nous pouvons ensuite utiliser la méthode de la taille cumulée afin d'estimer la probabilité d'échantillonnage pour chaque cellule de la grille. En général, les logiciels statistiques tels que le programme R (<https://www.r-project.org/>) peuvent facilement sélectionner des unités en utilisant un plan de probabilité d'échantillonnage inégal. Une autre utilisation courante des plans à probabilité d'échantillonnage inégal consiste à utiliser la proximité spatiale d'une cellule de la grille par rapport à l'emplacement d'un site d'épidémie connu. Ainsi, les cellules de la grille proches de l'épidémie sont échantillonnées avec une forte probabilité, et cette probabilité diminue avec l'éloignement du site. Si l'étendue spatiale d'intérêt n'est pas agrégée, des probabilités d'échantillonnage inégales peuvent être utilisées pour générer des emplacements géographiques ; toutefois, ces techniques sont plus complexes et il convient de consulter un statisticien. Par conséquent, ce sujet ne sera pas abordé ici.

Les détails de la mise en œuvre de ces trois plans d'échantillonnage ont été décrits dans le [Manuel de formation de 4^e cycle sur les enquêtes sur les épidémies de maladies de la faune sauvage](#) en utilisant les enquêtes sur les épidémies comme études de cas. Cependant, les techniques s'appliqueront tout aussi bien à la sélection des unités géographiques dans lesquelles effectuer la surveillance.

Le dernier type d'échantillonnage que nous allons décrire est l'échantillonnage de convenance, qui est le type d'échantillonnage le plus courant, en particulier pour les efforts de surveillance générale. Malheureusement, bien qu'il s'agisse du moyen le plus courant de sélectionner les unités à échantillonner pour la surveillance, c'est aussi le moins rigoureux. L'échantillonnage de convenance ne s'appuie pas sur un fondement probabiliste pour choisir les unités géographiques ou les emplacements ; les enquêteurs utilisent plutôt leur propre jugement pour décider quelles cellules de grille ou quels emplacements seront sélectionné(e)s. La décision est généralement basée sur des considérations logistiques, telles que la facilité d'accès. Bien que cette approche d'échantillonnage soit la plus facile à mettre en œuvre, elle est problématique pour plusieurs raisons. Premièrement, elle n'est pas reproductible, ce qui est l'un des principes en matière de recherche scientifique. Deuxièmement, elle peut créer des échantillons biaisés qui conduisent à des déductions incorrectes. Enfin, elle peut sévèrement limiter les déductions réalisées à partir des données recueillies, à moins d'émettre des hypothèses fortes et généralement invalides. Nous ne recommandons pas d'utiliser l'échantillonnage de convenance et suggérons d'utiliser un schéma d'échantillonnage probabiliste chaque fois que cela est possible !

Quel que soit le type d'échantillonnage utilisé pour sélectionner les unités géographiques à inclure dans le programme de surveillance, le résultat final est une liste d'unités au sein de la plus grande étendue spatiale d'intérêt qui sera au centre du programme. Si possible, nous suggérons d'inclure un statisticien dans la conception du programme de surveillance. Il peut apporter l'expertise technique nécessaire pour s'assurer que la sélection des unités géographiques, du nombre d'unités et des animaux (décrit ci-dessous) est effectuée de façon à correspondre adéquatement aux objectifs du programme.

Taille de l'échantillon – Combien d'unités géographiques doivent être incluses ?

La détermination des tailles d'échantillons nécessaires lorsque des considérations géographiques sont incorporées dans les plans d'échantillonnage probabiliste peut être complexe. En effet, pour un coût donné, il existe des compromis entre le nombre d'unités géographiques échantillonnées et le nombre d'individus échantillonnés au sein d'une unité géographique (décrit ci-dessous). En général, les informations suivantes ou une approximation seront au minimum nécessaires :

1. Précision ou confiance souhaitée pour le paramètre utilisé par le programme de surveillance.
2. Sensibilité et spécificité des tests de diagnostic.
3. Coûts associés à l'échantillonnage des unités géographiques et des animaux individuels.
4. Variabilité du paramètre entre les unités géographiques.
5. Variabilité du paramètre entre les animaux individuels au sein des unités géographiques.

Pour les plans d'échantillonnage à une étape, il est possible d'utiliser les outils permettant de déterminer la taille des échantillons pour les individus d'un seul site, comme décrit précédemment. En outre, à l'adresse <https://epitools.ausvet.com.au/>, AusVet fournit quelques outils pour calculer la taille des échantillons lorsque l'objectif est de démontrer l'absence d'une maladie ou d'un agent pathogène à l'aide d'une conception en deux étapes. Les outils sont configurés pour échantillonner des individus dans plusieurs troupeaux, mais ils peuvent également être utilisés pour échantillonner des unités géographiques en reconnaissant que les unités géographiques peuvent être utilisées à la place de troupeaux individuels. Cependant, en général, lors de l'utilisation de plans d'échantillonnage en deux étapes pour estimer les paramètres d'intensité de la maladie lors d'une surveillance ciblée, il sera nécessaire de consulter un statisticien car les tailles d'échantillons requises des unités géographiques et des animaux individuels au sein des unités nécessiteront le calcul des variances et constitueront souvent un problème d'optimisation informatique. Plus précisément, la recherche de la solution optimale peut nécessiter l'écriture d'un code informatique personnalisé afin de maximiser la précision tout en minimisant les coûts, et devra être adaptée à chaque enquête sur une épidémie.

Taille de l'échantillon – Combien d'échantillons de surveillance doivent être prélevés au sein d'une unité géographique donnée ?

Il s'agit principalement d'une considération pour le système de surveillance ciblée, car on peut supposer que le plus grand nombre possible d'animaux moribonds ou morts sont prélevés dans les unités géographiques lors des programmes de surveillance générale. Ainsi, au sein de chaque unité géographique incluse dans un programme de surveillance ciblée, les calculs de la taille de l'échantillon peuvent être utilisés pour estimer l'effort d'échantillonnage des animaux individuels nécessaire pour atteindre les objectifs du programme de surveillance. La première étape de l'estimation des tailles d'échantillons nécessaires consiste à définir clairement la population d'intérêt. Cela peut être assez simple, par exemple des chauves-souris dans un hibernaculum, ou demander une certaine réflexion. Par exemple, une enquête sur la mortalité d'oiseaux migrateurs impliquant plusieurs espèces. Quoi qu'il en soit, l'importance de cette étape ne saurait être surestimée, car elle détermine la base de l'échantillonnage, laquelle fournit le contexte pour les calculs de la taille des échantillons. Par exemple, si nous disons « Je veux prélever suffisamment d'échantillons dans le cadre de mon programme de surveillance générale pour détecter une prévalence de 1 % du pathogène X avec un niveau de confiance de 95 % », mais que je ne donne pas de définition de la population, alors cette déclaration n'a aucune signification probabiliste. En d'autres termes, cela signifie que l'exigence de prévalence de 1 % suppose intrinsèquement qu'il existe une population à laquelle la prévalence s'applique, et si la définition de la population fait défaut... la valeur de 1 % n'est pas interprétable. La définition de la population est également importante pour déterminer l'étendue spatiale de l'échantillonnage (décrit ci-dessous) qui doit être effectué et est nécessaire lors de la communication des résultats.

Une fois la population d'intérêt établie, le nombre d'animaux qui doivent être testés dans le cadre d'un programme de surveillance dépend de trois facteurs principaux :

1. Le degré de confiance que vous souhaitez avoir dans les estimations générées par les données de surveillance. Traditionnellement, la plupart des programmes de surveillance, quel que soit leur objectif, visent à atteindre un niveau de confiance de 95 % ou 99 %.
 - Si l'objectif du programme de surveillance est de démontrer l'absence d'infection et qu'aucun des animaux échantillonnés n'est positif, alors le niveau de confiance est une mesure de la certitude que vous pouvez avoir que l'agent pathogène n'est pas présent dans la population.
 - Si l'objectif du programme de surveillance est d'estimer la prévalence du pathogène dans la population, alors le niveau de confiance est une mesure de la certitude que vous pouvez avoir que la prévalence réelle se situe dans la fourchette de la prévalence apparente que vous avez calculée.
2. La taille ou l'estimation de la taille de la population d'intérêt.
 - La plupart des populations sauvages sont d'assez grande taille ; par conséquent, la taille de la population d'intérêt n'a pas d'impact important sur le nombre d'animaux à inclure dans le programme de surveillance. Cependant, dans le cas d'espèces en péril ou d'autres petites populations, il arrive parfois que la taille d'échantillon normalement requise représente une grande proportion de tous les animaux de la population, voire un nombre supérieur à

la population totale. Dans ces situations, la taille de l'échantillon peut et doit être recalculée en tenant compte de la petite population totale (voir ci-dessous).

3. Les caractéristiques des tests de diagnostic utilisés.

- Les tests de diagnostic sont rarement parfaits et peuvent surestimer ou sous-estimer le nombre d'animaux infectés ou non (décrit ci-dessous). Ceci est particulièrement le cas pour les populations d'animaux sauvages pour lesquelles il existe peu de tests de diagnostic validés. La sensibilité et la spécificité des tests de diagnostic peuvent augmenter OU diminuer la taille de l'échantillon nécessaire.

À partir de ces informations, il existe quelques équations de base qui peuvent être utilisées afin de calculer la taille d'un échantillon pour les programmes de surveillance. Les équations sont un peu différentes, selon l'objectif du programme. Dans le cas d'une surveillance visant à détecter une infection ou à démontrer que l'agent pathogène n'est pas présent à une valeur donnée ou se situe en dessous de cette valeur, l'équation ci-dessous peut être utilisée pour estimer la taille de l'échantillon nécessaire :

$$n = \left(1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{D}}\right) \times \left(N - \frac{(D-1)}{2}\right),$$

où α = niveau de confiance souhaité, N = nombre d'animaux dans la population d'intérêt, D = nombre d'animaux infectés dans la population d'intérêt et n = taille minimale de l'échantillon nécessaire pour être sûr à 95 % que l'agent pathogène est présent à/ou inférieur à la prévalence spécifiée (c.-à-d. $\frac{D}{N}$), si aucun animal infecté n'est observé. Les deux propriétés suivantes sont fondamentales concernant le calcul de la taille de l'échantillon :

- Plus vous vous attendez à ce que l'infection soit rare, plus le nombre d'animaux à tester sera important ; et
- plus la population d'intérêt est importante, plus le nombre d'animaux (mais moins la proportion d'animaux) à tester sera élevé(e).

L'équation ci-dessus suppose une sensibilité et une spécificité parfaites du test de diagnostic utilisé, et ne tient donc pas compte des caractéristiques des tests de diagnostic utilisés. Lorsque les caractéristiques des tests de diagnostic doivent être incluses dans les calculs de la taille de l'échantillon, ces derniers deviennent plus compliqués et sont souvent résolus numériquement. Heureusement, il existe un certain nombre d'outils disponibles qui prennent des informations sur les trois facteurs décrits ci-dessus et peuvent être utilisés pour déterminer les tailles d'échantillon nécessaires. Une suite d'outils basée sur le Web, appelée EpiTools, peut être consultée sur <https://epitools.ausvet.com.au/>. Cette suite d'outils est assez complète et constitue un outil de planification de la surveillance précieux lorsqu'on tente de détecter une maladie.

Si un agent pathogène a déjà été détecté dans une population, un programme de surveillance est souvent mis en place pour déterminer l'intensité de la maladie dans une population. La question est alors de savoir combien d'animaux il faut tester pour déterminer la prévalence de l'agent pathogène dans la population concernée. Pour réaliser ce calcul, vous devez utiliser différentes équations ; toutefois, les informations nécessaires sont similaires : 1) une estimation de la prévalence réelle et 2) le niveau de confiance que vous souhaitez ou exigez. Vous devrez

également décider dans quelle mesure vous souhaitez que le taux de prévalence estimé à partir de vos données de surveillance soit proche de la prévalence réelle. Lorsque de bonnes informations sur la prévalence des agents pathogènes dans la population ne sont pas disponibles, vous pouvez calculer une taille d'échantillon basée sur plusieurs estimations de la prévalence différentes mais possibles et équilibrer la gamme résultante de tailles d'échantillon avec les ressources disponibles.

Équations :

a) Pour une confiance de 95 % : $n = \frac{4 \times P(1-P)}{L^2}$

b) Pour une confiance de 99% : $n = \frac{6.6 \times P(1-P)}{L^2}$,

où P = estimation de la prévalence réelle de l'agent pathogène dans la population d'intérêt et L = erreur admissible, qui est une mesure de la proximité souhaitée entre la prévalence apparente et la prévalence réelle.

En général, plus l'estimation de la prévalence est extrême (c.-à-d. si l'on pense que presque tous les animaux de la population sont infectés ou que pratiquement aucun animal n'est infecté), plus le nombre d'échantillons nécessaires pour atteindre le niveau de confiance souhaité est faible. Lorsque les caractéristiques du test doivent être incluses dans les calculs de la taille de l'échantillon, les équations ci-dessus sont insuffisantes, mais là encore, il existe des programmes disponibles en ligne qui calculeront la taille de l'échantillon nécessaire pour estimer la prévalence et tenir compte de l'imperfection des tests. À titre d'exemple, les mêmes chiffres ci-dessus ont été saisis dans la page de calcul de la taille de l'échantillon de prévalence développée par Ausvet (<http://epitools.ausvet.com.au/content.php?page=PrevalenceSS>).

Si vous effectuez une surveillance au sein d'une petite population (par exemple, des espèces rares), vous devrez peut-être corriger l'estimation de la taille de l'échantillon pour les petites populations. À partir des exemples ci-dessus, vous avez d'abord déterminé (en supposant un test parfait) que vous deviez tester 3 458 animaux. Mais que se passerait-il s'il n'y avait qu'environ 5 000 animaux au total dans la population d'intérêt ? Il y a suffisamment d'animaux, mais il pourrait être très difficile d'obtenir autant d'échantillons. Si la taille d'échantillon requise calculée représente 10 % ou plus de la population totale, vous pouvez ajuster la taille d'échantillon en utilisant l'équation suivante :

$$\frac{1}{n^*} = \frac{1}{n} + \frac{1}{N}$$

où n^* = taille d'échantillon corrigée, n = taille d'échantillon estimée avant correction à partir des équations ci-dessus ou d'un outil en ligne et N = taille de la population. Vous pouvez également ajouter des informations au programme en ligne sur EpiTools et il tiendra compte de la petite population pour vous, ainsi que des paramètres de performance des tests.

En conclusion, tous les calculs de la taille de l'échantillon fournissent des estimations de la taille minimale de l'échantillon. Il est bon d'augmenter le nombre d'échantillons au-dessus de la valeur minimale, même lorsque les caractéristiques des tests de diagnostic ont été prises en compte, dans le cas où certains échantillons sont mal manipulés, où il y aurait un problème au laboratoire ou si d'autres problèmes imprévus survenaient.

Qui échantillonner dans une zone ou une population d'intérêt ?

Le choix des animaux à inclure dans un programme de surveillance ciblée dépend des objectifs de ce programme. Par exemple, si l'objectif du programme de surveillance ciblée est de détecter l'arrivée potentielle d'un nouvel agent pathogène, vous pouvez cibler les animaux qui présentent des signes cliniques de l'agent pathogène ou de l'infection. Dans ce cas, vous voulez simplement savoir si l'agent pathogène est présent dans la population ou non. Le sous-groupe d'animaux de la population qui présente des signes cliniques typiques est plus susceptible d'être infecté par l'agent pathogène d'intérêt que le sous-groupe beaucoup plus important d'animaux apparemment sains. En vous concentrant sur les animaux malades, vous augmentez effectivement la prévalence réelle dans la population d'intérêt, et par conséquent le test de laboratoire utilisé dans le programme de surveillance est mieux à même de prédire l'infection (meilleures valeurs prédictives positives). Cette idée est la base de la surveillance pondérée, qui a été utilisée pour accroître l'efficacité de la détection de la maladie du dépérissement chronique en Amérique du Nord.

À l'inverse, si l'objectif du programme de surveillance ciblée des maladies de la faune sauvage est de déterminer la prévalence des agents pathogènes pour la population, les animaux échantillonnés doivent être aussi semblables que possible à l'ensemble de la population (c.-à-d. que si la population est composée à 60 % de femelles, l'idéal serait que 60 % des animaux échantillonnés soient également des femelles). Il n'est pas facile d'obtenir un échantillon représentatif d'une population d'animaux sauvages. Idéalement, pour garantir que les animaux échantillonnés sont représentatifs de l'ensemble de la population, il convient d'utiliser une approche d'échantillonnage aléatoire. Malheureusement, il est rarement possible de réaliser un échantillonnage véritablement aléatoire dans le cadre de la surveillance de la faune sauvage. De plus, on dispose généralement de peu d'informations sur la population concernée, notamment des estimations précises du nombre d'animaux, de leur sexe, de leur âge ou de leur localisation. Par conséquent, il convient de faire un maximum d'efforts pour obtenir un échantillon aussi représentatif que possible lorsque l'objectif de la surveillance est d'estimer l'intensité d'une maladie ou d'un agent pathogène au sein d'une population ou d'une zone d'intérêt ; il faut toutefois reconnaître qu'il peut exister un biais dans les mesures provenant d'un échantillon non représentatif.

Biais

Chaque fois qu'un échantillon est prélevé dans une population, il est possible qu'un biais soit introduit. Un échantillon biaisé est un échantillon systématiquement différent de la population dans son ensemble, ce qui signifie essentiellement que les mesures peuvent être supérieures ou inférieures à ce qu'elles devraient être. Par exemple, si les échantillons sont prélevés auprès de chasseurs, les animaux qu'ils tuent peuvent ne pas être représentatifs de l'ensemble de la population concernée. Les chasseurs peuvent sélectionner de préférence des animaux plus gros et en meilleure santé dans une population. Les échantillons peuvent provenir d'animaux plus âgés ou un sexe peut être plus représenté que l'autre. Si des animaux sont piégés vivants et que des échantillons sont obtenus, les animaux piégés peuvent être différents de la population globale d'une certaine manière. Toutes ces différences introduisent un biais dans les résultats de la surveillance, et il peut même ne pas être possible de savoir dans quelle direction se situe le biais des résultats (c.-à-d. si les estimations sont trop élevées ou trop faibles). Par conséquent, la reconnaissance des biais potentiels doit être prise en compte dans l'interprétation et la communication des résultats.

PRÉLÈVEMENT D'ÉCHANTILLONS AUPRÈS D'ANIMAUX SAUVAGE POUR DES TESTS DE DIAGNOSTIC

Le matériel de cette section a été adapté de :

White, C.L. and Dusek, R.J., 2015, Wildlife specimen collection, preservation, and shipment, in Franson, J.C., Friend, M., Gibbs, S.E.J., and Wild, M.A., eds., Field manual of wildlife diseases: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 15–C4, 24 p., <http://dx.doi.org/10.3133/tm15c4>.

Choisir un type d'échantillon

L'objectif de la surveillance et la disponibilité des spécimens sont deux paramètres à prendre en compte lors du choix du type d'échantillon pour les tests de diagnostic dans le cadre de la surveillance de la faune sauvage (Tableau 1). Pour déterminer la cause de la mort, il faut généralement disposer de plusieurs carcasses fraîches et intactes d'animaux touchés afin de pouvoir examiner les tissus à la recherche de lésions macroscopiques et microscopiques et pour effectuer des tests de diagnostic. Lorsque l'objectif de la collecte d'échantillons est de déterminer la présence d'agents pathogènes circulant chez des animaux apparemment sains ou lorsque les animaux malades ne peuvent pas être capturés ou euthanasiés, divers échantillons provenant d'animaux vivants peuvent être prélevés. Il s'agit notamment de sang, de poils, de plumes, de selles, d'ectoparasites ou d'échantillons obtenus par écouvillonnage de lésions ou d'orifices. Le prélèvement d'échantillons environnementaux (par exemple eau, sol, selles) peut également être utile lorsque les agents pathogènes sont causés par un phénomène ponctuel (par exemple, des toxines produites pendant les proliférations d'algues nuisibles) ou quand ils persistent dans l'environnement (par exemple, anthrax).

Sélection de spécimens individuels en vue d'un prélèvement

Lors d'une enquête sur un événement de mortalité, les spécimens idéaux pour l'évaluation diagnostique sont une combinaison d'animaux malades euthanasiés (après observation et enregistrement des signes cliniques) et des carcasses les plus fraîches possible. L'examen de 2 à 3 spécimens d'animaux malades et morts de chaque espèce touchée maximisera la capacité à détecter la présence de maladies multiples, ce qui est fréquent lors d'un événement de mortalité. Les carcasses les plus fraîches doivent être utilisées pour l'évaluation diagnostique car le processus de décomposition peut entraver la capacité à détecter les lésions tissulaires ainsi que la présence de pathogènes. Les animaux qui sont morts récemment présentent généralement les caractéristiques suivantes : les yeux sont intacts (de préférence non enfoncés ou troubles), les plumes/poils ne s'arrachent pas facilement, aucune odeur perceptible et aucune trace de charognard apparente. Avant d'euthanasier les animaux, le type de tests à effectuer doit être pris en compte. Par exemple, l'utilisation d'une arme à feu ou d'un dispositif d'étourdissement au niveau de la tête est à proscrire pour des maladies telles que la rage qui nécessitent des échantillons de cerveau pour les tests. L'injection létale de produits chimiques peut également affecter les résultats des tests de diagnostic de certains agents pathogènes.

Tableau 1. Types d'échantillons courants utilisés pour détecter la présence ou l'exposition d'agents pathogènes chez les animaux sauvages. Les fiches techniques sur les maladies non répertoriées par l'OMSA fournissent des informations supplémentaires sur le type d'échantillons et de tests nécessaires pour les maladies importantes de la faune sauvage.

Type d'échantillon	Utilisations	Exemples	Commentaires
Carcasses intactes	Détermination de la cause du décès/de la morbidité	Divers agents infectieux (viraux, bactériens, parasitaires) ou non infectieux (substances toxiques)	Permet de tester de multiples tissus pour de multiples agents pathogènes et d'examiner les tissus pour la recherche de lésions macroscopiques et microscopiques
Sang	Preuve d'une exposition actuelle ou antérieure à divers agents pathogènes (par ex. anticorps) et contaminants (par ex. résidus ou altération de l'activité enzymatique) et présence d'agents pathogènes transmissibles par le sang (par ex. hématozoaires)	Morbillivirus, herpèsvirus endothéliotrope de l'éléphant, grippe équine Plomb, empoisonnement par un insecticide, mercure, biphényles polychlorés Paludisme, leucocytozoonose, babésiose	Le fait que les anticorps indiquent une infection actuelle ou une exposition antérieure dépend de la maladie et parfois de l'espèce. Des tests appariés d'individus peuvent parfois être utilisés pour établir le statut de l'infection.
Écouvillons	Présence d'agents pathogènes, excréation	Grippe aviaire (écouvillons cloacaux et oraux pharyngés/trachéaux) <i>Batrachochytrium dendrobatidis</i> (écouvillon cutané)	Utile pour l'échantillonnage d'un grand nombre de spécimens pour un seul pathogène (surveillance ciblée) ; n'indique pas si le pathogène provoque la maladie
Selles	Excrétion d'agents pathogènes, présence de parasites	<i>Salmonella</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Cryptosporidium spp.</i> , <i>M. Paratuberculosis</i> <i>Toxoplasmosis gondii</i> , <i>Sarcocystis neurona</i>	Utile pour déterminer la présence d'un agent pathogène ou d'un parasite dans une population ou une zone lorsque la capture d'animaux n'est pas possible. Difficile d'associer les résultats à des animaux individuels. N'indique pas si l'agent pathogène provoque une maladie dans la population.

Prélèvement de spécimens d'animaux sauvages

Prélèvement et conservation des carcasses

Le prélèvement des carcasses doit être effectuée en portant un équipement de protection individuelle approprié (des gants au minimum). Chaque animal doit être placé individuellement dans un sac ou un conteneur avant de quitter le site de l'événement. Lors du ramassage des carcasses, il faut veiller à ne pas répandre de fluides infectieux provenant des carcasses dans l'environnement et l'ensemble du matériel de terrain doit être nettoyé et désinfecté avant de quitter le site.

La réfrigération des carcasses dès que possible après leur prélèvement permet de ralentir le processus de décomposition qui dégrade les tissus et entraîne une prolifération des bactéries susceptibles d'interférer avec la détection des organismes pathogènes. Les processus de décomposition sont accélérés à températures élevées ; il est donc particulièrement important, pendant les mois les plus chauds, d'utiliser une glacière contenant de la glace ou des blocs de glace afin de transporter les carcasses depuis le site de prélèvement. Si les tissus doivent être examinés pour la recherche de lésions macroscopiques ou microscopiques (histologie), les carcasses ne doivent pas être congelées ; en effet, la congélation provoque la rupture des membranes cellulaires et interfère avec l'interprétation des lésions tissulaires causées par un agent pathogène. La congélation n'interfère toutefois pas avec la plupart des tests de détection des agents pathogènes, notamment les cultures bactériennes, virales et fongiques, les résidus chimiques, les tests de réaction en chaîne par polymérase (PCR) et l'identification des parasites. Par conséquent, la congélation est généralement recommandée si les carcasses ne peuvent pas être examinées dans les 72 heures suivant leur prélèvement.

Prélèvement de tissus

Lorsqu'il n'est pas possible de prélever une carcasse entière pour les tests de diagnostic, des échantillons de tissus de divers organes peuvent être prélevés et conservés pour les tests. Avant de disséquer un animal, il convient de procéder à une évaluation externe afin de noter toutes les anomalies, car elles peuvent fournir les premiers indices sur la cause de l'événement. Les fournitures et équipements de base à inclure dans un kit de terrain pour le prélèvement de tissus varient en fonction de l'espèce échantillonnée et des types d'analyses de laboratoire. Le fait de disposer d'un kit préemballé contenant des fournitures de base pour l'échantillonnage, stocké avec des kits de prélèvement des carcasses au bureau ou dans le véhicule, augmentera les chances d'avoir tout ce dont vous avez besoin au moment où vous en avez besoin, car des événements de mortalité peuvent survenir à tout moment.

Les petits sacs en plastique étanches sont des contenants de spécimens de tissus utiles et peu coûteux. Le spécimen doit être identifié directement sur le sac avec un marqueur résistant à l'eau. Si des lésions sont constatées et si cela est possible, prélevez plusieurs échantillons à partir de celles-ci. Chaque échantillon pour la microbiologie et la virologie doit peser environ 1 gramme (g). Environ 2 g de tissus sont généralement suffisants pour les tests toxicologiques, mais 5 à 10 g peuvent être nécessaires si plusieurs tests toxicologiques doivent être effectués. Pour l'histologie, les sections ne doivent pas mesurer plus de 1 cm d'épaisseur afin de permettre au fixateur de pénétrer dans le tissu. Les échantillons de tissus doivent inclure tout ou partie de la lésion ainsi que des tissus adjacents d'apparence saine.

Les échantillons de tissus doivent être rapidement refroidis ou congelés s'ils ne peuvent pas être examinés dans les 72 heures. Si des conservateurs sont disponibles, les tissus destinés à l'histologie peuvent être placés immédiatement dans une solution de formol tamponné à 10 % ou d'éthanol à 95 % (à l'exception des amphibiens où de l'éthanol à 70-75 % doit être utilisé). Si vous utilisez du formol, il convient de prendre des précautions particulières afin d'éviter tout contact avec la peau ou l'inhalation de vapeurs. Certains agents pathogènes peuvent également être détectés grâce à des techniques moléculaires sur des échantillons conservés dans une solution de formol à 10 % (ou de l'éthanol). Cependant, si vous avez des doutes quant à l'impact des conservateurs sur l'analyse, vous devez contacter le laboratoire qui effectue l'analyse. Le volume du conservateur doit être environ 10 fois supérieur au volume de tissus. Les récipients de stockage peuvent être en verre, en plastique ou en métal, mais notez que certains plastiques et matériaux métalliques peuvent contenir des substances qui interfèrent avec les analyses chimiques. Il est donc prudent de contacter le laboratoire avant le prélèvement si ces analyses peuvent être nécessaires. Après 2 ou 3 jours dans du formol à 10 %, les tissus peuvent être transférés dans des sacs en plastique étanches qui contiennent suffisamment de formol pour conserver l'humidité des tissus. Les numéros d'identification des spécimens peuvent être inscrits au marqueur permanent ou au crayon sur une carte en papier placée à l'intérieur du sac avec les tissus. Les informations d'identification doivent également être inscrites sur le sac lui-même. Les sacs doivent être conservés de manière à éviter l'écrasement des tissus.

Prélèvement sanguin

Les personnes qui prélèvent du sang sur des animaux vivants doivent recevoir une formation sur les techniques de prélèvement et la contention des animaux afin d'éviter des blessures traumatiques à l'animal et à la personne qui réalise le prélèvement. L'utilisation d'anesthésiques peut être nécessaire lorsque la procédure de prélèvement provoquera plus qu'une douleur ou un stress léger(ère) ou momentané(e). Le sang peut être utilisé pour un large choix d'analyses, notamment un dépistage médical, la détection ou l'exposition aux agents pathogènes (par exemple, anticorps) et l'analyse des contaminants. Les tests de diagnostic peuvent aller de la détermination relativement simple de l'hématocrite (Hte) pour l'anémie et la préparation de frottis sanguins pour examiner la présence de parasites sanguins, à l'analyse PCR plus complexe destinée à la détection de l'ARN des pathogènes et aux techniques d'isolement des virus. Bien que de nombreux tests soient disponibles sur divers composants sanguins, certains des types d'échantillons les plus courants sont l'hématocrite, les frottis sanguins, le sérum sanguin, le plasma sanguin, la conservation de l'ADN ou de l'ARN des agents pathogènes et des hôtes, et le sang total.

Le nombre et les types de tests à effectuer ainsi que la taille de l'animal déterminent le volume de sang et les techniques de conservation nécessaires pour obtenir un résultat précis. Pour les oiseaux et les mammifères, une règle prudente à suivre est que la quantité de sang prélevée en une seule fois sur un animal en bonne santé doit être $\leq 1\%$ de son poids corporel. Le rapport volume sanguin/poids des reptiles est légèrement inférieur et les prélèvements sanguins doivent être limités à 0,5-0,8 % du poids corporel chez les animaux en bonne santé (*Campbell, 1996*). Les sites de prélèvement sanguin et la taille des instruments varient selon les taxons et la taille des animaux, et figurent dans de nombreux manuels vétérinaires ainsi que dans la littérature publiée.

L'utilisation prévue dictera si du sang total, du plasma ou du sérum est nécessaire ainsi que la méthode de manipulation, de traitement et de stockage après le prélèvement. Les tubes et les flacons qui peuvent être centrifugés sont le plus souvent utilisés pour le stockage des échantillons

de sang. Dans certains cas, des tubes avec séparateur de sérum peuvent être utilisés pour permettre la congélation sans avoir à transférer le sérum dans un autre tube de stockage une fois l'échantillon centrifugé. Divers types de tubes peuvent également favoriser ou empêcher la coagulation ou fournir des additifs supplémentaires nécessaires à des tests spécifiques.

Comme pour le stockage des carcasses, la réfrigération ou la congélation est essentielle pour éviter la dégradation de l'échantillon par la chaleur ou la croissance bactérienne. Une fois secs, les frottis sanguins peuvent généralement être conservés à température ambiante. Le sérum et les globules rouges peuvent généralement être conservés à l'état congelé jusqu'à l'analyse ; une température < -70 °C est préférable si l'on souhaite isoler des virus ou d'autres organismes. Avant le test, les gouttes de sang séché sur bandes de papier filtre doivent de préférence être conservées congelées, ou au moins réfrigérées. Avec les conservateurs appropriés pour les tests, certains échantillons peuvent être conservés à température ambiante.

Prélèvement d'échantillons par écouvillonnage

Des écouvillons peuvent être utilisés pour échantillonner un grand nombre d'animaux morts ou vivants afin de détecter la présence de nombreux types d'agents pathogènes. Les agents pathogènes excrétés dans les muqueuses sont souvent détectés à l'aide d'écouvillons trachéaux (généralement utilisés sur les oiseaux morts), oraux, pharyngés, cloacaux ou nasaux. Des écouvillons de matières fécales et environnementales peuvent être utilisés pour tester la persistance des agents pathogènes dans l'environnement ou lorsque des prélèvements directs d'animaux ne sont pas disponibles.

L'emplacement approprié de l'écouvillon peut être déterminé par le type d'agent pathogène et son mode de transmission (sécrétions respiratoires, selles, etc.). Par exemple, les écouvillons buccaux peuvent convenir à la détection de virus transmis par les sécrétions respiratoires, mais pas à la détection de bactéries impliquées dans une infection buccale ; en effet, l'écouvillonnage aléatoire de la cavité buccale produirait probablement un mélange de bactéries buccales et environnementales courantes. Des dispositifs de prélèvement, des conteneurs de spécimens, des milieux de culture et un stockage appropriés doivent être utilisés pour garantir une récupération optimale des micro-organismes (*Koneman et al., 1997*) pendant les tests de diagnostic. Un prélèvement et un stockage inappropriés peuvent conduire à des résultats erronés.

Prélèvement d'autres spécimens non invasifs courants

Des échantillons fécaux peuvent être utilisés pour déterminer la présence de virus ou de bactéries, de parasites gastro-intestinaux, l'état nutritionnel et reproductif, ainsi que le stress (*Bechert, 2012 ; Leendertz et al., 2006 ; Waits et Paetkau, 2005*). L'urine a également été utilisée pour détecter des agents pathogènes et examiner l'état de reproduction, la fonction urinaire et le stress chez les animaux sauvages (*Bechert, 2012 ; Cameron et al., 2008 ; Leendertz et al., 2006*). Les techniques de prélèvement et de stockage dépendront de l'application de l'étude et du type d'analyse à effectuer (*Palme et al., 2005*).

Prélèvement d'amphibiens

Les amphibiens se décomposent rapidement et ont généralement un grand nombre de bactéries et de champignons dans tout le corps au moment où ils arrivent au laboratoire de diagnostic. Par

conséquent, les amphibiens vivants et malades sont généralement considérés comme les meilleurs spécimens de diagnostic à partir desquels on peut obtenir des cultures bactériennes significatives et la plupart des types de cultures fongiques. Cependant, il faut garder à l'esprit que les laboratoires de diagnostic ne disposent pas tous de protocoles et d'autorisations pour manipuler des spécimens vivants d'amphibiens.

Les amphibiens morts peuvent être utilisés pour des cultures de virus, des examens microscopiques (histologie) et des tests toxicologiques. Cependant, les amphibiens se décomposent rapidement et sont vite éliminés par les prédateurs. Les animaux touchés doivent donc généralement être prélevés le jour de leur découverte. Si possible, environ la moitié des carcasses prélevées doit être conservée dans un fixateur (afin que les tissus puissent être examinés) et l'autre moitié doit être congelée (pour permettre la détection des agents pathogènes). Les fixateurs couramment utilisés comprennent le formol tamponné à 10 % ou l'éthanol à 70-75 %. S'il y a un petit nombre de carcasses fraîches, des écouvillons de la bouche, du cloaque, de la peau et des anomalies (lésions) cutanées peuvent être prélevés avant l'immersion de l'animal dans le fixateur. Avant d'immerger la carcasse dans le fixateur, la cavité corporelle doit être fendue le long de la ligne médiane ventrale pour assurer la fixation des organes internes. Pendant les 3 à 4 premiers jours de la fixation, le volume du fixateur par rapport au volume des carcasses doit être d'au moins 10:1. Après 3 à 4 jours de fixation, les carcasses peuvent être transférées dans une quantité minimale de fixateur frais, ce qui évite le dessèchement du spécimen.

Décontamination/désinfection de l'équipement de terrain

Avant de quitter une zone de prélèvement des carcasses, les gants et les vêtements extérieurs doivent être ôtés et placés dans un sac doublé. Les bottes et l'extérieur des sacs en plastique doivent être désinfectés avec un désinfectant commercial ou une solution à 10 % (1 part d'eau de Javel pour 9 parts d'eau) d'eau de Javel (hypochlorite de sodium). Les spécimens individuels doivent être étiquetés et peuvent ensuite être emballés ensemble dans un second sac avant de les retirer de la zone. Ces précautions permettront de protéger les personnes sur le terrain et de minimiser la transmission de la maladie aux populations sauvages non touchées.

Il est important de laver et de désinfecter tout le matériel de terrain qui est entré en contact avec les animaux et les surfaces sur le site de l'événement pathologique (filets, pièges à vairons, trépieds, instruments de mesure de la qualité de l'eau) ainsi que les pneus et les passages de roue des véhicules et des bateaux utilisés pour accéder au site. Un solvant (eau) ou du savon (de préférence biodégradable) doit être utilisé pour nettoyer les morceaux de boue et les débris ou la végétation. L'un des désinfectants les plus couramment utilisés est une solution à 10 % d'eau de Javel domestique, en raison de son efficacité, de sa disponibilité et de sa décomposition rapide dans l'environnement. Les solutions d'eau de Javel nécessitent un temps de contact de 10 minutes avec les surfaces pour une désinfection complète.

La désinfection implique l'utilisation d'un produit chimique pour tuer les micro-organismes, mais comme les désinfectants ne peuvent pas pénétrer dans les morceaux de boue et les débris, ils ne doivent être utilisés qu'après avoir lavé les objets. Les objets exempts de boue et de débris doivent être complètement immergés dans la solution désinfectante ou complètement imprégnés de la solution. Les savons et les désinfectants ne doivent pas être jetés dans les eaux de surface car beaucoup d'entre eux sont toxiques pour les amphibiens, les poissons et les invertébrés.

PRINCIPES GÉNÉRAUX POUR LES TESTS DE DIAGNOSTIC EFFECTUÉS SUR LA FAUNE SAUVAGE

L'interprétation des résultats des tests effectués sur les spécimens d'animaux sauvages peut être compliquée par le manque de données de référence et de tests validés pour l'agent pathogène ou l'espèce d'intérêt. La validation des tests, qui comprend la détermination de la sensibilité et de la spécificité des tests, exige du temps, de l'argent et de l'expertise. Ainsi, lorsque les tests sont validés, ils ne le sont souvent que pour un petit nombre d'espèces. Les lignes directrices pour la validation des tests chez les animaux sauvages sont disponibles au [chapitre 3.6.7 du Manuel des tests de diagnostic et des vaccins pour les animaux terrestres 2017](#). Les deux scénarios décrits dans ce chapitre comprennent le processus de validation des tests pour les nouveaux agents pathogènes ainsi que la validation des tests existants pour les nouvelles espèces.

Voici quelques questions clés à se poser avant d'initier un test de diagnostic :

- Le test a-t-il été validé dans l'espèce hôte et le pathogène d'intérêt ?
- Quel critère ce test est-il censé mesurer (par exemple, l'exposition passée, la présence de pathogènes) et cela répond-il à vos objectifs ?
- Compte tenu de la qualité des échantillons prélevés, quelle sera la performance de ce test ?
- Quelles sont les caractéristiques (par exemple, sensibilité et spécificité) du test ?
- Le test est-il facilement disponible dans votre juridiction ? Sinon, y a-t-il d'autres laboratoires qui peuvent l'effectuer ?
- Quelles sont les ressources nécessaires à la réalisation du test ?
- Existe-t-il des mandats légaux ou réglementaires qui exigent des tests spécifiques ?

S'il n'existe pas de tests validés pour l'espèce d'intérêt, une autre tactique pour sélectionner un test approprié consiste à utiliser ceux qui sont peu susceptibles d'être affectés de manière significative par l'espèce animale hôte sur laquelle les échantillons ont été prélevés. Par exemple, un test qui détecte un pathogène directement, comme la culture de bactéries à partir d'un tissu, est moins susceptible d'être affecté par l'espèce hôte qu'un test basé sur la réponse de l'animal hôte à l'infection, tel qu'un test pour la détection d'anticorps ou un test pour une autre réponse immunitaire (Tableau 2). Les fiches techniques sur les maladies de la faune sauvage non répertoriées par l'OMSA peuvent également servir de guide utile sur les diagnostics utilisés pour plusieurs maladies importantes de la faune sauvage.

Les domaines émergents de la génomique et de la métabonomique sont également de plus en plus souvent appliqués à l'épidémiologie de la faune sauvage (*Blanchong et al. 2016*). La génomique est l'étude des gènes d'un organisme, notamment les interactions de ces gènes entre eux et avec l'environnement. Elle applique les techniques de la génétique et de la biologie

moléculaire à la cartographie génétique et au séquençage de l'ADN d'ensembles de gènes ou du génome complet d'organismes sélectionnés. Cette technologie a été utilisée avec succès pour identifier l'origine et la transmission d'épidémies récentes, notamment le virus Ebola et les virus de la grippe aviaire (*Gire et al. 2014, Lam et Pybus 2018*). De même, la métabonomique consiste à mesurer l'ensemble des métabolites présents dans un organisme ou dans des échantillons biologiques associés, ainsi qu'à examiner les modifications de ceux-ci dues à des perturbations telles qu'une infection ou une maladie (*Nicholson et Lindon 2008*). La métabonomique est étroitement liée à la métabolomique, et bien qu'il y ait un certain désaccord sur les différences entre ces deux domaines, la métabonomique se concentre généralement sur les métabolites créés au niveau cellulaire ou organique dans le cadre d'un métabolisme endogène normal. En revanche, la métabonomique se concentre sur les effets de facteurs exogènes tels que la maladie et la compréhension du changement systémique dans le temps de ces facteurs sur les profils métaboliques de systèmes multicellulaires complexes. Enfin, la transcriptomique est l'étude des transcriptions de l'ARN d'une cellule, d'un tissu, d'un organisme.

Tableau 2. Exemples de tests pouvant être utilisés pour la surveillance de la faune sauvage et probabilité pour ces tests d'être affectés par les espèces hôtes.

	Moins susceptibles d'être affectés par les espèces animales hôtes	Intermédiaire	Plus susceptible d'être affectés par les espèces animales hôtes
Tests pour les agents pathogènes	Identification directe (p. ex., parasites) Culture de bactéries, de champignons et de protozoaires PCR Immunohistochimie Analyse chimique (toxicologie)		
Tests pour les anticorps ou la réponse immunitaire	Neutralisation du virus ELISA bloquant (compétitif)		La plupart des tests sérologiques standard (par exemple, ELISA) Tests cutanés antigéniques (par exemple, tuberculose)
Autre	Génomique	Activité cholinestérasique cérébrale ^a	Métabolomique Transcriptomique

^a L'activité cholinestérasique cérébrale peut être utilisée pour dépister les intoxications par les insecticides organophosphorés et carbamates. Cependant, les espèces animales présentent des niveaux de fond normaux très variables.

Qualité des échantillons

L'état des échantillons peut affecter de manière significative les résultats des tests. En fait, si les carcasses sont trop autolysées, les tests de diagnostic peuvent même être irréalisables. En général, le prélèvement d'échantillons biologiques sur des animaux moribonds ou récemment morts offre le plus grand choix de tests de diagnostic. Toutefois, si des échantillons frais ne peuvent être prélevés, les tests qui ciblent l'agent pathogène, en particulier les techniques moléculaires qui ne nécessitent pas d'agent viable, peuvent être des options envisageables. Un deuxième élément à prendre en compte est la manipulation de l'échantillon après son prélèvement. La manipulation peut avoir un impact direct sur la qualité des échantillons et une incidence sur l'utilité d'un test de diagnostic. La manipulation implique de nombreux aspects différents, notamment la température, le moyen de transport, le délai entre le prélèvement et le test de diagnostic, ainsi que le type de récipient.

Caractéristiques des tests

Il est essentiel, lors du choix d'un test de diagnostic, de comprendre les caractéristiques du test et ses performances. Si un test produit fréquemment des résultats incorrects, il peut être d'une utilité limitée pour la surveillance ou les enquêtes sur les épidémies. Une évaluation de la probabilité qu'un test produise des résultats précis peut être déterminée par le processus de validation du test. La validité du test comprend deux composantes : la sensibilité et la spécificité.

La sensibilité et la spécificité peuvent être déterminées par l'utilisation de tableaux 2x2 comme illustré ci-dessous. Le concept clé est qu'un résultat positif au test de diagnostic ne signifie pas toujours que l'agent pathogène ciblé est présent ou que l'animal a été exposé. De même, un résultat de test négatif ne signifie pas toujours que l'agent pathogène est absent.

STATUT RÉEL DU PATHOGÈNE

	STATUT RÉEL DU PATHOGÈNE	
TEST POSITIF	Vrais positifs (A)	Faux positifs (B)
TEST NÉGATIF	Faux négatifs (C)	Vrais négatifs (D)

- La sensibilité est la capacité d'un test à identifier correctement les animaux atteints de la maladie ou de l'agent pathogène (c.-à-d. les vrais positifs).

$$\text{Sensibilité (SE)} = A / (A + C)$$

- La spécificité est la capacité d'un test à identifier correctement les animaux qui n'ont pas la maladie ou l'agent pathogène (c.-à-d. les vrais négatifs).

$$\text{Spécificité (SP)} = D / (D + B)$$

Un test de faible sensibilité sous-estimerait la prévalence réelle de l'agent pathogène (de nombreux animaux infectés pourraient ne pas être identifiés par le test). Par opposition, un test à faible spécificité surestimerait la prévalence réelle de l'agent pathogène (le test est positif pour de nombreux animaux non infectés). Il est possible que la prévalence réelle ne soit jamais vraiment connue pour une population, à moins que tous les animaux de cette population aient

été testés avec un test précis à 100 %, ce qui est extrêmement rare pour n'importe quel test, même ceux utilisés en médecine humaine. La bonne nouvelle est que lorsque la sensibilité et la spécificité du test sont connues, nous pouvons calculer la prévalence apparente et utiliser ces informations pour estimer la prévalence réelle.

La prévalence apparente est le nombre d'animaux testés positifs par un test de diagnostic divisé par le nombre total d'animaux de l'échantillon testé

$$\text{Prévalence apparente} = \frac{(AP) = A+B}{A+B+C+D}$$

$$\text{Prévalence réelle (TP)} = \frac{AP + SP - 1}{SE + SP - 1}$$

Il est non seulement utile de comprendre ces concepts pour l'interprétation des tests, mais ils peuvent également être utilisés pour guider la sélection des tests, selon que l'objectif du test est d'« inclure » ou d'« exclure » un agent particulier.

- Un test très sensible doit être utilisé si l'objectif principal du test de diagnostic est d'« exclure » la présence d'un agent spécifique ou de démontrer l'absence de maladie. En effet, si le test est très sensible, la probabilité qu'un animal infecté ou malade soit testé négativement est faible (faible nombre de faux négatifs).
- Un test très spécifique doit être utilisé si l'objectif principal du test de diagnostic est d'« exclure » la présence d'un agent ou d'une maladie spécifique. En effet, si le test est hautement spécifique, la probabilité qu'un animal sain soit testé positif est faible (faible nombre de faux positifs).
- Une réalité pour les enquêtes et la surveillance de la faune sauvage est que vous ne disposez peut-être pas d'un test validé ou ne connaissez peut-être pas la prévalence réelle sous-jacente. Cependant, les concepts ci-dessus peuvent toujours être utiles. Par exemple, un test PCR pour un agent pathogène est généralement plus sensible qu'une méthode basée sur la culture et peut donc être le bon choix si la priorité est de limiter le nombre de faux négatifs. Les tests multiples peuvent également être effectués en série ou en parallèle pour améliorer la précision des résultats.
- L'échantillonnage en série consiste à tester les échantillons plusieurs fois et à déclarer une détection positive uniquement si tous les tests détectent l'agent.

Un échantillonnage en série est souvent effectué pour les activités de surveillance en utilisant en premier lieu un « test de dépistage » plus économique à sensibilité élevée. Les échantillons positifs sont ensuite testés à nouveau avec un test de confirmation plus coûteux avec une spécificité élevée. Pour être déclaré positif, un animal doit avoir été testé positif lors du premier et du second test.

- L'échantillonnage parallèle consiste à tester des échantillons avec plusieurs tests et à déclarer une détection positive si au moins l'un des tests donne un résultat positif.

Pour être déclaré positif lors de l'utilisation de l'échantillonnage parallèle, un animal doit avoir un résultat positif au premier *ou* au second test. L'échantillonnage parallèle est généralement utilisé pour augmenter la sensibilité, mais il faut garder à l'esprit qu'il diminue la spécificité. Des informations supplémentaires sur la relation entre la sensibilité et la spécificité lors de tests multiples sont fournies dans le [Manuel de formation de 4^e cycle pour les points focaux de la faune sauvage de l'OMSA](#).

Disponibilité des tests

La disponibilité d'un test de diagnostic souhaité est un autre élément à prendre en compte pour le choix du test. Si le test privilégié n'est pas facilement disponible, il peut être nécessaire d'évaluer si d'autres juridictions ont la capacité et la volonté de s'associer aux diagnostics. Ces partenariats offrent une excellente occasion de créer des collaborations et des réseaux régionaux de partenaires qui peuvent s'entraider dans la conduite d'enquêtes sur les épidémies chez les animaux sauvages. La plupart des pays ne disposent pas actuellement des ressources nécessaires pour soutenir un laboratoire de diagnostic exclusivement dédié aux maladies de la faune sauvage. L'identification des maladies de la faune sauvage se fera le plus souvent dans des laboratoires établis pour le diagnostic vétérinaire ou médical.

- Laboratoires de diagnostic vétérinaire gouvernementaux
- Facultés vétérinaires/Laboratoires de diagnostic universitaires
- Laboratoires de diagnostic vétérinaire privés
- Laboratoires médicaux gouvernementaux
- Laboratoires médicaux privés
- Laboratoires de recherche universitaires
- Laboratoires hospitaliers
- Laboratoires médicaux ou vétérinaires militaires

Les laboratoires internationaux et régionaux tels que le réseau de laboratoires et de centres collaborateurs de l'OMSA constituent une autre ressource potentielle. L'OMSA a établi des laboratoires particuliers, sur la base de leur expertise, comme laboratoires de référence de l'OMSA pour certains pathogènes.

- Centres de collaboration de l'OMSA : <https://www.oie.int/scientific-expertise/collaborating-centres/list-of-centres/>
- Laboratoires de référence de l'OMSA : <https://www.oie.int/scientific-expertise/reference-laboratories/list-of-laboratories/>

Ces laboratoires peuvent être de précieuses ressources pour le dépistage d'agents pathogènes particuliers et l'interprétation des résultats des tests. L'envoi d'échantillons aux laboratoires de référence de l'OMSA peut présenter des difficultés, notamment en ce qui concerne les

autorisations entre différents pays, qui doivent être étudiées pour déterminer si l'envoi d'échantillons à ces laboratoires est une option viable. Si ces obstacles ne peuvent pas être surmontés, il peut être nécessaire d'utiliser un test de diagnostic différent, même s'il ne s'agit pas du test privilégié.

Besoins en ressources

Les besoins en ressources sont un aspect important de la sélection d'un test de diagnostic. Établir la disponibilité du financement des tests de diagnostic au cours d'une enquête sur une épidémie peut limiter le choix des tests de diagnostic. Certains tests peuvent également nécessiter un équipement, des matériaux (par exemple, des supports particuliers) ou un personnel spécialisé pour le prélèvement ou l'interprétation, et ces facteurs doivent également être pris en compte avant de sélectionner un test.

Mandats légaux

Une dernière considération est de savoir s'il existe des mandats juridiques spécifiques associés au dépistage d'un pathogène ou d'un agent. Par exemple, dans les codes sanitaires pour les animaux terrestres et aquatiques de l'OMSA, des tests sont prescrits pour des agents pathogènes spécifiques « pour assurer la sécurité sanitaire du commerce international des animaux terrestres et aquatiques, et de leurs produits ». Ainsi, afin de démontrer qu'une épidémie n'est pas causée par un pathogène spécifique de la liste de l'OMSA, ces tests particuliers doivent être effectués. Les manuels relatifs aux animaux terrestres et aquatiques fournissent des conseils supplémentaires sur l'application spécifique des tests.

- Infections et infestations répertoriées par l'OMSA : https://www.oie.int/index.php?id=169&L=0&htmfile=chapitre_diagnostic_tests.htm
- Code sanitaire pour les animaux terrestres : <https://www.oie.int/en/standard-setting/terrestrial-code/access-online/>
- Manuel des tests de diagnostic et des vaccins pour les animaux terrestres 2019 : <https://www.oie.int/standard-setting/terrestrial-manual/access-online/>
- Code sanitaire pour les animaux aquatiques : <https://www.oie.int/en/standard-setting/aquatic-code/access-online/>
- Manuel des tests de diagnostic et des vaccins pour les animaux aquatiques 2019 : <https://www.oie.int/standard-setting/aquatic-manual/access-online/>

RECUEIL DE DONNÉES PENDANT UN ÉVÉNEMENT DE MORTALITÉ

La plupart des enquêtes sur les épidémies de maladies de la faune sauvage cherchent à déterminer les réponses aux questions suivantes : qui (quelle population est touchée), quoi (étiologie de la maladie), où (étendue géographique du problème) et quand (période de l'événement) pour un événement de maladie de la faune sauvage. Les données recueillies lors d'un événement de morbidité ou de mortalité sont essentielles pour comprendre les facteurs de causalité de l'événement. Par exemple, l'enregistrement d'un événement météorologique récent tel qu'une tempête de grêle peut être utilisé pour comprendre pourquoi le diagnostic principal de mortalité d'un grand oiseau aquatique était un traumatisme contondant. De nombreuses maladies, telles que le botulisme ou les proliférations d'algues nuisibles, sont liées à des facteurs environnementaux ; par conséquent, l'enregistrement des informations (par exemple, températures élevées et faibles précipitations) peut accélérer et garantir des tests de diagnostic appropriés.

Les données nécessaires à l'étude de la morbidité et de la mortalité de la faune sauvage peuvent être divisées en deux niveaux : les données au niveau des événements et les données au niveau individuel. Les données au niveau individuel doivent être recueillies pour chaque spécimen à soumettre à des tests de diagnostic et associées (par des numéros d'identification ou tout autre système) aux données au niveau de l'événement.

Données au niveau individuel (recueillies pour chaque spécimen soumis à l'analyse) :

- Espèces
- Sexe et âge (si connu)
- Date de prélèvement
- Lieu de prélèvement
- Identification de l'événement (ou de tout autre mécanisme d'association avec des données au niveau de l'événement)
- Méthode de conservation (par exemple, réfrigération, congélation, formol)
- Coordonnées de contact

Données au niveau de l'événement :

- Lieu de l'événement (coordonnées GPS ou description aussi précise que possible)
- Utilisation des terres et facteurs environnementaux (par exemple, conditions météorologiques entourant le foyer épidémique)
- Population(s) à risque (c.-à-d. informations contextuelles sur les espèces présentes sur le site)

- Estimation de la date de début et de fin de la morbidité/mortalité (l'état des carcasses peut être utile pour évaluer ces dates)
- Espèces touchées
- Nombre estimé ou connu d'animaux morts par espèce
- Nombre estimé ou connu d'animaux malades par espèce
- Signes cliniques (par exemple, comportement ou apparence physique inhabituels)
- Âge des animaux touchés (par exemple, juvénile/adulte)
- Sexe des animaux touchés
- Signes cliniques observés chez les animaux atteints
- Contact : personne(s) ayant signalé l'événement et coordonnées au cas où des informations supplémentaires seraient nécessaires
- Laboratoire où les diagnostics ont été effectués et numéro d'identification des échantillons soumis aux tests

Bonnes pratiques de stockage et de gestion des données

Afin de réussir à combiner des ensembles de données, ou même d'examiner les tendances d'un seul ensemble de données, des informations similaires doivent être recueillies au fil du temps. L'idéal serait de disposer d'un ensemble de champs de données et de définitions universellement acceptés pour la santé de la faune sauvage. Cependant, étant donné qu'il n'existe pas actuellement de normes internationales pour la plupart des champs de données, il devient extrêmement important pour chaque responsable du recueil de données de documenter la manière dont il a défini et mesuré les informations dans chaque champ. Idéalement, les champs de données sont définis avant le recueil des données afin de garantir que les mêmes données sont recueillies d'un moment à l'autre et au même niveau de spécificité. Par exemple, si la latitude et la longitude d'un événement de mortalité sont recueillies à certaines occasions et que seuls le comté ou la province sont recueillis à d'autres occasions, il pourrait être impossible de savoir si les rapports d'un événement représentent le même événement ou plusieurs événements. Certaines options et considérations pour la définition des champs les plus courants sont également décrites en détail dans le [Manuel de formation de l'OMSA du 5^e cycle](#). Un dictionnaire de données (indiqué à la fin de cette section) décrivant les données de chaque champ de données doit être stocké avec les données.

Lieu de l'événement

Comme décrit dans l'exemple ci-dessus, il est important de préciser l'échelle et la précision des informations recueillies sur la localisation. La latitude et la longitude fournissent l'estimation la plus précise de l'emplacement et sont accessibles sur la plupart des smartphones ou des

appareils mobiles équipés d'un GPS. La spécification des préférences pour les formats (par exemple, degrés décimaux, degrés minutes secondes) et les références géodésiques (par exemple, WGS 84, NAD 83, ETRS 89) réduira le temps nécessaire aux conversions après le recueil des données. Il peut également être utile de demander des informations supplémentaires sur l'emplacement, comme le nom du parc, du plan d'eau, de la ville ou d'autres points de repère, en particulier si la répartition des animaux touchés s'étend sur de grandes échelles spatiales. Si des problèmes sont associés à la publication d'emplacements précis (par exemple, emplacements exacts d'espèces menacées ou protégées, de fermes ou d'autres terres privées), les emplacements peuvent être faussés à des échelles spatiales plus grandes (par exemple, comté/province/état/pays) avant la distribution plus large des données.

Utilisation des terres et facteurs environnementaux

Les facteurs environnementaux tels que les changements climatiques soudains, les tempêtes et la sécheresse sont des sources potentielles de stress pour la faune sauvage qui peuvent influencer les événements de mortalité. Les variations des niveaux d'eau peuvent concentrer ou disperser les populations d'animaux sauvages et influencer la présence de vecteurs tels que les moustiques. L'enregistrement de l'utilisation des terres (agricole, industrielle, etc.) et d'autres activités humaines (par exemple, utilisation récente d'engrais ou de pesticides) autour de la zone peut également aider à orienter les enquêtes sur l'événement de mortalité. Ces informations pourraient être normalisées s'il existe un ensemble limité de possibilités pour l'ensemble de données, mais elles sont le plus souvent enregistrées sous forme de champs de texte libre dans les bases de données ou les feuilles de calcul sur la santé de la faune sauvage.

Estimation de la date de début et de fin de la morbidité/mortalité

Les dates de début et de fin de l'événement pathologique seront généralement estimées, car il est peu probable que la première ou la dernière incidence de la maladie ait été directement observée. Néanmoins, ces dates sont toujours essentielles pour établir les cycles temporels des événements et comprendre si les événements varient dans le temps. L'état des carcasses, la proportion d'animaux malades par rapport aux animaux morts, la date à laquelle un facteur environnemental suspect s'est produit (par exemple, une tempête) et la date de la dernière visite du site peuvent tous être utilisés pour aider à réaliser cette estimation. Les dates peuvent être enregistrées sous différents formats. En spécifiant celui utilisé sur les formulaires de soumission papier ainsi que dans les bases de données ou les feuilles de calcul électroniques, il est donc possible de s'assurer que les jours, les mois ou les années n'ont pas été inversés (par exemple, « 12 » pourrait signifier le 12^e jour d'un mois, le mois de décembre ou 2012).

Espèces touchées

Les espèces touchées font généralement référence à toutes les espèces observées mortes ou malades à un endroit donné pendant un événement. Connaître les espèces touchées, en particulier par rapport aux espèces présentes, peut fournir des indices sur la cause de l'événement, car certaines maladies ont une gamme d'hôtes étroite alors que d'autres ont une large gamme d'hôtes. La présence d'espèces touchées dans plusieurs taxons peut également indiquer l'implication d'une toxine. Étant donné que de nombreuses espèces ont des noms communs qui varient selon la région ou la langue, l'utilisation des noms scientifiques peut aider à garantir la cohérence des rapports. Fournir des menus déroulants pour les espèces dans les

bases de données peut encore augmenter l'assurance qualité en évitant les erreurs telles que les fautes d'orthographe.

Signes cliniques

Dans le cas de nombreuses maladies chez les animaux sauvages, les signes cliniques ne sont pas spécifiques, comme par exemple l'apathie ou l'absence de réponse aux perturbations. Néanmoins, les signes cliniques peuvent aider à réduire l'éventail de causes potentielles de la maladie et à orienter les investigations diagnostiques. Comme pour les facteurs environnementaux, ce champ est généralement enregistré sous forme de champ de texte libre dans les bases de données et les feuilles de calcul sur la santé de la faune sauvage, à moins qu'il n'existe une liste connue de signes cliniques attendus pouvant être spécifiés sous forme de menu d'options (c.-à-d. une liste déroulante). Les signes cliniques communs de nombreuses maladies importantes de la faune sauvage sont décrits dans les fiches techniques des maladies non répertoriées par l'OMSA.

Âge des animaux touchés

Comme pour les espèces touchées, l'âge des animaux touchés peut être utilisé pour fournir des indices sur la cause de l'événement, car certains agents pathogènes peuvent toucher principalement les jeunes animaux en raison de la résistance aux maladies liée à l'âge (par exemple, ranavirus, maladie débilitante chronique). Des catégories générales, telles que juvénile, adulte et adulte âgé peuvent apporter un niveau de détail suffisant pour ce champ de données. Cependant, si des informations plus détaillées sont nécessaires (par exemple, au nid ou à l'envol), elles doivent être spécifiées sur une feuille de données papier ou électronique.

Sexe des animaux touchés

Comme pour l'âge des animaux touchés, l'enregistrement de toutes les différences observées dans le sexe des animaux touchés peut fournir des indices pour orienter les recherches. Les différences entre les sexes peuvent être dues à des différences de comportement, notamment entre mâles et femelles au niveau du domaine vital ou des soins apportés aux jeunes, mais peuvent néanmoins fournir des informations importantes pour déterminer la cause de l'événement.

Nombre d'animaux touchés

Le nombre d'animaux touchés désigne généralement le dénombrement d'animaux morts et malades pour une espèce particulière à un endroit donné pendant un événement. Il peut y avoir des champs séparés indiquant le nombre de malades et le nombre de morts pour chaque espèce s'il est important de faire la distinction entre les deux. Le nombre total de tous les animaux touchés peut être calculé à partir des chiffres rapportés pour les espèces individuelles. Pour de nombreux endroits et types de végétation, le dénombrement réel des animaux touchés peut être difficile à effectuer, de sorte que les estimations du nombre d'animaux touchés peuvent être obtenues plus facilement. Cependant, étant donné que la probabilité de surestimer ou de sous-estimer varie d'un chercheur à l'autre, il est important de préciser dans la base de données et les métadonnées que ces chiffres sont des estimations.

Diagnostiques

Fournir une liste de diagnostics peut aider à standardiser la terminologie diagnostique préférée (par exemple, infection par le champignon chytride vs chytridiomycose) et informer les partenaires des diagnostics qui présentent un intérêt à des fins de déclaration. L'OMSA tient à jour une liste de maladies de la faune sauvage qui ne figurent pas sur la liste de l'OMSA mais qui ont été sélectionnées pour être surveillées par le groupe de travail de l'OMSA sur les maladies de la faune sauvage. La sélection a été effectuée en fonction de leur importance pour les animaux sauvages et à des fins d'alerte précoce, afin de protéger la santé des humains et de la faune sauvage. Cette liste peut être consultée ici : http://www.oie.int/wahis_2/public/wahidwild.php/Diseaseinformation/popup/diseaselist. Il est également important de s'assurer que les critères utilisés pour établir les diagnostics ont été appliqués de manière cohérente entre les animaux d'un même événement et entre les événements dans le temps et l'espace. Les définitions de cas telles que définies par l'OMSA sont « un ensemble de critères utilisés pour distinguer un animal cas ou une unité épidémiologique d'un non-cas ». Les définitions de cas comprennent généralement un ensemble scientifiquement accepté et clairement défini de critères de terrain, macroscopiques, histopathologiques, de laboratoire et épidémiologiques, utilisés pour placer un individu dans une catégorie de maladie spécifique à des fins de déclaration ; elles sont importantes pour compter et classer les cas d'une maladie de manière cohérente entre différentes juridictions. Des définitions de cas ont été établies précédemment pour plusieurs maladies touchant les espèces sauvages qui sont également importantes pour l'agriculture ou la santé humaine et peuvent avoir un impact sur le commerce international d'animaux ou de leurs produits. Lorsqu'elle existe, la définition de cas figurant dans le chapitre spécifique du code terrestre ou aquatique de l'OMSA doit être utilisée.

Construction d'un dictionnaire de données

Les dictionnaires de données vous permettent de définir des variables et de fournir des informations contextuelles qui ne peuvent pas être capturées dans l'ensemble de données lui-même (Tableau 3). Ces informations doivent être stockées avec les données afin qu'elles puissent être correctement interprétées par les utilisateurs actuels et futurs de l'ensemble de données. Un dictionnaire de données comprend généralement ce qui suit :

- Nom de la variable
- Type de données (nombre entier, texte, etc.)
- Comment la variable a été mesurée et précision de la mesure
- Unités de données
- Format des données
- Valeurs minimales et maximales
- Valeurs codées et leur signification
- Représentation des valeurs nulles

- Autres remarques importantes sur les données

Tableau 3. Exemple de dictionnaire de données pour plusieurs des champs clés décrits dans cette section. Les unités et le type de données pour chaque champ ont été spécifiés dans la colonne « Type de données ». Une description détaillée de chaque champ a été fournie dans la colonne « Définition des données ».

A	6	C	
1	Nom du champ	Type de données	Définition des données
			<p>1 ■ Morbidité/Mortalité : animaux malades ou morts reliés dans l'espace et dans le temps. La présence d'animaux isolés est incluse s'il existe un intérêt particulier dans l'espèce, l'agent suspecté, le lieu ou la période de l'année (par ex., espèce solitaire, espèce menacée, nouvel agent pathogène possible ou expansion de l'aire de répartition ou du temps pour un agent pathogène existant).</p> <p>2 ■ Surveillance : détections positives d'un pathogène lors de la surveillance active d'animaux sains vivants, abattus par la chasse ou euthanasiés (qui n'étaient pas malades avant d'être euthanasiés).</p>
2	Event Type	entier	
3	Start Date	ISO	Date de début de l'événement (en tenant compte de tous les emplacements)
4	End Date	ISO 8601	Date de fin de l'événement (en tenant compte de tous les emplacements)
5	Affected	entier	Nombre total d'individus touchés par l'événement. Nombre d'animaux malades et morts pour un événement de morbidité/mortalité et nombre de positifs pour un événement de surveillance.
6	Diagnosis i	entier	Identification du diagnostic de l'événement. Lien clé étranger vers la table de recherche de diagnostic.
7	Species	Entier	Identification des espèces. Lien clé étranger vers la table de recherche de diagnostic.
8	Population	entier	Estimation de la population totale de cette espèce à cet endroit (population à risque). Utiliser le nombre maximum au cours de l'événement.
9	Sick	entier	Nombre réel d'animaux malades ou blessés de cette espèce à cet endroit. Inclure les animaux euthanasiés s'il y en a. Inscrire 0 si le nombre est réellement 0 (plutôt que laisser le champ vide). Laisser le champ vide en l'absence de numération. Éviter de recompter les animaux, surtout en cas de visites répétées au même endroit pour évaluer la santé des animaux sauvages. Évaluer si les animaux observés malades initialement ont été comptabilisés comme morts plus tard ; si oui, les compter comme morts. Les chiffres rapportés doivent refléter soit un instantané de la morbidité/mortalité telle qu'elle a été observée lors d'une visite unique du site, soit un résumé du nombre d'animaux touchés au cours d'un événement (par exemple, morts = nombre de morts cumulés au cours de plusieurs visites et malades = nombre d'animaux restant malades ou guéris à la fin de l'événement).
10	Dead	entier	Nombre réel d'animaux morts de cette espèce à cet endroit. Ne PAS inclure les animaux euthanasiés s'il y en a. Inscrire 0 si le nombre est réellement 0 (plutôt que laisser le champ vide). Laisser le champ vide en l'absence de numération. Éviter de recompter les animaux, surtout en cas de visites répétées au même endroit pour évaluer la santé des animaux sauvages. Évaluer si les animaux observés malades initialement ont été comptabilisés comme morts plus tard ; si oui, les compter comme morts. Les chiffres rapportés doivent refléter soit un instantané de la morbidité/mortalité telle qu'elle a été observée lors d'une visite unique du site, soit un résumé du nombre d'animaux touchés au cours d'un événement (par exemple, morts = nombre de morts cumulés au cours de plusieurs visites et malades = nombre d'animaux restant malades ou guéris à la fin de l'événement).

	A	B	C
1	Field Name	Data Type	Data Definition
			1 = Morbidity/Mortality: Sick or dead animals linked spatially and temporally. Occurrence of single animals is included if there is special interest in the species, the suspected agent, the location, or the time of year (e.g., a solitary species, an endangered species, a possible new pathogen, or a range or temporal expansion for an existing pathogen) 2 = Surveillance: positive detections of a pathogen during active surveillance of healthy live, hunter-killed, or euthanized animals (that were not sick before euthanizing).
2	Event_Type	Integer	
3	Start_Date	ISO 8601 YYYYMMDD	Beginning date for event (considering all locations).
4	End_Date	ISO 8601 YYYYMMDD	Ending date for event (considering all locations).
5	Affected	Integer	Total number of individuals affected in event. A count of sick plus dead for a morbidity/mortality event and a count of positives for a surveillance event.
6	Dianosis_id	Integer	ID for event diagnosis. Foreign key link to diagnosis look up table.
7	Species	Integer	Species ID. Foreign key link to species lookup table
8	Population	Integer	Estimate of the total population of this species at this location (population at risk). Use the peak number during the course of the event.
9	Sick	Integer	Actual count of the number of sick or injured animals of this species at this location. Include euthanized animals, if any. Use 0 if known to be 0 (instead of leaving blank). Leave blank if there is no count. Avoid re-count of animals, especially if there are repeated visits to a location to assess wildlife health. Consider whether animals initially observed sick were later counted as dead; if so, only count them as dead. Numbers reported should reflect either a snapshot of morbidity/mortality as observed during a one-time site visit, or a synopsis of the numbers affected over the course of an event (e.g., dead = cumulative dead during multiple site visits and sick = number remaining sick or recovered from being sick at the end of the event).
10	Dead	Integer	Actual count of the number of dead animals of this species at this location. Do NOT include euthanized animals. Use 0 if known to be 0 (instead of leaving blank). Leave blank if there is no count. Avoid re-count of animals, especially if there are repeated visits to a location to assess wildlife health. Consider whether animals initially observed sick were later counted as dead; if so, only count them as dead. Numbers reported should reflect either a snapshot of morbidity/mortality as observed during a one-time site visit, or a synopsis of the numbers affected over the course of an event (e.g., dead = cumulative dead during multiple site visits and sick = number remaining sick or recovered from being sick at the end of the event).

GESTION DES MALADIES CHEZ LES ANIMAUX SAUVAGES

Objectifs de la gestion des maladies

Les trois principaux objectifs de la gestion des maladies chez les animaux sauvages sont la prévention, le contrôle et l'éradication. Le choix d'un objectif de gestion est essentiel pour l'évaluation du succès d'une action. La sélection d'un objectif de gestion doit également tenir compte de facteurs tels que la présence ou l'absence de la maladie dans une zone, la disponibilité des méthodes de gestion et les ressources disponibles. Les questions utiles à se poser avant d'entreprendre la gestion sont les suivantes :

- Pourquoi la gestion est-elle effectuée (par exemple, y a-t-il une menace pour les animaux sauvages, la santé humaine ou les animaux domestiques) ?
- Quels sont les outils disponibles pour la gestion ?
- La gestion bénéficie-t-elle d'un soutien public et sociétal ?
- Quelles sont les ressources (par exemple, financement et personnel) disponibles pour la gestion ?
- À quoi ressemblerait le succès (par exemple, éradication complète, réduction de la prévalence, absence de maladie pendant 5 ans) ?
- Comment le succès sera-t-il mesuré ?

La **prévention** des maladies est définie comme l'exclusion ou la prévention de l'introduction d'une maladie chez des animaux non touchés ou dans une population. Les mesures de prévention des maladies peuvent être appliquées au niveau de l'individu, de la population ou de la communauté. Les efforts de prévention visent généralement à restreindre ou à modifier les activités humaines (par exemple, les restrictions commerciales) plutôt qu'à interdire physiquement l'entrée de l'agent dans une population ou une communauté. La prévention peut également être réalisée par des mesures telles que la vaccination, qui peuvent directement protéger les individus et indirectement protéger les populations grâce à l'immunité collective. La vaccination est une méthode primaire de prévention des maladies chez les humains et les animaux d'élevage. Cependant, comme nous le verrons plus en détail dans une section suivante, la vaccination des animaux sauvages présente de nombreux défis au-delà du développement de vaccins. Une fois qu'une maladie a pénétré une population sauvage, il est extrêmement difficile de la contrôler en raison de facteurs complexes, tels que l'administration des vaccins et le déplacement généralisé des populations sauvages.

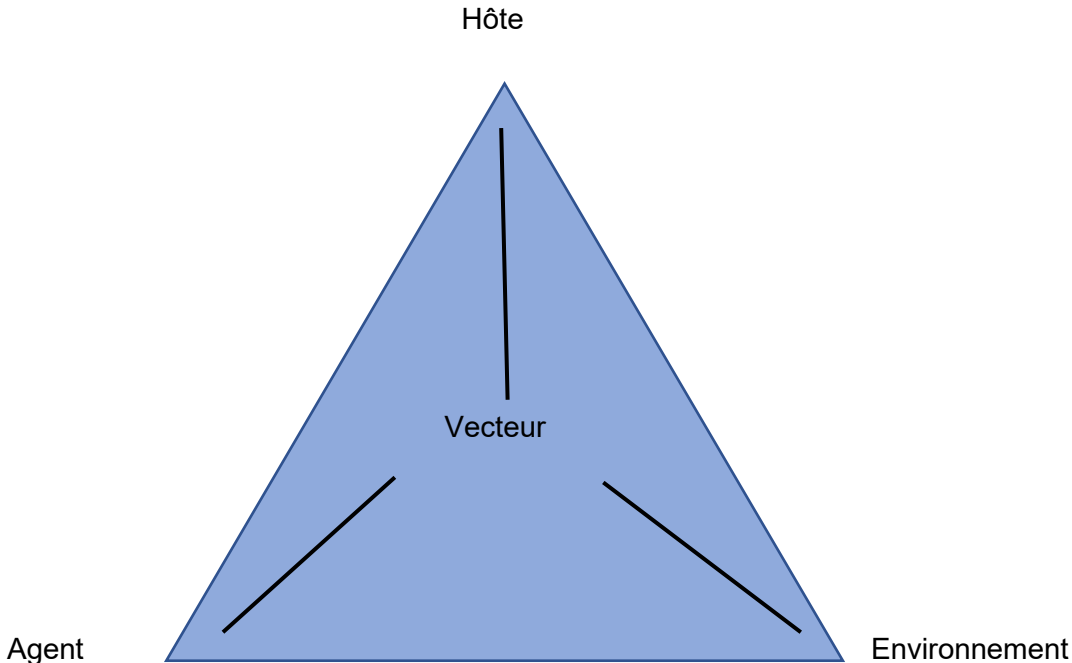
Le **contrôle** des maladies fait référence aux activités conçues pour réduire la fréquence d'apparition ou les effets d'une maladie existante au sein d'une population à un niveau prédéterminé. Le niveau de contrôle est souvent déterminé par les ressources disponibles et le niveau de tolérance à la maladie. Le financement disponible détermine souvent le critère d'évaluation des efforts de contrôle, car les décideurs doivent évaluer quand le coût d'un contrôle

plus approfondi l'emporte sur tout avantage supplémentaire. De cette façon, le contrôle entraîne généralement la persistance d'un certain niveau de maladie dans la population et nécessite généralement des mesures d'intervention (et des ressources) continues pour maintenir la réduction.

L'**éradication** d'une maladie est l'élimination totale (c.-à-d. une incidence égale à zéro) d'une maladie existante dans le monde. Les termes « éradication » et « élimination » sont souvent utilisés de manière interchangeable, mais l'Organisation mondiale de la santé définit l'éradication d'une maladie comme l'incidence nulle d'une infection causée par un agent dans le monde entier, tandis que l'élimination d'une infection ou d'une maladie correspond à une incidence nulle dans une zone géographique définie (Dowdle 1998). L'une des conditions essentielles à l'éradication d'une maladie est l'existence d'une intervention efficace permettant de la prévenir, de la guérir ou d'en interrompre la transmission. À ce jour, seules deux maladies ont été éradiquées : la variole en 1980 et la peste bovine en 2011. La variole a été éradiquée par la vaccination et la peste bovine par la vaccination associée à des mesures sanitaires. Un programme mondial d'éradication du paludisme a été mis en place en 1955 mais a été abandonné en 1969. On constate cependant un regain d'intérêt pour l'élaboration d'un plan d'éradication (voir <http://endmalaria2040.org/>). L'éradication des maladies nécessite un investissement financier important et une coordination incroyable. Par exemple, les efforts visant à éradiquer la poliomyélite ont coûté environ 4,5 milliards de dollars à ce jour. Outre les coûts financiers et le besoin de traitements efficaces, l'éradication des maladies de la faune sauvage est également compliquée par les caractéristiques des populations sauvages elles-mêmes, notamment les difficultés de capture et de traitement de masse des animaux en liberté.

Points d'intervention

L'un des modèles les plus simples de causalité des maladies est la triade épidémiologique. Elle se compose d'un **agent** externe, d'un **hôte** sensible et d'un **environnement** qui met en contact l'hôte et l'agent. Pour certaines infections, un **vecteur**, ou un organisme qui transporte un agent pathogène d'un hôte à un autre, fait également partie du processus pathologique. Dans ce modèle, la transmission se produit lorsqu'un agent quitte son réservoir (qui peut être un humain, un animal ou l'environnement), est véhiculé par un certain mode d'infection (contact direct, gouttelettes, air, véhicule, vecteur) et pénètre dans un hôte sensible pour provoquer la maladie. Nous présentons ce modèle de transmission des maladies car il s'agit également d'un outil utile pour déterminer où les interventions de gestion des maladies peuvent être les plus efficaces.



Les agents peuvent être des micro-organismes infectieux (virus, bactérie, parasite, etc.) ou des causes chimiques et physiques de maladies et de blessures.

Prévention et contrôle – Agents et vecteurs

Pour certaines maladies, l'intervention la plus appropriée consiste à en éliminer la cause. Dans la plupart des cas, ce type de gestion vise à éliminer l'agent dans une zone définie plutôt qu'à obtenir son éradication totale. Le contrôle des agents non infectieux (par exemple, toxines) présente souvent moins de défis techniques, car la gestion vise généralement à arrêter ou à réduire la libération d'une substance dans l'environnement. Étant donné que les agents non infectieux ne se répliquent pas, si une quantité connue est libérée dans l'environnement, il devrait être théoriquement possible d'éliminer physiquement tout ou partie de l'agent et d'empêcher toute nouvelle libération. Cependant, certaines toxines telles que les biphényles polychlorés sont très persistantes dans l'environnement et provoquent des effets indirects par bioaccumulation dans la chaîne alimentaire. En outre, de nombreux agents toxiques (ou leurs sous-produits) sont très utiles pour les humains ; par conséquent, le contrôle de ces substances peut être difficile en raison des coûts économiques ou sociétaux (*Wobeser 1994*). En général, les substances qui ont des effets directs aigus et qui peuvent affecter la santé humaine (par exemple, empoisonnement par du mercure aquatique) ont bénéficié d'un plus grand soutien pour les efforts de contrôle que celles qui ont des effets différés affectant principalement la faune (par exemple, DDT et plomb).

Pour les agents pathogènes qui persistent dans l'environnement, des mesures visant à minimiser la contamination de la zone environnante peuvent être nécessaires. Par exemple, les processus de putréfaction dans les carcasses non ouvertes peuvent détruire les cellules végétatives de *Bacillus anthracis*. Cependant, la contamination de l'environnement par des agents pathogènes peut encore se produire par les fluides sortant du nez, de la bouche et de l'anus. Étant donné que l'incinération des carcasses d'animaux sauvages n'est souvent pas possible pendant les

épisodes de fièvre charbonneuse, les carcasses peuvent être recouvertes de plastique ou mouillées avec du formol à 10 % pour détruire les organismes externes de la fièvre charbonneuse tout en préservant les conditions anaérobies nécessaires à la décomposition (OMS 2008). Lors d'événements de botulisme aviaire, la production de toxines peut augmenter dans les carcasses en décomposition car la bactérie *Clostridium botulinum* préfère les conditions anoxiques riches en nutriments. Les vers qui se nourrissent de carcasses concentrent ensuite la toxine et infectent de nouveaux hôtes lorsqu'ils sont consommés. L'élimination des carcasses pendant un épisode de botulisme peut donc contribuer à réduire le nombre de nouvelles infections. L'élimination des carcasses lors d'événements de mortalité peut également être importante pour minimiser le déplacement de matières infectieuses vers de nouveaux endroits par l'intermédiaire de charognards, de mouches et de rongeurs.

Les méthodes courantes d'élimination des carcasses d'animaux sauvages sont les suivantes :

- Incinération
- Ensevelissement profond
- Enfouissement en décharge
- Compostage

La sélection des méthodes d'élimination des carcasses doit tenir compte de leurs effets sur l'environnement (par exemple, qualité de l'air et contamination des eaux souterraines), la santé publique (c.-à-d. le potentiel de transmission de maladies) et la perception du public. L'élimination des carcasses doit tenir compte des directives spécifiques à chaque pays, mais des méthodes générales ont été publiées par le ministère américain de l'Agriculture (Vantassle et King 2018) et l'US Geological Survey (Friend et Franson 1999a).

Pour les agents pathogènes transmis par des vecteurs invertébrés, le contrôle peut viser à réduire les populations de vecteurs. Bien qu'il existe de nombreux pesticides très efficaces, beaucoup d'entre eux ont de graves effets secondaires sur l'environnement et leur utilisation continue à grande échelle peut exercer une pression sélective sur les organismes résistants. Par exemple, les putois à pieds noirs (*Mustela nigripes*), espèce menacée, et leurs proies, les chiens de prairie (*Cynomys spp.*), sont tous deux très sensibles à *Yersinia pestis*, qui est véhiculée par les puces. Un contrôle de la peste a été tenté par des pesticides ciblant les puces infectées à l'aide de produits chimiques tels que le DDT (dichloro-diphényl-trichloroéthane), le carbaryl et les perméthrines. Cependant, comme pour le contrôle des puces dans le monde entier (Rust 2016), les puces ont acquis une résistance aux produits chimiques suite à une utilisation continue (Barnes 1982). D'autres facteurs affectant l'utilité des pesticides pour les agents pathogènes de la faune sont que beaucoup d'entre eux sont à large spectre et affectent les invertébrés non ciblés, ce qui entraîne des conséquences involontaires ou inconnues sur le fonctionnement de l'écosystème. Par conséquent, l'utilisation de pesticides pour contrôler les agents pathogènes peut être plus utile pour les petits sites et lorsqu'elle est utilisée en combinaison avec d'autres méthodes telles que le contrôle environnemental et les contrôles biologiques (Wobeser 2004).

Le contrôle peut également viser à empêcher l'introduction d'agents pathogènes et de vecteurs dans de nouvelles zones et de nouveaux hôtes sensibles. Pour ce type de méthodes de gestion, il faut viser à protéger ou à compléter les barrières écologiques ainsi qu'à modifier les comportements humains pour empêcher la translocation des agents pathogènes. La translocation est un outil de gestion courant pour introduire de nouvelles espèces et restaurer des

populations disparues, mais il existe de nombreux cas de déplacement d'agents pathogènes avec ces translocations. Pour cette raison, un certain nombre d'étapes ont été développées pour réduire le mouvement des agents pathogènes pendant les translocations, notamment (*Wobeser 2004*) :

- L'évaluation de l'état de santé de la population source, y compris par des tests pour des maladies spécifiques ; cela peut également inclure des restrictions sur les déplacements des animaux provenant de zones où la présence de maladies spécifiques est connue
- La mise en quarantaine des animaux à déplacer pendant une période égale à la période d'incubation maximale des maladies préoccupantes
- Les tests de diagnostic et le traitement prophylactique des animaux à déplacer pour les maladies préoccupantes.

Contrôle – Manipulation de l'hôte

Théorie

La manipulation de la ou des population(s) hôte(s) est une autre forme majeure de gestion des maladies pour les populations d'animaux sauvages, en particulier lorsqu'il n'y a pas d'hôte intermédiaire (escargots, vecteurs, etc.). Il s'agit peut-être en fait de la façon la plus courante utilisée par les gestionnaires pour tenter de contrôler les maladies de la faune sauvage, car les techniques de gestion des populations sont souvent bien développées et leur sont souvent familières. L'efficacité de ce type de gestion repose sur les premiers principes de l'épidémiologie. En d'autres termes, si l'exposition aux agents infectieux est minimisée ou éliminée, l'hôte sera protégé du risque de maladie. De même, si les contacts entre les hôtes infectés et non infectés peuvent être réduits, la transmission de la maladie peut également être minimisée.

L'objectif final avant l'introduction d'un agent infectieux est de réduire le taux de reproduction de base de la maladie, appelé « R_0 ». Le taux de reproduction décrit le nombre de nouveaux cas provenant d'un seul individu infecté dans une population entièrement composée d'individus sensibles à la maladie dans une unité de temps donnée. Si la valeur du R_0 est inférieure à 1, un agent infectieux ne peut pas envahir une population en raison du manque d'individus infectieux pour maintenir la transmission. Les efforts de contrôle préventif des maladies qui utilisent la manipulation des populations hôtes tentent de réduire le R_0 à une valeur inférieure à 1, en réduisant les contacts infectieux ou l'exposition directe à l'agent infectieux. Après l'établissement d'une maladie dans une zone, les manipulations des populations hôtes peuvent encore être avantageuses pour réduire l'intensité de la maladie au fil du temps.

Nous démontrons ces idées en utilisant un modèle simple de compartiment Sensible-Infecté-Rétabli (SIR) sans démographie pour une population donnée (c.-à-d. 10 000 animaux) dans une zone fixe (c.-à-d. 1 000 km²). Le système d'équations de ce modèle est le suivant :

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI,$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I,$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I,$$

où β = coefficient de transmission, γ = taux de récupération et S, I, R sont le nombre d'individus dans les compartiments sensibles, infectés et récupérés, respectivement. Les efforts de contrôle visant à manipuler les populations hôtes ont généralement pour but d'influencer β . Si nous définissons

$$\beta = \kappa \times \frac{N}{A} \times \frac{I}{N} \times v = \kappa \times \frac{I}{A} \times v,$$

où N = taille totale de la population, A = surface occupée par la population, κ = constante telle que le taux de contact entre individus au sein d'une population est proportionnel à la densité, $\frac{N}{A}$ et v = probabilité de transmission de l'agent pathogène en cas de contact. Il est clair que le taux auquel les individus sensibles sont infectés (c.-à-d. la force d'infection) est le produit du taux de contacts (c.-à-d. $\kappa \times \frac{N}{A}$), de la prévalence (c.-à-d. $\frac{I}{N}$) et de la probabilité de transmission réussie (c.-à-d. v). L'équation ci-dessus démontre que la réduction du taux de contact ralentira le mouvement des individus du compartiment sensible vers le compartiment infecté. Si cette réduction est suffisante pour réduire le coefficient de transmission de telle sorte que $R_0 = \frac{\kappa \times v \times N}{A \times \gamma} < 1$, un pathogène ne provoquera pas d'épidémie. Bien que ce modèle soit assez simple, il démontre la théorie sous-jacente sur laquelle repose le contrôle des maladies par la manipulation des populations hôtes. En examinant l'équation du coefficient de transmission, ou R_0 , nous pouvons voir que la manipulation de la densité des animaux (c.-à-d. $\frac{N}{A}$) affectera le taux de transmission.

Dans la Figure 1, nous montrons comment la prévalence maximale est réduite et le taux de l'épidémie est modifié en réduisant la densité des animaux à l'aide du modèle ci-dessus. Notez que le chiffre est présenté comme la réduction proportionnelle de la densité (c.-à-d. que 0,5 représente une réduction de 50 % de la densité) à partir de la valeur de départ de 10 animaux/km².

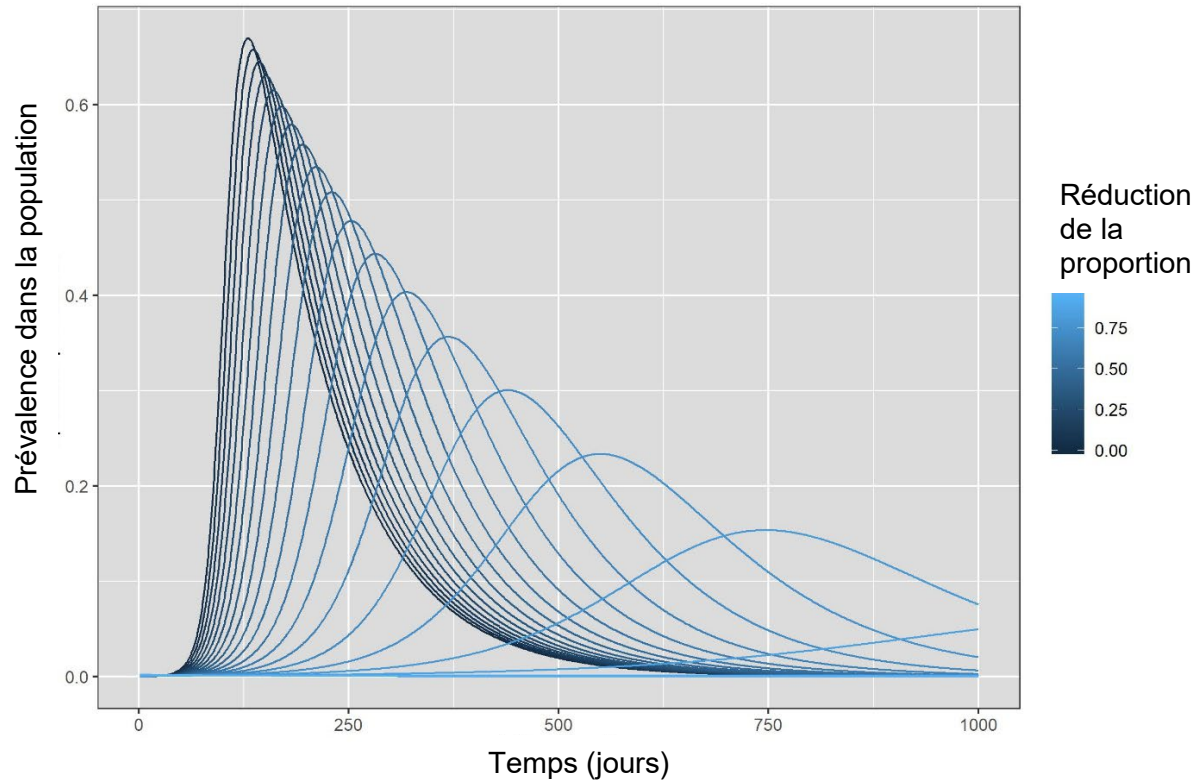


Figure 1 – Démonstration des courbes de prévalence lorsque la densité de la population est réduite.

Il convient également de souligner que les variables κ et ν de ces équations sont des propriétés inhérentes à l'hôte et au pathogène et ne sont donc généralement pas influencées par les efforts de manipulation de l'hôte.

Nous pouvons également utiliser le modèle ci-dessus pour examiner comment la manipulation des populations hôtes, avant l'introduction d'un agent infectieux, peut réduire la probabilité d'une épidémie. Dans la Figure 2, nous montrons comment le R_0 est influencé par la réduction de la densité en supposant une densité de départ de 10 animaux/km². En examinant la figure, nous pouvons constater que, compte tenu des paramètres de notre modèle, la réduction de la densité a un effet linéaire négatif sur le R_0 , mais qu'il faut une réduction importante (c.-à-d. une réduction de la densité > 90 %) pour s'assurer qu'une épidémie ne se produise pas (c.-à-d. $R_0 < 1$). Ainsi, dans cet exemple, un effort important serait nécessaire si la prévention d'une épidémie était le but du programme de contrôle de la maladie. Évidemment, ces résultats ne sont pas généraux et dépendent des paramètres spécifiés dans notre modèle, mais ils illustrent les fondements théoriques de nombreux efforts de manipulation des hôtes. Cet exercice montre également l'utilité d'exploiter ces types de modèles, en particulier lorsque des données existent pour les paramétrer, afin d'orienter les efforts de contrôle et de fixer des attentes réalistes quant aux impacts attendus.

Nous insistons sur la compréhension de la théorie qui sous-tend les manipulations proposées des populations hôtes, car elle est essentielle pour choisir et concevoir des actions de gestion appropriées, ainsi que pour communiquer ces attentes aux politiciens et au public. Lorsqu'il s'agit d'agents infectieux de la faune sauvage, bien qu'il arrive souvent que des informations clés soient manquantes pour modéliser explicitement une maladie comme nous l'avons fait ici, il est néanmoins possible de s'inspirer d'autres maladies humaines, d'animaux sauvages ou

domestiques semblables, dont on soupçonne qu'elles se comportent de manière similaire. Ces données indirectes peuvent ensuite être utilisées pour développer une compréhension du comportement potentiel de la maladie et de son impact sur les populations hôtes d'intérêt. Ces exercices sont également utiles pour organiser les connaissances existantes et formuler clairement le problème ainsi que les objectifs des efforts de gestion.

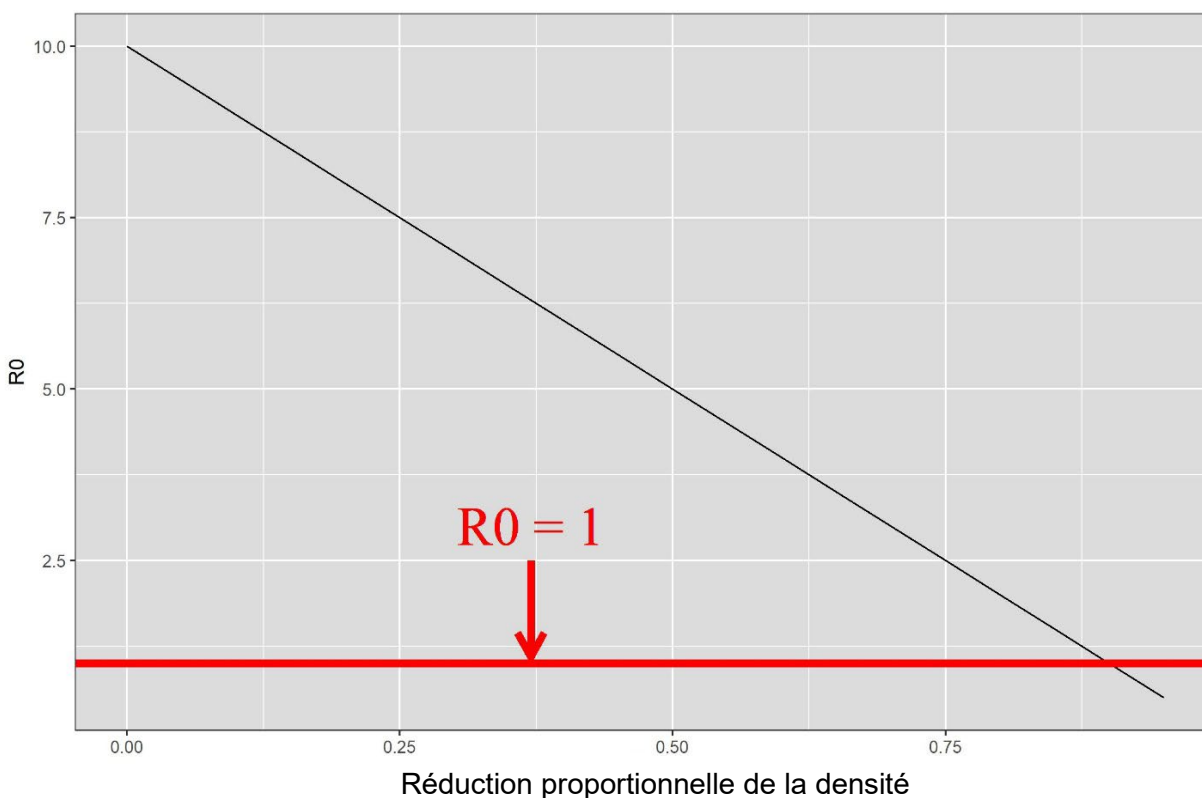


Figure 2 – Démonstration des impacts de la réduction de la densité sur le R_0 .

Dans la section suivante, nous décrivons les principales considérations à prendre en compte lors de la conception d'efforts de gestion visant à manipuler les populations hôtes. Notre objectif n'est pas de détailler toutes les considérations potentielles, ce qui est une tâche impossible car elles varieront selon les juridictions, les populations hôtes et les agents infectieux. Notre intention est plutôt de décrire les principaux facteurs qu'il est essentiel de prendre en compte afin de maximiser les chances de réussite d'un programme de gestion des maladies.

Considérations sociales

Bien qu'elle soit couramment tentée pour le contrôle des maladies, la manipulation des populations hôtes est une entreprise difficile pour diverses raisons. L'un des plus grands défis tourne autour de l'acceptation sociale de ces activités. Les perceptions et les attentes du public concernant les actions de manipulation peuvent varier considérablement au sein d'une même juridiction et d'une juridiction à l'autre, et peuvent être influencées par de nombreux facteurs : par exemple, les considérations économiques, les utilisations anthropiques des populations, le manque de compréhension biologique, les valeurs ou les croyances profondément ancrées

concernant les populations sauvages, et/ou la méfiance à l'égard des institutions gouvernementales. De plus, les réactions du public peuvent changer rapidement et de manière inattendue, potentiellement en raison d'événements extérieurs aux efforts réels de contrôle de la maladie. Avec ces changements, il ne fait aucun doute que l'environnement politique évoluera également, ce qui peut avoir un impact direct sur l'efficacité et la faisabilité des programmes de contrôle des maladies. Bien qu'il puisse être impossible de prévoir tous les problèmes sociaux potentiels entourant la manipulation des populations hôtes, le fait de s'efforcer de comprendre le climat social *avant* de tenter ces manipulations peut aider à identifier la réaction probable du public et tout piège potentiel. Ces informations peuvent ensuite être utilisées pour sélectionner la stratégie appropriée qui maximisera l'acceptation du public et, si nécessaire, sa participation, en diminuant la probabilité d'échec dû aux pressions sociales. Elles peuvent également délimiter diverses possibilités pour susciter l'adhésion du public aux manipulations des hôtes. De même, la mise en œuvre d'actions de manière transparente et l'établissement d'un plan de communication qui diffuse les détails des manipulations prévues, l'importance et le besoin associés, la manière dont le succès sera mesuré et l'état actuel des efforts auprès du public peuvent être un outil puissant pour faciliter et maintenir le soutien du public. Cependant, il arrive souvent qu'au cours des efforts de contrôle d'une maladie émergente rapide, il n'y ait que peu de temps à consacrer à l'étude de l'environnement social. Dans ces cas, il est encore plus crucial que les informations soient communiquées en temps opportun au public concerné, car le manque d'informations peut entraîner la diffusion involontaire ou délibérée de fausses informations et finalement conduire à l'échec du programme de gestion. En outre, le niveau de soutien de plusieurs parties prenantes concernant les manipulations d'hôtes peut être évalué par le biais d'enquêtes sociales formelles ou informelles, de la surveillance des médias populaires et de l'organisation de réunions publiques parallèlement à la mise en œuvre d'une action, ce qui peut aider à cibler les campagnes éducatives, ainsi qu'à mettre en lumière les possibilités d'affiner les manipulations afin de les rendre plus acceptables socialement. Le message à retenir est que la manipulation des populations hôtes relèvera sans aucun doute d'un examen public, et qu'il est essentiel de réaliser que les moteurs sociaux peuvent être les moteurs les plus influents au sein de l'écosystème de gestion. Pour réussir sur le long terme, les manipulations d'hôtes doivent être socialement acceptées !

Considérations systémiques

La triade épidémiologique est à nouveau une image utile pour considérer la variété des moyens de manipuler les populations hôtes dans le contrôle des maladies, car chaque composante fournit des éléments d'information de base qui peuvent aider à choisir, concevoir et mettre en œuvre l'action de gestion appropriée. Il convient de souligner à nouveau que la surveillance représente des « données d'action », de sorte qu'une grande partie des informations nécessaires à la mise en œuvre de la gestion des maladies peut et doit être recueillie au cours de programmes de surveillance ciblés ou généraux des maladies de la faune sauvage.

Agent

Les premiers facteurs à prendre en compte sont les caractéristiques de l'agent étiologique. Par exemple, il est essentiel de déterminer si l'agent est infectieux ou non. Cela permettra de déterminer si l'objectif de gestion de la population doit viser à réduire l'exposition, les contacts entre congénères ou les deux. Cela définira également le risque posé à l'Homme, aux animaux domestiques et aux autres espèces sauvages. Une autre caractéristique importante est de savoir si l'agent est une réintroduction récente dans le système, un problème réémergent, ou s'il se produit plus fréquemment. Les systèmes qui ont déjà été exposés à un agent, en particulier un

agent infectieux, réagiront probablement différemment à la manipulation des populations hôtes que ceux pour lesquels il s'agit d'une nouvelle introduction. Par conséquent, le choix et l'étendue de l'application de la gestion varieront sans aucun doute en fonction de l'historique de l'agent dans le système. La gamme d'hôtes de l'agent est un autre aspect important de la planification des efforts de contrôle. Pour un agent non infectieux, ces informations délimitent la gamme d'espèces susceptibles d'être touchées et qui doivent être prises en compte lors de la planification. Ceci est également vrai pour les agents infectieux, mais de plus, la gamme d'hôtes aide à identifier les espèces réservoirs potentielles, les événements de transmission inter-espèces qui peuvent être significatifs, ainsi que l'étendue des efforts qui peuvent être nécessaires pour le contrôle. De même, il est utile de connaître l'étendue géographique de la maladie. Le fait qu'une maladie soit localisée ou déjà largement répartie dans une région déterminera l'ensemble des mesures de gestion qui peuvent être utilisées. La voie d'exposition/transmission de l'agent influence également la manière dont les populations hôtes peuvent être manipulées. Par exemple, les agents qui sont à la fois directement et indirectement transmis peuvent être beaucoup plus difficiles à contrôler et peuvent nécessiter diverses manipulations pour réduire l'infection découlant de multiples modes de transmission. Même les informations sur le taux de transmission, l'évolution clinique de la maladie et toute mortalité associée à la maladie sont utiles lors de la manipulation des populations hôtes. Ces caractéristiques de l'agent déterminent quel impact l'invasion d'un agent pathogène aura sur les populations, le délai d'apparition de la maladie et le risque posé par les individus infectés aux congénères.

Ces caractéristiques de l'agent ne sont que quelques-unes des informations clés qui peuvent être utilisées pour concevoir des actions de manipulation de l'hôte. De toute évidence, plus on peut apporter d'informations sur le problème, plus il y a de chances que l'action de gestion soit non seulement efficiente, mais aussi efficace. Si les connaissances sur l'agent sont limitées, il est important d'utiliser les informations disponibles. De plus, si le temps le permet, une surveillance ciblée peut être mise en place dans la population concernée afin d'acquérir des connaissances supplémentaires sur l'agent.

Hôte

Les attributs de la population hôte doivent également être pris en compte lors de la planification de la gestion des maladies. Il est fortement recommandé d'impliquer des biologistes et des écologistes de la faune sauvage pour aider à décrire les attributs des hôtes individuels et de leurs populations, car ces professionnels auront souvent des connaissances directes sur les espèces qui seront nécessaires pour concevoir des stratégies de manipulation efficaces.

Au niveau de la population, le premier attribut à prendre en compte, notamment pour les agents infectieux, est la structure sociale de la population. Par exemple, les animaux de troupeau peuvent avoir de nombreux contacts infectieux potentiels sur une base régulière, alors que les animaux territoriaux peuvent n'avoir que des contacts limités avec d'autres congénères. La structure sociale déterminera la dynamique de transmission (par exemple, dépendance à la densité par rapport à la fréquence), la façon dont une maladie progresse au sein d'une population et les techniques de gestion appropriées. Un deuxième attribut important est le comportement de la population au cours d'un cycle annuel. L'espèce hôte migre-t-elle ? Les individus utilisent-ils leur aire de répartition de la même manière tout au long de l'année, ou ce modèle d'utilisation change-t-il (par exemple, utilise une zone plus grande pendant la saison de reproduction) ? Décrire la façon dont les hôtes utilisent leur habitat et l'étendue spatiale de leurs déplacements peut aider à élucider l'échelle à laquelle les manipulations de population devront être appliquées, les coûts et avantages écologiques potentiels des mesures de contrôle éventuelles et peut suggérer des périodes de l'année où ces manipulations devraient être menées.

Il est également utile de comprendre les interactions interspécifiques potentielles qui se produisent entre les individus au sein d'une population et d'autres espèces de l'écosystème. Cela est particulièrement vrai lorsqu'un agent infectieux a une gamme d'hôtes étendue. Plus il y a d'interactions entre les hôtes sensibles, plus la maladie sera difficile à contrôler lorsque la transmission directe est un moteur majeur des processus pathologiques. Pour certaines des manipulations potentielles de la population, il est également impératif de comprendre les besoins en habitat de l'hôte à l'échelle de l'individu comme à l'échelle de la population. La protection ou la modification de l'habitat de la population peut non seulement être utilisée pour manipuler la croissance démographique et l'utilisation d'une zone, mais elle peut également être un outil puissant pour aider les populations à se remettre d'une maladie et à résister aux futures invasions. Enfin, la taille ou la densité globale d'une population est une information précieuse pour la planification de la gestion. L'efficacité d'une manipulation peut être directement liée à la taille de la population et déterminera le niveau d'effort que le contrôle peut nécessiter. En outre, la protection des populations rares ou menacées peut être la plus haute priorité et toute manipulation qui ne garantit pas cette protection à long terme peut être inacceptable.

Au niveau de l'hôte individuel, les effets de la maladie constituent des besoins d'information de base. La maladie provoque-t-elle des signes cliniques ? Cela pourrait bien déterminer si les manipulations qui ciblent les individus infectés peuvent être facilement mises en œuvre. Quels sont les critères d'évaluation de la maladie pour l'individu... entraîne-t-elle une mortalité, une immunité, un portage chronique ? Ces critères d'évaluation détermineront le degré d'agressivité des mesures de gestion, éclaireront les prévisions de l'impact à long terme des agents sur les hôtes, l'efficacité de différents tests de diagnostic, ainsi que l'étendue et la durée de la mise en œuvre de la gestion. Il est également intéressant de savoir s'il existe une sensibilité différentielle entre individus d'une même population. L'hétérogénéité individuelle dans la réponse à la maladie peut informer des manipulations ciblées, mais peut également entraver les efforts de gestion (par exemple, un groupe démographique est asymptomatique mais les individus qui le composent fonctionnent comme des super infecteurs au sein d'une population). De même, le taux de reproduction d'un hôte peut avoir un impact direct sur les processus pathologiques. Il peut être difficile de gérer les maladies par des manipulations de la population lorsqu'une espèce a un taux de reproduction élevé. Dans ce cas, les jeunes peuvent servir de source continue d'individus sensibles, ce qui peut entretenir les épidémies pendant de longues périodes. Il peut également être difficile de maintenir les effets des manipulations démographiques dans le temps en raison de l'afflux rapide de jeunes. Inversement, les espèces ayant des taux de reproduction élevés peuvent se rétablir beaucoup plus rapidement des impacts de la maladie et ne justifient donc pas forcément des efforts de gestion importants. Enfin, le taux de survie est un autre paramètre démographique qui peut avoir des implications importantes pour les décisions de gestion. L'impact des manipulations de population peut avoir des effets très différents sur les espèces qui vivent longtemps par rapport à celles qui ont une mortalité naturelle plus élevée. La survie individuelle influence directement le nombre d'individus sensibles, infectés et rétablis (en utilisant les descriptions de modèles ci-dessus), ce qui se traduit par une variation de la dynamique de la maladie et de la population pour différents taux de survie et l'efficacité des manipulations potentielles des populations hôtes. Ainsi, la compréhension des processus démographiques des hôtes est fondamentale pour développer et mettre en œuvre des actions de gestion des maladies.

Il existe d'autres attributs de l'hôte et de ses populations qui peuvent être importants dans des systèmes spécifiques. Mais quoi qu'il en soit, il faut comprendre les bases de la biologie et de l'écologie de l'hôte pour gérer efficacement la maladie au sein des populations hôtes par le biais de manipulations de population. Tous les efforts doivent être faits pour recueillir et rassembler les informations pertinentes sur l'hôte avant de concevoir toute activité de manipulation afin d'éviter des conséquences involontaires, voire contre-productives, qui pourraient entraver le contrôle de

la maladie et avoir un effet potentiellement négatif sur le bien-être à long terme de la population hôte.

Environnement

Nous avons déjà décrit certains aspects de l'environnement qui sont importants à prendre en compte lorsque nous avons discuté des besoins en habitat de l'hôte. Cependant, si nous considérons que l'environnement a une signification plus holistique, nous devons considérer la relation de l'hôte avec d'autres composants de l'écosystème au moment de décider des efforts de manipulation appropriés. Par exemple, la manipulation de la population hôte peut avoir un impact direct ou indirect sur d'autres espèces importantes. Ces effets peuvent être positifs ou négatifs, mais au vu des relations intrinsèquement interconnectées au sein d'un écosystème, il y aura sans aucun doute des conséquences au-delà de celles associées à l'espèce hôte focale. Ces effets en aval doivent être inclus dans le processus de décision lorsque les mesures de gestion sont choisies pour minimiser les répercussions négatives involontaires de la gestion. En d'autres termes, la nécessité de maintenir la fonction de l'écosystème peut limiter les actions de gestion des maladies à celles qui n'impacteront pas gravement l'intégrité du système, même si ces actions sont moins efficaces pour la population hôte particulière.

Les attributs physiques de l'environnement déterminent également si certaines manipulations de la population sont réalisables. Par exemple, un terrain accidenté peut entraver l'accès humain et limiter ainsi la capacité d'appliquer des mesures de gestion aux populations qui habitent ces régions. De même, certains environnements peuvent prendre beaucoup de temps pour se remettre des perturbations, ce qui peut réduire les stratégies de manipulation viables à celles qui ont un impact minimal sur les sites de traitement.

L'environnement est également un facteur critique lorsqu'il sert de source ou de réservoir pour l'agent étiologique. Dans ces cas, l'intégration de l'environnement dans la conception de l'action de manipulation est nécessaire pour réduire la réinfection et les nouvelles infections par cette voie de transmission. Dans certains cas, la compréhension de l'hétérogénéité environnementale et de son effet sur le processus de la maladie sera essentielle pour cibler les efforts de gestion vers les hôtes des régions les plus à risque. Cela peut augmenter l'efficacité des manipulations de population et préserver des ressources limitées.

Comprendre le rôle de l'environnement et les impacts de la gestion au niveau de l'écosystème est l'une des tâches les plus difficiles lors de la conception de manipulations de populations. Cela nécessite une connaissance approfondie des processus naturels à plusieurs échelles. Il y aura probablement d'importantes lacunes concernant les connaissances qui peuvent limiter la compréhension ; cependant, prendre le temps de cartographier les fonctions significatives du système et leurs moteurs peut mettre en évidence les réponses potentielles de l'écosystème à surveiller, et peut donner l'impulsion à des recherches plus approfondies pour combler les principales lacunes de compréhension mises en évidence.

Considérations logistiques

Jusqu'à présent, nous avons concentré notre discussion sur les considérations sociales et systémiques entourant la manipulation des populations hôtes. Les contraintes logistiques entourant les actions de gestion proposées sont une considération tout aussi importante. De toute évidence, la disponibilité des ressources pour effectuer des manipulations de population va déterminer le type et l'étendue des manipulations. Ces ressources comprennent non seulement

des ressources financières, mais aussi du personnel. Ce dernier point comprend non seulement le nombre approprié d'employés, mais aussi du personnel possédant une expertise appropriée. La mise en œuvre réussie de toute action de gestion des maladies requiert des compétences pour une grande variété de disciplines, notamment l'écologie, l'épidémiologie, les statistiques, les sciences vétérinaires, la parasitologie, la pathologie, la virologie, la microbiologie et la science des données. Cette expertise peut être exploitée à l'intérieur ou à l'extérieur d'une agence/entité, mais le succès dépendra de l'engagement des bonnes personnes dans la gestion.

Une autre considération logistique est la disponibilité de tests de diagnostic appropriés (voir la section Surveillance de ce manuel pour plus de détails). Certaines manipulations peuvent nécessiter explicitement la disponibilité d'un bon test de diagnostic (c.-à-d. l'abattage des individus infectés) si elles doivent être utilisées. Cependant, même pour celles qui ne l'exigent pas dans le cadre de leur mise en œuvre, la plupart des manipulations requièrent la disponibilité d'un test de diagnostic approprié (c.-à-d. la capacité de différencier les animaux infectés des animaux non infectés) afin de surveiller les impacts et le succès ou l'échec final d'un programme de contrôle. L'objectif d'un programme de contrôle est généralement de réduire la croissance et la propagation d'une maladie au sein d'une population. Ce n'est qu'en contrôlant la population par une surveillance ciblée que l'on peut évaluer l'efficacité des manipulations de la population.

La dernière considération logistique que nous décrivons consiste à évaluer si les manipulations peuvent être effectuées passivement ou doivent être effectuées activement du point de vue d'une agence. Par exemple, si l'espèce hôte est une espèce de gibier, il peut être possible de manipuler les populations par le biais de réglementations sur les prélèvements. Cela permettrait de manipuler la population de manière passive par l'intermédiaire des chasseurs, ce qui peut être une approche plus efficace et efficiente par rapport à une agence manipulant directement la population. Il se peut également que des approches de manipulation active et passive doivent être mises en œuvre pour que la gestion soit réussie. Quelle que soit la mise en œuvre, il est utile d'explorer l'ensemble des options qui existent pour effectuer des manipulations d'hôtes.

Les considérations logistiques sont très variables selon les juridictions, les maladies et les systèmes. Il n'est pas possible de toutes les saisir, mais elles constituent une considération importante qui détermine généralement comment, où et quand la gestion est appliquée. C'est pourquoi nous les avons incluses explicitement.

Mesures du succès

Il est tout aussi important pour les considérations sociales et systémiques susmentionnées, afin de concevoir les manipulations des populations hôtes, de déterminer les paramètres qui permettront d'évaluer la gestion. La définition des mesures de la réussite est souvent négligée lors de la conception des stratégies de gestion. Cette omission est probablement due à l'objectif apparemment évident des pratiques de contrôle des maladies (c.-à-d. le contrôle des maladies au sein d'une population). Par conséquent, l'équation « succès = contrôle de la maladie » semble implicite. La difficulté survient lorsque nous creusons plus profondément et posons la question du suivi : qu'est-ce qu'un contrôle réussi ? L'examen de cette question montre que le contrôle, à moins qu'il ne soit explicitement défini, est un concept ambigu pour les maladies de la faune sauvage. Par exemple, le contrôle signifie-t-il l'éradication complète, une réduction de certaines mesures d'intensité (prévalence, incidence, fréquence, etc.), la prévention de la propagation ou le développement de nouveaux foyers, etc. ? Il est essentiel, avant le début de toute activité, de préciser la manière dont l'efficacité d'une manipulation sera évaluée. Cela permettra de s'assurer que la bonne manipulation pour réussir est utilisée et que les informations requises pour évaluer

l'efficacité seront recueillies dès le début des activités de contrôle. De même, il est crucial de définir l'objectif d'une action de gestion en fonction de ces paramètres de réussite. Cela aidera à déterminer la répartition des ressources, le moment où la gestion peut cesser ou devrait être abandonnée, et est nécessaire lors de la communication avec les politiciens ou le public. Ce dernier point est particulièrement important, car souvent, le succès et la disponibilité des ressources pour les manipulations de la population reposent sur un soutien public et politique continu. Le fait d'avoir des objectifs clairs basés sur des paramètres définis fournit non seulement une validité scientifique mais également une transparence pour les actions de gestion susceptibles d'être controversées. En résumé, avant d'instituer une gestion visant à manipuler les populations hôtes, il est nécessaire de définir comment les effets de la gestion seront mesurés et d'établir des objectifs autour de ces paramètres avant de mettre en œuvre la gestion.

Manipulations des populations hôtes

Maintenant que nous avons décrit la théorie ainsi que certaines considérations de conception majeures pour mener des manipulations sur les populations hôtes, nous allons décrire certaines des manipulations les plus courantes utilisées sur les espèces sauvages.

Distribution

Le premier type de manipulation d'hôtes que nous aborderons est la manipulation de la distribution de la population hôte pour le contrôle de la maladie. Le fondement théorique de cette action de gestion est de réduire les contacts entre individus sensibles et congénères infectés ou de réduire l'exposition à un agent non infectieux. La modification de la distribution ne modifie pas le nombre total d'hôtes, elle vise plutôt à modifier la zone habitée par ces hôtes. En utilisant notre modèle simple de maladie infectieuse ci-dessus, cette manipulation modifie essentiellement le paramètre A , qui modifie effectivement la densité. La Figure 3 montre le résultat du doublement de la superficie utilisée par une population sur la prévalence globale dans le temps, puis de l'introduction d'un agent pathogène. Notez que nous utilisons les mêmes paramètres que ceux décrits précédemment pour le modèle ci-dessus.

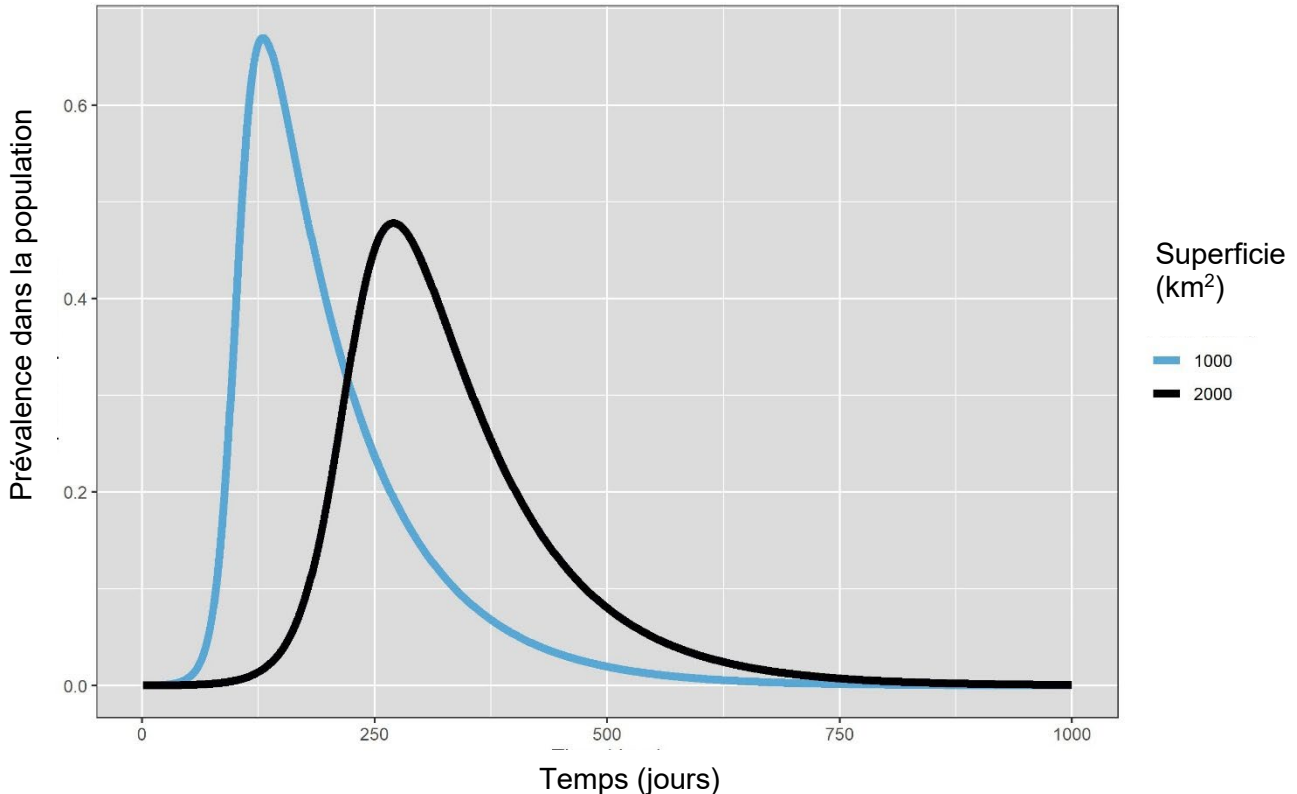


Figure 3 – Impacts de l'augmentation de la surface utilisée par une population sur la prévalence.

Il ressort de cet exemple que le fait de doubler la zone sur laquelle une population est dispersée réduit la prévalence maximale, le nombre total d'individus infectés et aplatit la courbe épidémique dans le temps. Il s'agirait donc des résultats attendus de la manipulation de la distribution des hôtes, bien que les impacts exacts puissent varier en fonction du moment où la manipulation a été mise en œuvre par rapport à l'introduction de la maladie. De plus, dans certains cas, lorsqu'il existe une source ponctuelle d'agents non infectieux ou que la maladie est très localisée, la modification des distributions peut avoir des effets beaucoup plus spectaculaires.

Il existe un certain nombre de méthodes potentielles pour modifier la distribution des hôtes. La première consiste à disperser ou à déplacer les zones utilisées par la population hôte. Cette stratégie peut être recommandée en particulier lorsque l'épidémie ou l'exposition à un agent non infectieux est localisée et qu'il existe d'autres habitats non affectés et adaptés dans la région. Un exemple de cas où la dispersion peut être recommandée est lorsqu'un site est fortement contaminé par de la grenaille de plomb ou qu'un complexe de zones humides connaît une épidémie de botulisme (*Friend et Franson 1999b*). Dans ce cas, la sauvagine et d'autres espèces d'oiseaux peuvent être dispersées ou capturées et transportées vers de nouvelles zones éloignées de ces sites. Il est également possible d'attirer les animaux à l'aide d'appâts ou d'améliorations de l'habitat, loin des sites problématiques. Il est important de ne pas sous-estimer les ressources et les efforts qu'implique la dispersion ou le déplacement des populations d'animaux sauvages, en particulier pour certaines espèces comme le bison qui sont dangereuses et difficiles à manipuler ou à effrayer (*Wobeser 1994*). De plus, si la dispersion est réussie, ses effets et avantages ne seront probablement que transitoires, à moins que les efforts ne soient maintenus dans le temps, ou que l'habitat ne soit modifié pour réduire l'adéquation à la population hôte (par exemple, en drainant une zone humide pour décourager son utilisation par les oiseaux aquatiques). Ce dernier point doit être soigneusement examiné dans le contexte des impacts sur

les espèces non ciblées. En outre, lorsqu'on décide de disperser une population hôte, il est impératif de tenir compte du risque de dispersion d'un agent infectieux. Si la maladie est émergente et d'étendue limitée, la dispersion des individus peut être contre-productive et entraver les efforts de contrôle de la maladie. Dans ces cas, il peut être conseillé de dépeupler la zone locale pour protéger la plus grande population de l'hôte (*Wobeser 1994*). À l'inverse, si l'on sait que la maladie ou l'agent pathogène est largement répandu et que d'autres facteurs tels que les caractéristiques environnementales favorisent l'émergence, la dispersion peut être une option de gestion viable.

Il est également important de prendre en compte d'autres impacts de la dispersion, tels que l'augmentation de la déprédation des cultures ou les interactions entre la faune sauvage et le bétail, qui peuvent résulter des efforts de dispersion. Par exemple, un complexe d'aires d'alimentation pour wapitis dans le Wyoming, aux États-Unis, a été créé pour fournir des sources nutritionnelles alternatives pendant l'hiver aux troupeaux de wapitis (*Cervus canadensis*) en déclin et pour réduire les conflits avec les intérêts de l'agriculture et de l'élevage. La taille des troupeaux de wapitis a depuis augmenté et un grand nombre de wapitis se rassemblent maintenant sur les aires d'alimentation chaque hiver. La présence de brucellose (*Brucella abortus*) dans ces troupeaux de wapitis ainsi que dans les troupeaux de bisons de la région environnante est particulièrement préoccupante. Cette situation représente un dilemme difficile pour les gestionnaires de maladies, car les aires d'alimentation contribuent fonctionnellement à maintenir la séparation entre le bétail et les wapitis ; cependant, les grands rassemblements d'individus créent un risque accru d'infection. Plus récemment, la maladie débilitante chronique (MDC) constitue une menace pour ces troupeaux, la concentration artificiellement élevée augmentant les risques (*Cotterill et al. 2018*). Cet exemple met en évidence à la fois les avantages et les risques d'influencer les distributions d'animaux par des changements de distribution intentionnels. En résumé, la dispersion ou le déplacement des zones d'utilisation peut être un outil efficace pour gérer la distribution des animaux afin d'atteindre les objectifs de contrôle des maladies, mais les effets directs et indirects doivent être soigneusement évalués.

Une autre option de gestion qui peut être employée pour influencer la distribution des hôtes est la séparation forcée des individus infectés et non infectés ou la prévention du contact avec un agent non infectieux. Lorsque les clôtures sont considérées comme une option de gestion, elles visent généralement à réduire la propagation des hôtes infectés dans les régions ou à réduire la transmission au sein des zones déjà touchées en modifiant la distribution des hôtes. La plupart des exemples où les clôtures se sont avérées efficaces impliquent la séparation de la faune et du bétail. Par exemple, des clôtures extensives ont été utilisées pour réduire l'incidence de la fièvre aphteuse et de la trypanosomiase chez le bétail, notamment au Botswana, au Zimbabwe, en Namibie et en Afrique du Sud (*Thomson et al. 2013*) ; cependant, l'efficacité des clôtures et d'autres mesures de contrôle a diminué au fil du temps. Des clôtures ont également été utilisées pour protéger les populations saines réintroduites du diable de Tasmanie en Australie contre les individus infectés par la maladie de la tumeur faciale transmissible du diable de Tasmanie (DFTD ; *Woods et al. 2018*). Malgré ces exemples, il est rare de trouver des preuves solides de l'efficacité des clôtures pour le contrôle des maladies qui affectent uniquement la faune sauvage, en particulier si l'intention est de séparer la faune infectée de la faune non infectée (*Mysterud et Rolandsen 2019*). Les clôtures sont plus susceptibles d'être un outil efficace de gestion des maladies de la faune sauvage lorsqu'elles sont utilisées pour empêcher l'accès à des sites ou des sources ponctuelles dont on sait qu'ils sont contaminés par des agents infectieux ou non infectieux (*Mysterud et Rolandsen 2019, Wobeser 1994*).

De multiples considérations entourant l'utilisation des clôtures influencent le succès de cet outil de gestion (*Mysterud et Rolandsen 2019*). Par exemple, si la clôture est destinée à séparer les

individus infectés des individus non infectés, un programme de surveillance ciblé rigoureux sera nécessaire pour déterminer l'emplacement de la clôture. Les caractéristiques comportementales de l'hôte doivent également être prises en compte dans la conception des clôtures. La capacité à sauter, à creuser, l'habitude de s'attaquer aux clôtures, la capacité à nager, etc. détermineront la hauteur, l'emplacement, la nécessité d'une construction souterraine ou l'utilisation d'électricité dans la conception de la clôture. Il est également essentiel de comprendre le type et les caractéristiques de l'agent. Si un agent infectieux est transmis par des vecteurs, les clôtures peuvent être inefficaces. De même, s'il est transmis directement, il peut être nécessaire d'installer une double clôture pour minimiser la transmission potentielle via les contacts avec la clôture. Cela peut doubler le coût de la construction et de l'entretien. Les agents qui affectent plusieurs hôtes peuvent également poser des défis difficiles car la clôture doit alors être conçue pour modifier les schémas de déplacement de tous les hôtes potentiels. Cela peut être irréaliste si la gamme d'hôtes de l'agent pathogène comprend des espèces de petite taille ou des espèces qui peuvent voler.

L'état pathologique du système définit également l'efficacité et la conception des clôtures. Dans les zones de maladie endémique, les clôtures peuvent être efficaces si elles peuvent exclure les hôtes des « points chauds » d'infection (par exemple, pierres à lécher, sources de nourriture infectées, etc. ; *Mysterud et Rolandsen 2019*) et ainsi réduire le taux de transmission indirecte. Mais lorsqu'on essaie de séparer activement les individus infectés des individus non infectés pendant une épidémie, les clôtures peuvent être moins efficaces pour lutter contre la maladie.

Outre la conception et le positionnement corrects de la clôture, son entretien continu peut être difficile. L'entretien des clôtures demandera un effort permanent et le coût associé en matière de personnel n'est pas négligeable, en particulier lorsque d'autres espèces sauvages (par exemple, les éléphants) ou d'autres événements naturels (par exemple, tempêtes) présentent un risque omniprésent d'ouvrir une brèche dans la clôture en plus des défaillances structurelles de routine. Une seule brèche peut provoquer le passage d'individus infectés et l'échec complet de l'effort de contrôle de la maladie (*Mysterud et Rolandsen 2019*). Enfin, le rôle des mouvements de l'agent pathogène ou de l'hôte assistés par l'Homme ou les mouvements dus à des ruptures de clôture où se trouvent des infrastructures humaines (c.-à-d. des routes) doit être pris en compte pour décider si la clôture est une option viable ainsi que pour toute conception ultérieure. (*Bode et Wintle 2010*) fournissent un cadre simple pour la conception de clôtures qui peut être utile lors des phases de planification.

Malgré leurs effets positifs, les clôtures peuvent avoir des conséquences négatives profondes et imprévues, notamment la destruction massive d'habitats pendant la construction, la perturbation des voies migratoires de nombreuses espèces sauvages, la limitation du flux génétique entre les populations, la destruction des liens sociaux, la création de puits de population et la mortalité directe. Il est important de se rappeler que les efforts de contrôle des maladies, y compris l'installation de clôtures, ne sont pas menés de façon isolée ; les décideurs doivent peser les impacts directs et indirects sur l'ensemble du système lorsqu'ils choisissent la stratégie de lutte contre les maladies la plus appropriée.

En conclusion, il existe différentes méthodes qui peuvent être utilisées pour manipuler la distribution des populations hôtes. Ces options de gestion ont l'avantage de ne pas nécessiter de réduction directe de la taille de la population ; cependant, leur mise en œuvre peut être difficile, avoir des effets secondaires imprévus et la longévité de leurs impacts peut être de courte durée. Le Tableau 4 à la fin de ce manuel fournit un outil simple pour organiser les connaissances et aider à évaluer si la modification de la distribution des hôtes est susceptible de réussir à contrôler la maladie.

Retrait sélectif

Un autre outil de gestion potentiel pour la manipulation des populations hôtes est le retrait sélectif d'individus de la population hôte. La mise en pratique habituelle de cet outil consiste à éliminer les individus infectés de la population afin de réduire le risque de transmission de l'agent infectieux. Cet outil fonctionne essentiellement sur le même principe épidémiologique que la mise en quarantaine des individus dans le domaine de la santé humaine (Wobeser 1994) car il est utilisé pour réduire le contact entre les individus sains et les congénères malades. Si l'on considère le modèle présenté au début de cette section, l'objectif de l'élimination sélective des animaux infectés est de réduire le coefficient de transmission β , et cet objectif est atteint en réduisant la prévalence dans la population. L'impact potentiel de l'élimination sélective sur les processus pathologiques est illustré à la Figure 4 où nous commençons l'abattage après le 75^e jour de l'épidémie et montrons les impacts pour différents taux quotidiens de retrait des individus infectés (c.-à-d. : 0,01 = 1 % des individus infectés ont été retirés chaque jour). L'examen de cette figure montre l'impact spectaculaire que le retrait sélectif des individus infectés peut avoir sur l'évolution de la maladie dans une population.

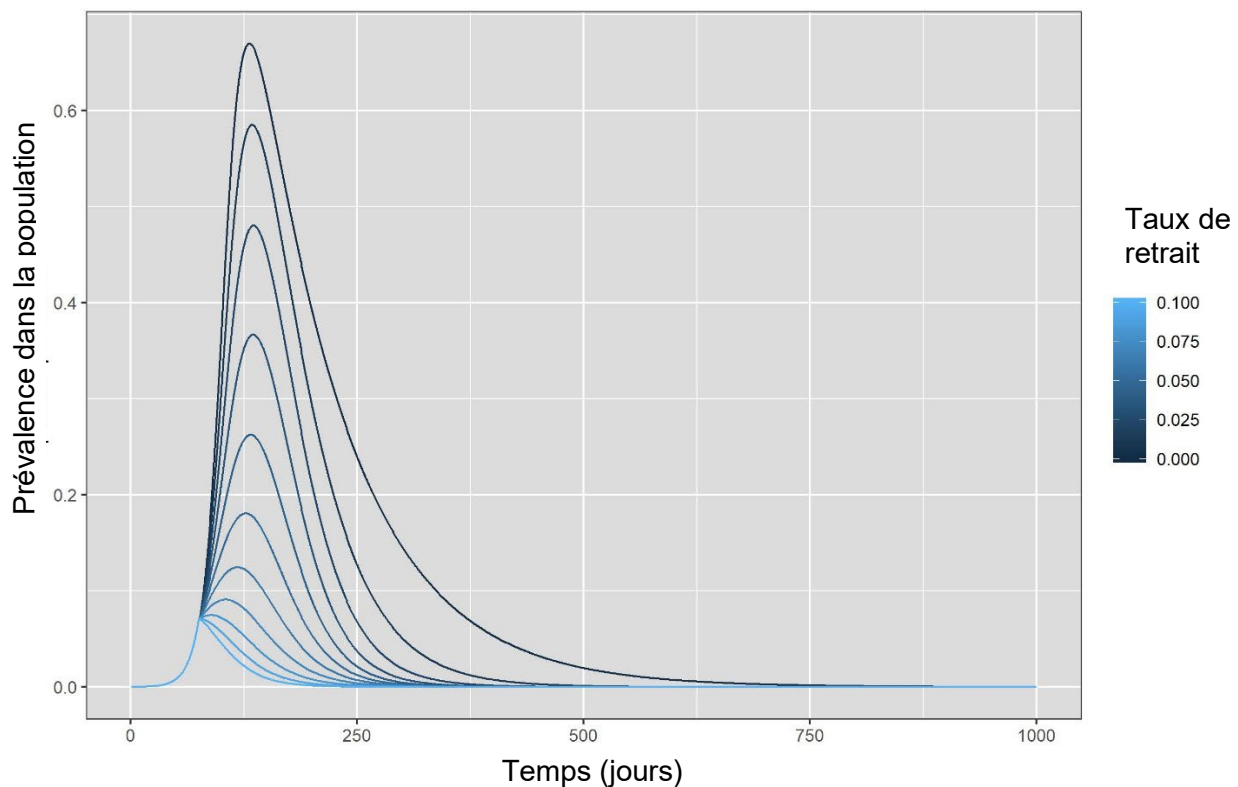


Figure 4 – Impact du retrait sélectif des individus infectés sur la prévalence dans la population hôte.

Bien que l'élimination sélective puisse avoir un impact considérable, les conditions appropriées doivent être réunies pour pouvoir utiliser cette pratique de contrôle des maladies. Premièrement, il doit y avoir un moyen adéquat d'identifier les individus infectés. Si la maladie présente des signes cliniques facilement identifiables, ceux-ci peuvent être suffisants pour permettre le retrait des individus infectés. Toutefois, si les signes cliniques ne sont pas immédiatement apparents ou s'ils se manifestent tardivement au cours de la maladie, il sera important de disposer d'un test de diagnostic fiable pour détecter les individus infectés. Dans cette situation, il sera également

nécessaire de pouvoir associer les résultats des tests à des animaux individuels afin que les animaux infectés puissent être retirés (c.-à-d. test et abattage). Idéalement, tous les animaux d'une population seront testés ; les animaux non testés seront séparés des animaux négatifs connus jusqu'à ce que tous les animaux infectés puissent être retirés. En pratique, cela n'est pas réalisable pour la plupart des situations de maladies de la faune sauvage. Il est plus probable qu'un programme soutenu de test et d'abattage soit nécessaire pour qu'il y ait une réduction continue des individus infectés afin de ralentir ou arrêter suffisamment l'épidémie.

Le retrait sélectif des individus infectés a été utilisé pour réduire avec succès la prévalence de la tuberculose bovine (*Mycobacterium bovis*) chez les buffles d'Afrique (*Syncerus caffer*) en Afrique du Sud (Je Roex et al. 2016). Cependant, le dépistage et l'abattage des bisons (*Bison bison*) n'ont pas semblé être efficaces pour contrôler la brucellose (*Brucella abortus*) chez les animaux sauvages en liberté dans le parc national de Yellowstone aux États-Unis (Bienen et Tabor, 2006). De même, l'abattage sélectif n'a pas réussi à ralentir l'infection ou à réduire l'impact de la DFTD chez les diables de Tasmanie (Lachish et al. 2010). Le manque de succès de cet effort a été attribué au modèle de contacts au sein de la population hôte (c.-à-d. dépendant de la fréquence), à la longue période de latence et au degré d'infectiosité de la maladie élevé, ainsi qu'à la présence d'un réservoir de maladie caché cryptique ou à l'immigration continue d'individus malades. Par conséquent, aussi attrayante que puisse paraître cette méthode, l'efficacité du retrait sélectif des individus infectés varie en fonction des caractéristiques du système.

L'élimination sélective peut également viser à éliminer uniquement les principaux individus infectés qui favorisent de manière disproportionnée l'incidence de la maladie dans les populations (c.-à-d. les superinfecteurs). Par exemple, en Amérique du Nord, les populations de mouflons canadiens ont été considérablement affectées par une maladie respiratoire causée par *Mycoplasma ovipneumoniae* (*Movi*). Les épizooties à tout âge peuvent provoquer des déclinés importants de la taille des populations ainsi que l'incapacité de recruter des agneaux. Dans les populations touchées, des agneaux naissent chaque année, mais la plupart succombent à une maladie respiratoire à l'âge de 6 à 11 semaines, ce qui empêche le rétablissement de la population. Récemment, des enquêtes épidémiologiques intensives ont démontré que l'hétérogénéité individuelle dans l'excrétion de *Movi* est probablement un facteur clé de la dynamique de la maladie, quelques individus infectés de manière chronique entraînant la transmission dans l'ensemble de la population (Plowright et al. 2017). En retirant ces individus chroniquement infectés (déterminés par des tests répétés) d'une population de mouflons en liberté, la maladie a été réduite chez les adultes et la survie des agneaux s'est améliorée (Garwood et al. 2020). Ainsi, pour certains systèmes de maladies, le retrait sélectif des individus chroniquement infectés peut être une option de gestion pour améliorer la santé du troupeau et peut réduire le nombre d'animaux qui doivent être retirés par rapport au retrait sélectif de l'ensemble des individus infectés.

Bien que moins souvent envisagée, l'élimination sélective peut également être utilisée pour réduire uniquement les sous-populations ou les groupes démographiques les plus à risque d'être infectés ou de transmettre un agent pathogène au sein d'une population hôte. En concentrant l'élimination sur ces groupes au sein d'une population, le risque global d'introduction ou de transmission de maladies peut être diminué. Cette approche a été utilisée pour gérer la maladie de Newcastle chez les cormorans à aigrettes (*Phalacrocorax auratus*). La maladie de Newcastle est une maladie à déclaration obligatoire qui provoque une maladie aiguë chez les volailles et survient dans les populations sauvages de cormorans à aigrettes du Midwest des États-Unis (White et al. 2015). Cependant, la maladie provoque principalement des signes cliniques chez les oiseaux juvéniles, les adultes étant largement asymptomatiques. Pour contrôler les populations de cormorans et diminuer le risque de maladie de Newcastle, l'huilage des œufs est

utilisé pour réduire de manière sélective l'éclosion et le recrutement de jeunes sensibles dans la population (White et al. 2015). L'efficacité de l'huilage des œufs dans le contrôle des épidémies de maladie de Newcastle n'a pas fait l'objet d'une évaluation critique ; cependant, la pratique constitue un exemple de ciblage d'une population démographique spécifique pour un retrait sélectif.

Bien qu'il y ait de nombreux facteurs à prendre en compte avant de choisir de mettre en œuvre le retrait sélectif dans une population, l'un des plus importants est l'acceptation ou la tolérance sociale de ces techniques. Bien qu'elles soient souvent mieux acceptées que l'abattage aléatoire pour réduire la densité (décrit dans la section suivante), les options létales de contrôle des maladies peuvent encore faire face à une certaine réticence sociale. Il est essentiel d'avoir des objectifs clairement énoncés, des méthodes d'évaluation bien développées avec des mesures de réussite clairement définies, et un plan de communication qui met l'accent sur la diffusion en temps opportun des résultats du programme au public afin de garantir la transparence des efforts de contrôle. Cela aidera à construire et à maintenir le soutien du public en faveur du retrait sélectif. De plus, les campagnes de sensibilisation du public avant le début du retrait peuvent être instructives pour mettre en évidence les pièges sociaux potentiels susceptibles d'interférer avec les efforts de contrôle et découvrir des améliorations aux procédures pour gagner le soutien du public vis-à-vis du retrait sélectif.

Enfin, pour être réussie, l'utilisation du retrait sélectif nécessite une approche multidisciplinaire. L'influence de l'écologie de l'hôte et de l'agent sur les processus de la maladie ne peut être ignorée lors de la mise en œuvre de cette stratégie de contrôle. Le fait de ne pas intégrer les scientifiques ayant des connaissances écologiques dans la conception de la gestion peut entraîner une baisse de l'efficacité des options de contrôle, voire des résultats contre-intuitifs ou préjudiciables en raison de réponses inattendues de la population ou de la communauté. De même, la modélisation mathématique de l'épidémie peut être particulièrement utile pour déterminer si les méthodes de test et d'abattage sont susceptibles d'atteindre les résultats souhaités, dans un délai raisonnable, compte tenu des contraintes réelles du système. Il est également conseillé d'intégrer des spécialistes des sciences sociales dans la planification afin d'aider d'une part à comprendre l'environnement social dans lequel la gestion sera appliquée et d'autre part à concevoir des méthodes permettant de garantir le soutien des efforts de contrôle. Le fait est que la manipulation des populations hôtes modifie un système complexe et imbriqué d'acteurs et de processus écologiques, et bien qu'une compréhension complète de la totalité des effets des perturbations sur ce système ne puisse jamais être comprise *a priori*, le fait de réunir des scientifiques de ces différentes disciplines augmente considérablement les chances de prévoir les impacts les plus pertinents de la gestion sur le système.

En conclusion, le retrait sélectif d'individus de la population peut être un outil important de contrôle des maladies. Il permet une utilisation plus précise de la gestion que l'abattage généralisé ou la densité de réduction, comme décrit ci-dessous. Dans certains systèmes, il peut permettre d'atteindre les objectifs de gestion des maladies plus rapidement et de manière plus rentable ; cependant, sa pertinence doit être soigneusement évaluée pour chaque système auquel son utilisation est proposée.

Réduction de la densité

Le dernier outil de gestion que nous aborderons pour manipuler les populations hôtes est peut-être celui qui est le plus couramment mis en application pour la gestion des maladies de la faune sauvage : la réduction de la densité de la population hôte. Le fondement théorique de cette approche est que la transmission, le coefficient β , pour l'agent découle d'un processus dépendant

de la densité. En utilisant à nouveau le modèle de maladie simple du début de cette section, la Figure 5 montre les impacts sur le processus de la maladie d'un programme continu de réduction de la densité commencé après le 75^e jour d'une épidémie.

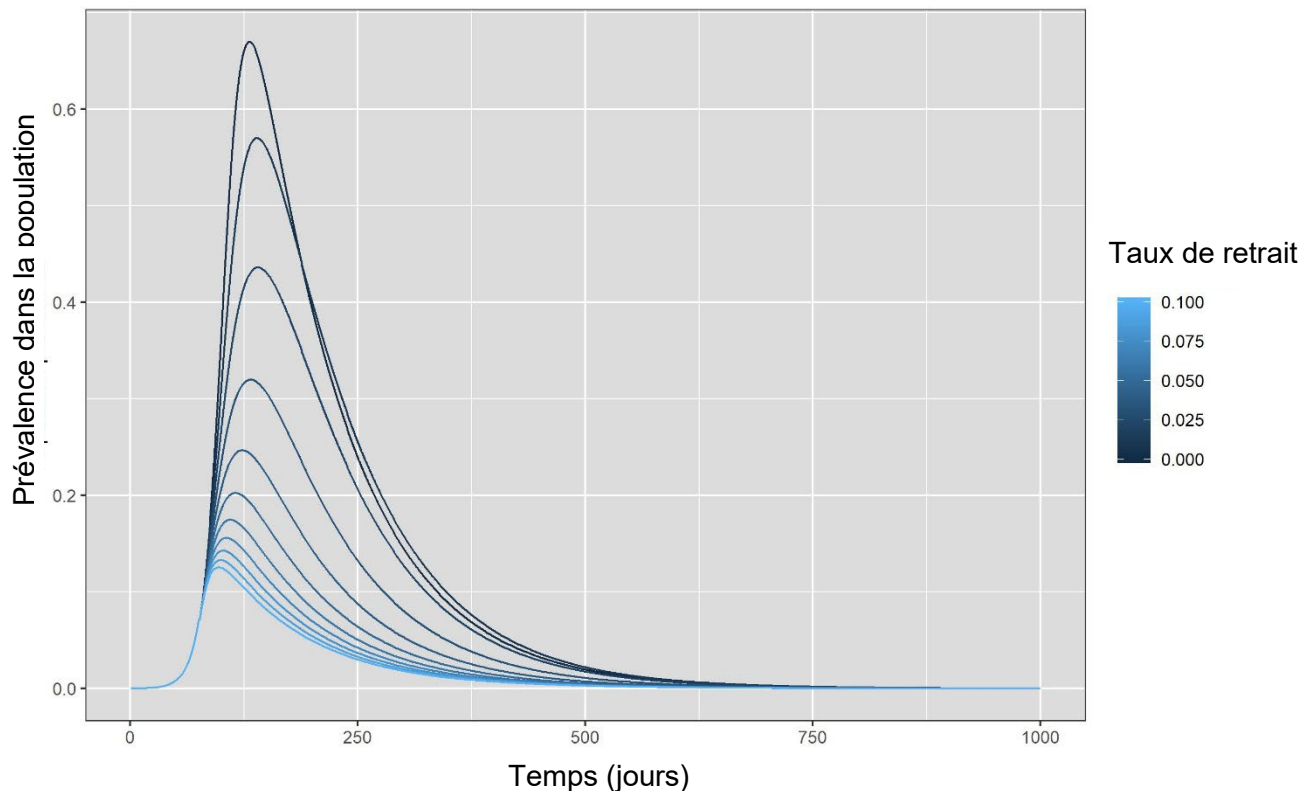


Figure 5 – Impact d'une réduction continue de la densité sur la prévalence.

Bien que cette figure démontre qu'une réduction suffisante de la densité peut modifier l'évolution de la maladie, plusieurs aspects importants de ces résultats méritent une attention particulière. Tout d'abord, ils supposent que les animaux destinés à être retirés sont sélectionnés au hasard, indépendamment de l'état de la maladie. Cela signifie que les individus rétablis sont retirés au même rythme que les individus sensibles et infectés. Cela entraîne le retrait inutile d'animaux. De plus, nous avons supposé un taux de retrait constant, qui peut être difficile à maintenir, et tout aussi problématique, le retrait prolongé entraîne des tailles de population qui peuvent devenir extrêmement faibles. De toute évidence, cela ne serait pas souhaitable dans des scénarios réels de contrôle des maladies.

Nous pouvons également assouplir l'hypothèse du retrait continu et à la place, réduire la taille de la population à un moment donné. La Figure 6 illustre l'effet de la réduction de la densité au 76^e jour sur la prévalence de la maladie compte tenu d'efforts de réduction de différentes ampleurs. Il est évident que pour avoir un impact significatif sur la prévalence, une grande proportion de la population doit être retirée (c.-à-d. > 80 %), et les effets sont beaucoup moins spectaculaires que ceux obtenus avec un retrait continu. Cependant, un effort ponctuel visant à réduire la population peut être plus réalisable dans certains systèmes de maladie qu'un programme d'élimination continu.

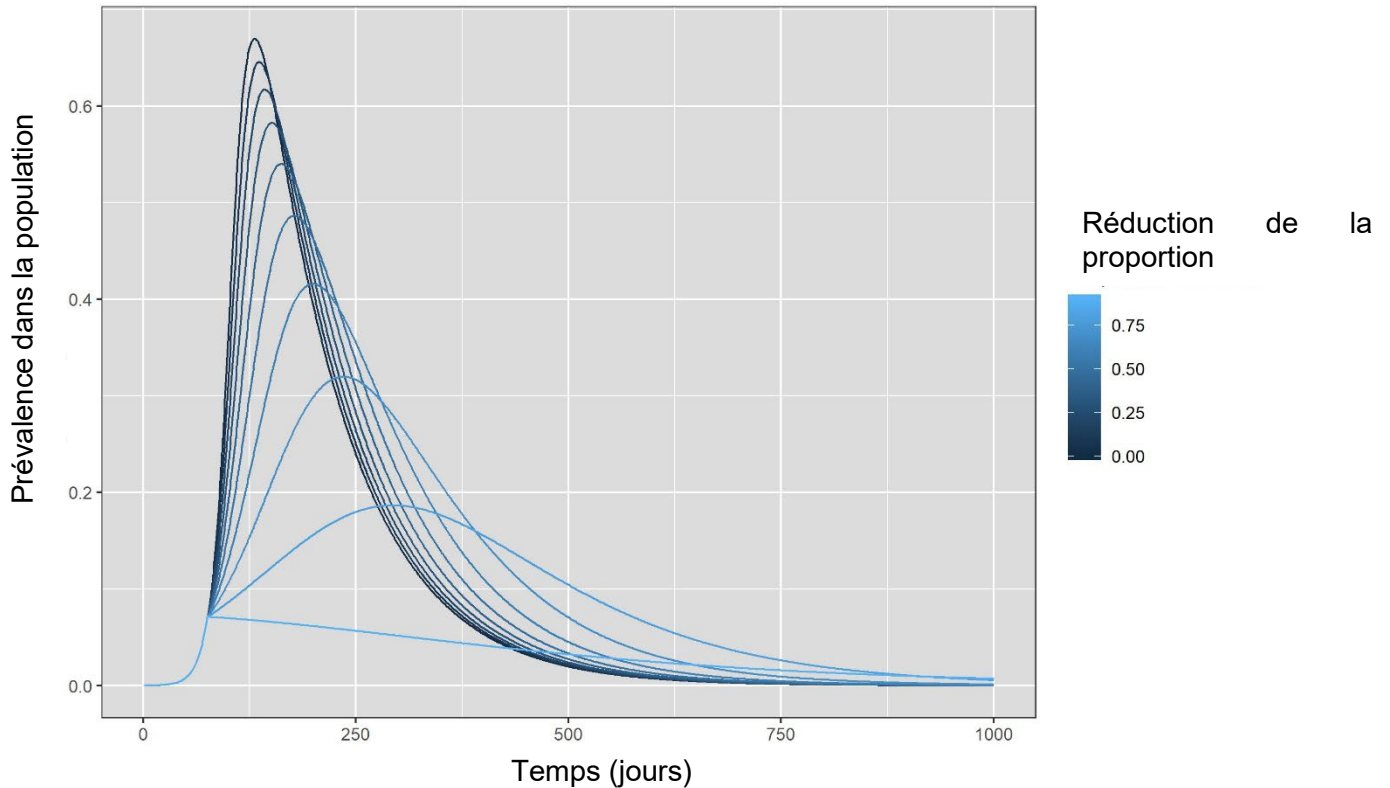


Figure 6 – Impact d’une réduction ponctuelle de la population sur la prévalence.

Les exemples ci-dessus se concentrent sur le retrait après la manifestation de la maladie au sein de la population pendant 75 jours. Mais souvent, la réduction de la densité est mise en œuvre avant l’introduction de la maladie. Dans ces cas, l’objectif est de réduire le R_0 pour une maladie au sein d’une population de façon à empêcher l’établissement de l’épidémie dans la population si elle est exposée à l’agent infectieux. La Figure 2 de la section Théorie illustre comment les valeurs du R_0 varient pour notre modèle d’exemple à mesure que la population est réduite. Dans notre cas, la réduction de la population doit dépasser 90 % avant que le R_0 ne tombe à une valeur inférieure à 1.

À partir de ces exemples simples, il est clair que la réduction de la densité peut avoir des effets très variables sur le processus de transmission en fonction du système, ainsi que du moment et de la manière dont elle est appliquée. Par conséquent, bien qu’elle soit couramment utilisée pour lutter contre les maladies de la faune sauvage, la réduction de la densité doit être soigneusement planifiée pour s’assurer qu’il s’agit de la bonne option de gestion permettant d’atteindre les objectifs de contrôle et qu’elle est menée correctement pour maximiser les chances de réussite.

À cette fin, il existe de nombreuses considérations associées à la conception des réductions de densité. La première est la manière dont la réduction sera menée. La réduction de la densité se fait le plus souvent par des méthodes létales appliquées par l’Homme, mais pour certaines espèces, cela n’est pas approprié. Dans le cas d’espèces dont la conservation est préoccupante, les individus ont une grande valeur et les opérations de piégeage et de transfert peuvent donc être réalisables afin d’obtenir la réduction nécessaire. De plus, dans certains systèmes, la protection ou la promotion des populations de prédateurs peut être un moyen réalisable pour atteindre des densités plus faibles, en particulier, si elles sont utilisées en association avec des méthodes à médiation humaine. Les manipulations de l’habitat peuvent également être utilisées

pour réduire les densités. Celles-ci peuvent être menées par des manipulations environnementales importantes ou en modifiant les comportements humains et l'utilisation du paysage. Par exemple, l'arrêt de l'alimentation complémentaire de la faune sauvage peut réduire les concentrations non naturelles d'animaux et peut également affecter la survie et la reproduction des individus.

La deuxième considération est l'échelle à laquelle la réduction sera appliquée. La densité peut être réduite sur un site local, sur une zone plus large, peut-être dans une zone tampon située autour d'un foyer de maladie nouvellement découvert, ou la réduction peut se produire sur une zone étendue (*Wobeser 1994*). Pour déterminer l'échelle nécessaire, il faut généralement disposer d'informations provenant d'un programme de surveillance ciblé, capable d'évaluer l'étendue spatiale de la maladie dans le paysage. Plus l'échelle requise est grande, plus les efforts de réduction seront difficiles et exigeront des ressources importantes, et moins ils auront de chances de réussir (*Wobeser 1994*). Une autre considération à évaluer est de savoir si la maladie est nouvelle dans le système ou endémique. Dans ce dernier cas, il est également important de comprendre l'intensité de l'infection. Les populations dans lesquelles les maladies sont endémiques sont beaucoup moins susceptibles d'être contrôlées par une réduction de la densité, en raison des niveaux potentiellement plus élevés et de l'étendue spatiale de l'infection au sein de la population. Ainsi, la réduction de la densité sera la plus efficace pour prévenir l'entrée de la maladie (c.-à-d. abaisser le R_0), mais sera probablement moins efficace là où la maladie est établie. Il convient de noter que dans les cas où la maladie est bien établie, la réduction de la densité peut encore être utile, notamment lorsqu'elle a pour but d'empêcher la propagation de la maladie à d'autres populations adjacentes.

Les caractéristiques de l'agent pathogène sont également déterminantes pour savoir si la réduction de la densité est une option viable. Le mode de transmission peut affecter l'étendue nécessaire des efforts de contrôle de la maladie. Par exemple, la réduction de la densité aura plus de chances de réussir si la maladie est transmise directement, et sera moins efficace si la transmission implique un réservoir environnemental ou se propage par des vecteurs. Le processus de transmission déterminera également si la réduction de la densité sera même un succès. Si la transmission suit un processus dépendant de la fréquence, la réduction de la densité ne parviendra pas à contrôler la maladie ; si la vitesse de propagation de l'agent infectieux est rapide, il se peut qu'il n'y ait pas suffisamment de temps pour concevoir et mettre en œuvre des programmes de réduction de la densité avant que ces efforts ne soient vains. De même, pour un agent infectieux qui a une large gamme d'hôtes, il peut être nécessaire de réduire les densités d'un ensemble d'hôtes potentiels. Cela peut augmenter considérablement l'effort nécessaire, en particulier lorsque les caractéristiques physiques des hôtes et leur habitat présentent des variations. Cependant, le fait de ne pas prendre en compte tous les hôtes potentiels dans les opérations de contrôle peut entraîner l'échec de l'ensemble de la stratégie de gestion.

Un autre élément clé de la conception est la compréhension du moment de l'afflux potentiel d'individus sensibles dans la population hôte. La taille des populations peut augmenter tout au long de l'année à mesure que de nouveaux individus naissent ou immigrent dans la population. Ces processus démographiques peuvent améliorer les effets des efforts de réduction de la densité. Les efforts de réduction de la densité doivent tenir compte des afflux potentiels d'individus ainsi que du moment où la reproduction et l'immigration sont susceptibles de se produire. Les meilleurs candidats pour la réduction de la densité sont généralement les populations qui ont un faible taux de reproduction et qui ne subissent pas d'immigration importante en provenance d'autres populations (*Wobeser 1994*). De même, la réduction de la densité des espèces migratrices doit être soigneusement conçue pour garantir que les « bons » individus ou la « bonne » population sont la cible du retrait, et que ceux qui ne font que transiter

par une région ne sont pas inutilement retirés. De plus, la structure sociale de la population hôte peut influencer de manière significative la façon dont les populations réagissent aux réductions de densité. Certaines espèces peuvent avoir des liens sociaux très structurés, et lorsque des individus sont retirés, la perturbation du système social peut être assez dramatique. Ces perturbations peuvent potentiellement entraver voire avoir un effet négatif sur les efforts de contrôle des maladies. Ainsi, la réduction de la densité est susceptible d'être plus efficace pour les populations dont la structure sociale est limitée.

L'habitat utilisé par les espèces ciblées pour la réduction de la densité jouera également un rôle dans le succès des efforts et doit être intégré dans la conception. Les populations résidant dans un habitat de haute qualité seront non seulement probablement plus grandes, mais pourront également se rétablir plus rapidement après des réductions. Par conséquent, les populations dans un bon habitat peuvent nécessiter une réduction plus importante. L'évaluation de l'étendue de l'habitat approprié aide également à établir l'étendue spatiale requise des efforts de réduction en définissant la « population » d'intérêt. Par exemple, s'il existe plusieurs parcelles connectées d'habitat approprié dans le paysage qui agissent comme une méta-population, des efforts de réduction peuvent être nécessaires dans toutes les zones interconnectées. Une surveillance ciblée devra être menée dans chacune de ces parcelles ou sous-populations pour comprendre l'étendue de la maladie et délimiter les endroits où la réduction devrait avoir lieu. La configuration de l'habitat approprié peut également guider les endroits où les efforts de réduction peuvent être les plus efficaces. En fonction des caractéristiques du paysage, il peut être possible de créer des zones tampons de faible densité autour des foyers d'infection en tirant parti de la juxtaposition d'habitats appropriés et non appropriés ainsi qu'en ciblant les efforts de réduction. En bref, les caractéristiques de l'habitat peuvent constituer à la fois des défis et des opportunités pour la réduction de la densité et devraient être intégrées dans les discussions de conception pour le contrôle des maladies.

Il existe également plusieurs considérations logistiques à prendre en compte lors de l'instauration d'une réduction de la densité, lorsque la réduction se fait par des moyens létaux. La première concerne la manière dont les carcasses seront manipulées et éliminées pendant les efforts de réduction. Il est impératif que des protocoles de biosécurité soient mis en place pour protéger le personnel ou le public effectuant le retrait des animaux. Ceci afin de les protéger à la fois de la maladie focale, mais aussi de tout agent pathogène zoonotique potentiellement inconnu que l'hôte pourrait héberger. Les tests effectués sur des animaux retirés peuvent aider à évaluer le succès de la réduction de la densité sur les processus pathologiques. Pour cela, il faut disposer d'un test de diagnostic acceptable et de la garantie que les échantillons appropriés sont prélevés avant l'élimination des carcasses. L'élimination des carcasses (décrite précédemment) doit également être planifiée bien avant sa mise en œuvre.

Une deuxième considération logistique est de savoir qui effectuera la réduction de la densité. Lorsqu'une réduction de la densité est nécessaire pour des espèces de gibier, les chasseurs peuvent être des alliés précieux pour parvenir à la réduction de la densité requise. Cette méthode peut s'avérer extrêmement précieuse, car elle ne nécessite pas de personnel d'agence, les animaux peuvent être retirés des terrains privés et le chasseur est responsable de l'élimination appropriée de la carcasse. Cependant, l'efficacité de la chasse pour atteindre le niveau de réduction souhaité doit être évaluée, et l'abattage par les agences peut être nécessaire pour compléter les efforts des chasseurs s'ils sont insuffisants. Enfin, la durée pendant laquelle les efforts de réduction seront appliqués à une population doit être précisée dès le début des activités pour évaluer le niveau d'engagement des ressources et communiquer les objectifs de gestion aux parties prenantes. Il est peu probable qu'un seul effort de réduction de la densité soit suffisant pour atteindre les objectifs de contrôle de la maladie, et les efforts de contrôle devront peut-être

être déployés sur une période prolongée. Il est souvent difficile de déterminer la durée des efforts à fournir avant les activités de contrôle, mais les modèles mathématiques peuvent contribuer à ces estimations dans un premier temps, avant d'être améliorés à mesure que la connaissance du système augmente.

Comme décrit ci-dessus pour le retrait sélectif, la réduction de la densité peut souvent être très controversée. Ce phénomène est amplifié lorsque le retrait ne se limite pas aux individus les plus à risque ou aux individus infectés. Cependant, bien que pour les maladies de la faune sauvage qui sont zoonotiques ou qui peuvent affecter le bétail domestique cela puisse être moins controversé, chaque fois qu'une réduction de la densité est prévue, une évaluation approfondie des implications sociales et l'élaboration d'un plan de communication sont essentiels. La nécessité d'impliquer des scientifiques issus d'un large éventail de disciplines est également essentielle pour les efforts de réduction de la densité. Nous avons décrit un certain nombre de domaines scientifiques qui pourraient être mis à contribution pour le retrait sélectif et nous ne répétons pas leur description, mais nous rappellerons que la réduction des densités pour contrôler les maladies est une entreprise difficile, étant donné les complexités écologiques et épidémiologiques des systèmes de faune sauvage. La collaboration entre les différentes disciplines est un élément clé pour parvenir à contrôler les maladies.

Il existe de nombreux exemples d'utilisation de la réduction des densités des populations hôtes pour le contrôle des maladies ; cependant, il est beaucoup plus difficile de trouver des cas pour lesquels les effets des actions de gestion ont été évalués de manière critique. Par exemple, la chasse est largement utilisée pour gérer les populations de cerfs en Amérique du Nord, et avec l'introduction de la MDC dans de nombreuses régions, elle est également utilisée pour lutter contre les maladies. Cependant, malgré son utilisation très répandue, il existe peu d'exemples où cette pratique a été rigoureusement évaluée pour déterminer son efficacité. Cette lacune est en grande partie due au manque de données adéquates permettant d'effectuer une évaluation rigoureuse. Cela souligne l'importance et la nécessité de déterminer les paramètres de réussite avant d'initier des efforts de contrôle des maladies. De plus, mesurer le succès n'est pas seulement utile pour s'assurer que les ressources sont bien dépensées et conserver le soutien du public à la gestion des maladies, cela peut également aider à guider les améliorations des activités de gestion et à identifier quand elles n'ont pas les effets souhaités. Par exemple, pour protéger les populations bovines de la tuberculose bovine, des réductions de densité ont été réalisées chez les blaireaux européens (*Meles meles*), qui sont des hôtes réservoirs de l'agent pathogène. Malheureusement, ces efforts ont semblé augmenter la prévalence de la tuberculose bovine dans les populations de blaireaux et dans les troupeaux de bovins entourant la zone de traitement. Le problème dans le système du blaireau était centré sur une compréhension incomplète de l'écologie de cette espèce hôte. Après des études intensives sur les populations de blaireaux, on pense maintenant que les activités d'abattage, qui ont modifié la structure sexe/âge de la population, et par conséquent la probabilité et le type d'interactions sociales, ont entraîné une perturbation sociale de cette espèce territoriale, conduisant à davantage d'excursions en dehors des groupes sociaux normaux. La nouvelle dynamique sociale a finalement entraîné une incidence élevée de la maladie au cours des années suivantes (*Tuytens et al. 2000, McDonald et al. 2008*). Le système du blaireau européen souligne l'importance de comprendre les processus écologiques des populations hôtes lorsqu'on tente de les manipuler (*Prentice et al. 2019*). La gestion de la rage chez les chauves-souris dites vampires communs (*Desmodus rotundus*) en Amérique latine est un autre exemple où le contrôle des maladies a eu des effets délétères sur les populations d'animaux sauvages sans améliorer la situation de la maladie. Les chauves-souris ont été capturées et couvertes d'une pâte anticoagulante. Elles sont ensuite retournées dans la colonie et, grâce au toilettage individuel et social, le poison a été administré à de nombreux individus, ce qui a entraîné une réduction de la densité au sein des

colonies. Cependant, malgré des efforts de traitement importants et à long terme, les cas de rage chez l'Homme et le bétail persistent, et l'exposition des chauves-souris au virus de la rage a augmenté après l'abattage (*Streicker et al. 2012*). On a supposé que la cause de l'absence d'effet positif de l'abattage sur la rage était que l'abattage ciblait les individus adultes, ce qui a déplacé la structure d'âge des colonies vers des cohortes plus jeunes et plus sensibles, et que la transmission fonctionnait potentiellement de manière dépendante de la fréquence (*Streicker et al. 2012*).

En revanche, la réduction de la densité a permis d'éliminer la fièvre aphteuse chez les cerfs de Virginie (*Odocoileus virginianus*) en Californie. Le personnel de l'agence a retiré 20 698 cerfs en un an et la maladie n'a pas été détectée depuis (*Wobeser 1994*). L'abattage est également censé avoir maintenu une faible prévalence de la maladie débilatante chronique (MDC) chez les cerfs de Virginie dans l'Illinois, aux États-Unis. L'abattage localisé par le personnel de l'agence est mené depuis 2003 dans l'Illinois grâce au retrait ciblé des cerfs des points chauds connus de MDC. L'objectif de l'abattage est de maintenir des densités de cerfs plus faibles dans ces zones. La comparaison des taux de prévalence dans l'Illinois à ceux de l'État voisin du Wisconsin, où l'abattage n'a eu lieu que de 2003 à 2008, a montré le maintien de faibles taux de prévalence dans l'Illinois et au Wisconsin pendant les années d'abattage. Cependant, une fois que l'abattage a cessé dans le Wisconsin, les taux de prévalence ont augmenté et étaient significativement plus élevés que ceux de l'Illinois (*Manjerovic et al. 2014*). Il est important de noter que l'abattage a cessé dans le Wisconsin non pas parce qu'il a été jugé inefficace, mais plutôt parce qu'il était très impopulaire auprès du public et a perdu le soutien politique. Il s'agit ainsi d'un bon exemple des impacts de la dynamique sociale sur le contrôle des maladies de la faune sauvage.

Un autre exemple intéressant s'est produit en Ouganda. Une grande colonie de roussettes d'Égypte (*Rousettus aegyptiacus*) habite la mine active de Kitaka, dans le sud de l'Ouganda. Entre 2007 et 2008, quatre mineurs et deux touristes présents sur le site de la mine ont contracté la fièvre hémorragique de Marburg, ce qui a malheureusement entraîné deux décès. Des enquêtes épidémiologiques ont permis de découvrir le virus de Marburg au sein des populations de chauves-souris installées dans la mine. En réponse à ces résultats, mais contre les recommandations du personnel des ressources naturelles, les mineurs ont activement exterminé les chauves-souris de la mine pour réduire le risque d'infection. Plusieurs années plus tard, la plus grande épidémie de virus de Marburg de l'histoire de l'Ouganda s'est produite dans la ville voisine d'Ibana. Des enquêtes ultérieures ont à nouveau impliqué les chauves-souris habitant la mine de Kitaka comme source d'exposition humaine. La population de chauves-souris ne représentait que 1 à 5 % de sa taille d'origine ; cependant, l'infection active des chauves-souris était près de 3 fois supérieure au taux d'infection de la population avant les efforts d'extermination. On a supposé que le dépeuplement initial a entraîné la recolonisation de la mine par des individus sensibles, ce qui a conduit à des taux d'infection plus élevés et à un risque humain accru (*Amman et al. 2014*). Cet exemple illustre deux points essentiels concernant la réduction de la densité. Tout d'abord, agir sans comprendre l'écologie du système peut s'avérer périlleux avec un potentiel élevé de conséquences inattendues. Deuxièmement, la perception humaine du risque peut être un moteur puissant de la manière dont le contrôle des maladies est finalement mis en œuvre et, comme dans ce cas, la peur peut parfois l'emporter sur les conseils scientifiques, au détriment de la santé humaine et de la faune sauvage. Ainsi, dans certains systèmes, la gestion des perceptions humaines est tout aussi importante que la réduction effective de la densité.

Nous concluons par un exemple démontrant que l'exploitation des processus naturels peut améliorer les activités de contrôle des maladies. Plus précisément, cet exemple montre comment les efforts humains déployés pour contrôler les densités des populations hôtes peuvent être

renforcés par la prédation sur les hôtes. En Espagne, les sangliers (*Sus scrofa*) sont un hôte réservoir bien connu de la tuberculose bovine. En outre, les Asturies, une région du nord-ouest de l'Espagne, ont une population saine de loups (*Canis lupus*), alors que dans les régions du sud de l'Espagne, les loups sont absents. En utilisant des données sur les différences de prévalence de la tuberculose bovine chez les sangliers entre ces régions, en combinaison avec une modélisation mathématique, il a été montré que dans les régions où des loups sont présents, les taux de prévalence de la tuberculose bovine sont plus faibles et plus stables que dans les régions dépourvues de cette espèce de prédateur (Tanner et al. 2019). Cet exemple montre comment l'exploitation des interactions des espèces au sein d'une communauté peut contribuer aux efforts de lutte contre les maladies et souligne la façon dont les espèces prédatrices peuvent fournir des services écosystémiques clés qui aident à protéger le bétail et à atteindre des objectifs anthropiques.

En conclusion, la réduction des densités est et restera probablement l'un des outils les plus utilisés pour le contrôle des maladies chez les hôtes sauvages. Cependant, nous soutenons qu'au lieu d'utiliser cette pratique par défaut pour tous les systèmes de lutte contre les maladies de la faune sauvage, il convient de l'évaluer de manière critique avant le début des activités de réduction afin de déterminer la probabilité d'atteindre avec succès les objectifs sur la base d'une évaluation des caractéristiques de l'agent, de l'hôte et de l'environnement. Il est également particulièrement important pour cette technique de gestion d'étudier et de comprendre l'environnement social dans lequel les réductions auront lieu. Enfin, il est nécessaire d'évaluer l'efficacité des efforts de réduction de la densité afin de mieux caractériser quand cet outil de gestion est susceptible d'être efficace et quand il est susceptible d'échouer, et tous les futurs efforts de contrôle des maladies devraient essayer d'inclure des mesures de succès.

Traitement et immunisation des populations hôtes

Jusqu'à présent, nous nous sommes concentrés sur les actions de gestion des maladies qui visaient les processus démographiques ou épidémiologiques à l'échelle de la population. Nous allons maintenant décrire les mesures de contrôle ou de prévention qui ciblent l'individu dans l'espoir d'avoir des effets au niveau de la population sur les processus pathologiques.

Traitement

Les agents pathogènes présents dans l'hôte peuvent être contrôlés par des traitements (par exemple, antibiotiques et anthelminthiques). Bien que le traitement soit couramment utilisé chez les humains et les animaux domestiques, la difficulté d'administrer un traitement limite son utilité pour gérer les maladies chez les animaux sauvages. Le traitement a été utilisé avec succès chez certaines espèces menacées d'extinction, dans le cas où la taille des populations est faible et où il est possible de capturer, traiter et relâcher les animaux. Par exemple, le traitement des lagopèdes des saules (*Lagopus lagopus*) avec un anthelminthique pour réduire les infections par le nématode *Trichostrongylus tenuis* a entraîné des taux de reproduction plus élevés et un nombre accru de jeunes (Hudson et al. 1992). Cependant, un traitement continu est souvent nécessaire, en particulier si certains animaux infectés ne présentent pas de signes cliniques et servent de réservoir à de nouvelles infections ou à la réinfection d'individus traités. L'utilisation continue et généralisée de produits chimiques peut également exercer une pression sélective en faveur d'agents pathogènes résistants, comme cela a été observé pour *Plasmodium falciparum*, le protozoaire à l'origine de la malaria (Hyde 2007), et *Yersinia pestis*, la bactérie qui provoque la peste (Gailmand et al. 1997).

D'un point de vue pratique, même si les animaux malades peuvent être détectés au début de l'évolution de la maladie, il y a souvent un manque de délivrance efficace du traitement et la probabilité de succès thérapeutique peut être extrêmement faible. La manipulation nécessaire et le stress associé peuvent l'emporter sur les avantages thérapeutiques du traitement pour la faune sauvage. Il se peut également qu'il n'y ait pas de traitement efficace connu pour l'espèce en question. Par exemple, il existe peu de médicaments autorisés pour une utilisation chez les animaux sauvages, et ils peuvent avoir des effets différents et inconnus sur différentes espèces. Ce problème ne peut être négligé, car le risque lié à la consommation de médicaments varie en fonction de la substance chimique et de l'affection traitée. En outre, il peut y avoir un manque de personnel ou d'installations adéquates pour le traitement, ce qui le rend peu pratique. Une dernière considération est que l'exposition, l'infection et finalement le rétablissement des individus malades créent une classe d'individus immunisés dans la population, ce qui peut être important pour l'épuisement de l'épidémie ainsi que pour protéger la population d'une exposition ultérieure à l'agent. Court-circuiter le processus par un traitement peut éliminer cette protection de la population, s'il réduit la réponse immunitaire de l'individu et le nombre d'animaux immunisés dans la population.

Bien que le traitement soit une approche peu fréquente pour contrôler une maladie, il peut être privilégié notamment dans les situations suivantes (*Wobeser 1994*) :

- Le traitement peut être effectué efficacement pour une grande partie de la population
- Dans le cas où un individu revêt une importance particulière, comme dans le cas de la gestion des espèces dont la conservation est préoccupante
- Le traitement est effectué avant la capture et le transfert des animaux
- Des ressources adéquates sont disponibles pour les programmes de traitement, sans les prélever sur d'autres programmes essentiels de gestion de la faune sauvage
- Le traitement est utilisé pour former le personnel ou pour susciter l'intérêt du public et obtenir son soutien pour la gestion de la maladie.

Par exemple, le traitement des animaux en liberté peut être judicieux après leur capture et avant leur libération dans une nouvelle zone. Dans cette situation, l'objectif est d'empêcher la propagation des agents dans les populations qui habitent déjà une région, ou de créer des populations exemptes de l'agent dans de nouveaux endroits inhabités. Ces traitements sont souvent suivis d'une période de quarantaine et d'une libération ultérieure, s'il est démontré que les animaux sont exemptes de l'agent. Le fait de ne pas tenir compte du mouvement des agents pathogènes pendant le transfert peut avoir des conséquences négatives d'une grande portée, comme l'ont démontré l'épidémie de rage chez les rats laveurs dans l'est de l'Amérique du Nord (*Nettles et al. 1979*), les extinctions massives d'espèces d'amphibiens tropicaux et tempérés dues au champignon chytride (*Cheng et al. 2011*) et le déclin précipité de l'écrevisse européenne après l'introduction d'un pathogène fongique sur des écrevisses américaines introduites (*Alderman 1996*). Le [Manuel de formation de 3^e cycle sur l'évaluation du risque sanitaire pour la faune sauvage comme aide à la décision et à la définition des politiques](#) fournit une discussion détaillée sur l'évaluation des risques et des mesures de gestion pour les transferts d'animaux sauvages. Il constitue une bonne ressource pour évaluer le traitement en tant qu'option de gestion dans ces situations. Un point important à retenir est que le traitement ne doit jamais être utilisé uniquement pour empêcher la propagation d'un agent par translocation (*Wobeser 1994*). Il peut être impossible de savoir avec certitude si le traitement a été efficace à 100 %, et comme

mentionné précédemment, l'efficacité des médicaments chez les animaux sauvages est généralement inconnue.

Le résultat le plus précieux du traitement des individus est peut-être son impact sur les humains. Le traitement des animaux sauvages malades peut être une importante opportunité d'apprentissage pour comprendre la biologie, l'écologie et les impacts de la maladie sur une espèce, ainsi que pour le développement de traitements efficaces qui pourraient être appliqués à grande échelle. Cette formation pourrait autrement ne pas être disponible, au détriment d'une main-d'œuvre bien formée aux maladies de la faune (*Wobeser 1994*). De même, la réhabilitation ou le traitement d'animaux individuels peut permettre à une agence d'exploiter les préoccupations du public concernant une épidémie ou un événement sanitaire afin de promouvoir la conservation et la santé des espèces. Par exemple, le traitement des espèces communes après une marée noire peut n'avoir aucun impact sur la population. Cependant, le retour de la bonne volonté publique et l'éducation sur l'écologie du système pourrait avoir une valeur intrinsèque suffisante pour justifier de telles actions (*Wobeser 1994*). Enfin, le traitement d'une espèce rare peut être la seule option pour la protéger de l'extinction. Cette situation est illustrée par le cas du rhinocéros blanc (*Ceratotherium simum*) : des efforts considérables ont été consacrés au traitement et aux soins des animaux, en particulier des quelques individus restants de la sous-espèce nordique.

En conclusion, bien que le traitement soit la norme pour les soins en santé humaine et pour les animaux domestiques, il est rarement réalisable ou susceptible d'avoir un impact dans le cas des animaux sauvages. Cependant, il existe des situations où cette technique de gestion mérite un investissement et peut apporter des avantages réels.

Vaccination

La vaccination peut être utilisée pour prévenir une infection ou le développement d'une maladie et constitue un mécanisme essentiel de contrôle des maladies dans la médecine moderne des humains et des animaux domestiques. La théorie sous-jacente à l'appui de la vaccination est l'idée de réduire le R_0 à une valeur inférieure à 1 pour prévenir une épidémie ou l'aider à s'éteindre en réduisant le nombre d'individus sensibles dans la population. Ce concept, appelé immunité collective, constitue généralement l'objectif de la plupart des programmes de vaccination. Pour atteindre l'immunité collective, dans les modèles compartimentaux simples, la proportion d'individus immunisés soit après avoir récupéré d'une infection, soit par la vaccination, doit généralement dépasser $1 - \frac{1}{R_0}$, ce qu'on appelle le seuil d'immunité (*Fine et al. 2011*). En continuant à exploiter notre exemple de modèle simple, nous montrons les impacts de la vaccination sur la prévalence dans la population (Figure 7). Dans ce cas, la vaccination est réalisée dans le compartiment sensible à un rythme continu après le 75^e jour suivant la survenue d'une épidémie. Comme le montre cette figure, la vaccination peut être un outil efficace pour le contrôle des maladies de la faune sauvage. De plus, elle a l'avantage de ne pas avoir d'impact sur la taille globale de la population, contrairement à bon nombre des outils de gestion dont nous avons précédemment discuté.

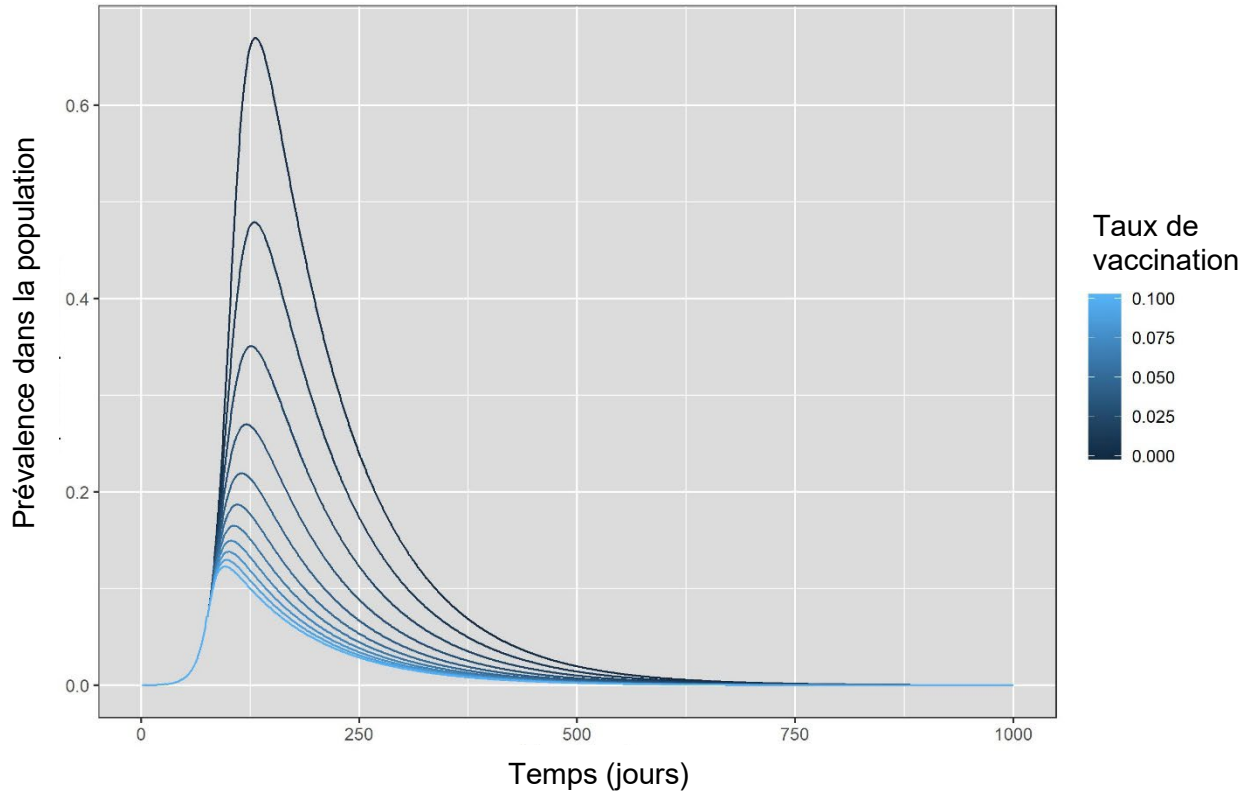


Figure 7 – Impacts d'un programme de vaccination continue sur la prévalence dans la population.

Selon l'espèce et/ou le mode d'administration, il est possible que la vaccination ne puisse être réalisée qu'une seule fois. La Figure 8 montre les impacts sur la prévalence dans la population d'un événement de vaccination unique dans le compartiment sensible pour différents niveaux d'efforts de vaccination, administrée le 76^e jour.

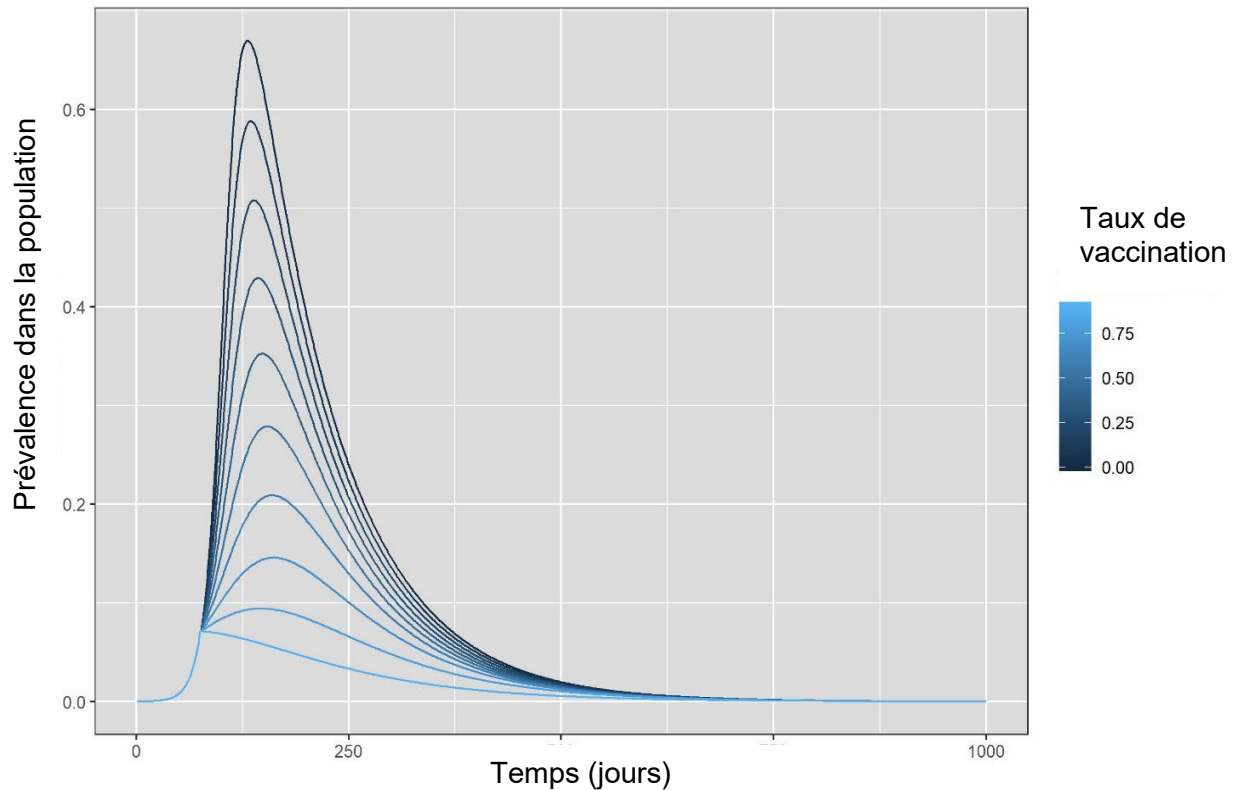


Figure 8 – Impact d'une vaccination unique sur la prévalence dans la population.

Il est clair que le fait de ne vacciner une population qu'une seule fois a beaucoup moins d'impact sur le taux de prévalence dans la population qu'un programme continu. Une proportion beaucoup plus importante de la population doit être vaccinée pour obtenir des changements significatifs dans la dynamique de la maladie, comparables à une opération de vaccination continue.

Enfin, les efforts d'immunisation peuvent être menés avant l'arrivée de la maladie (c.-à-d. vaccination préventive). Les impacts de cette approche, si elle est mise en œuvre une fois avant l'exposition, sont illustrés à la Figure 9. D'après ces résultats, les campagnes de vaccination préventive abaissent la prévalence maximale et aplatissent la courbe de prévalence.

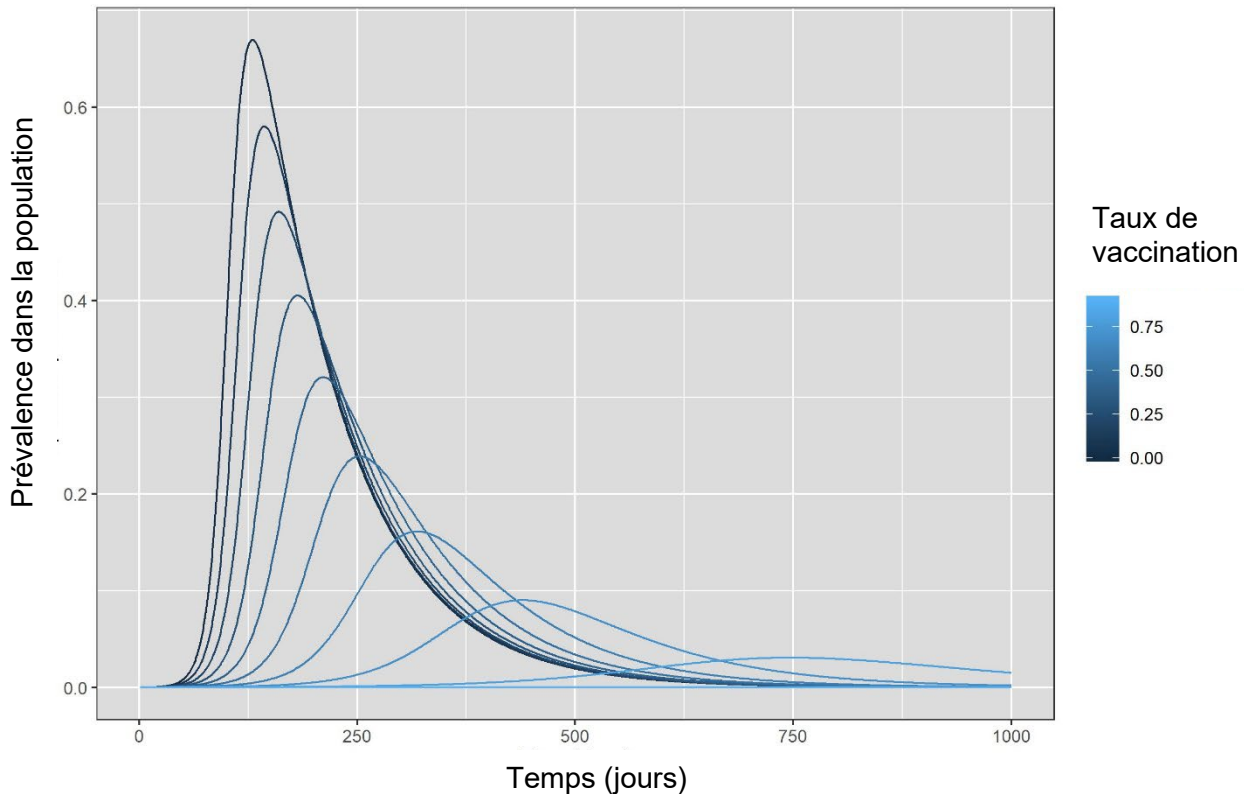


Figure 9 – Impact d’une vaccination unique avant l’exposition sur la prévalence dans la population.

Comme pour toutes les options de gestion des maladies, les stratégies de vaccination sont associées à certaines considérations de base qu’il faut prendre en compte, afin de déterminer si elles sont appropriées et de concevoir correctement les efforts de vaccination (Wobeser 1994). La première est la disponibilité d’un vaccin sûr et approprié pour les espèces sauvages. Un vaccin approprié doit stimuler une réponse immunitaire suffisante chez l’hôte pour assurer une protection contre l’infection ou la maladie et ne doit pas provoquer de maladie chez l’individu. De plus, l’idéal est que le vaccin soit efficace sur un large éventail d’espèces hôtes. Les vaccins qui offrent une protection contre l’infection sont préférés à ceux qui offrent une protection contre la maladie. Dans ce dernier cas, les animaux peuvent encore contribuer à l’infection de leurs congénères. Par conséquent, le vaccin peut être bénéfique pour l’individu, mais pas pour la population. Ainsi, les vaccins qui préviennent l’infection sont plus susceptibles de modifier le cours d’une épidémie, comme le montre ci-dessus notre modèle à compartiments simple. Cependant, si les individus ont une grande valeur (par exemple, les espèces dont la conservation est préoccupante), les vaccins qui préviennent les maladies peuvent toujours être utiles. De plus, les vaccins qui confèrent une protection à vie contre tous les sérotypes ou variétés de l’agent sont susceptibles d’être les plus efficaces pour gérer la maladie. Si une protection à vie n’est pas conférée, les individus sont capables de redevenir sensibles à l’agent et, par conséquent, les agents peuvent potentiellement envahir à nouveau la population. Il est également souhaitable que les animaux vaccinés puissent être différenciés des animaux infectés. Ceci est important pour surveiller l’intensité de la maladie, calculer le taux de vaccination et prévoir l’impact des efforts de contrôle. Il est également essentiel, si la vaccination est utilisée conjointement au retrait sélectif, de s’assurer que le retrait cible la bonne cohorte d’individus. Le vaccin doit également être stable et conserver son pouvoir immunogène dans les conditions de terrain où il sera administré. Enfin, le

vaccin doit être sûr pour les espèces non ciblées qui pourraient y être exposées directement ou indirectement.

Une autre considération importante est de savoir si le vaccin peut être administré de manière efficace. Les vaccins qui doivent être administrés directement et nécessitent un rappel sont susceptibles d'être moins utiles pour la faune sauvage que ceux qui peuvent être administrés passivement en une seule dose. Par exemple, les vaccins qui peuvent être administrés par voie orale, potentiellement par le biais d'appâts imprégnés, seront généralement plus utiles pour une utilisation à l'échelle d'une population que ceux dont le vaccin nécessite une manipulation directe ou une injection, en particulier si la manipulation nécessite plusieurs événements (c.-à-d. des vaccinations de rappel). La manipulation d'animaux sauvages peut s'avérer dangereuse, à la fois pour les animaux et pour la personne qui les manipule, ce qui peut entraîner des blessures ou des décès involontaires. Il est également important, si les vaccins sont administrés par voie orale (par exemple au moyen d'appâts), que ces derniers soient de taille appropriée pour leur consommation immédiate et intégrale par l'hôte, afin de garantir que l'animal reçoit la dose appropriée. Cela contribuera également à dissuader l'accumulation individuelle des appâts. Les vaccins qui peuvent être transférés de manière passive au sein de la population sont particulièrement utiles pour la faune sauvage, car le traitement d'une petite proportion de la population est nécessaire pour obtenir une immunité collective. Cette technologie est actuellement à l'étude pour être utilisée dans la prévention du syndrome du nez blanc et de la rage chez la chauve-souris (*Bakker et al. 2020*). Enfin, si le vaccin ne confère pas une immunité parfaite ou si l'immunité diminue, il faut en tenir compte pour déterminer quelle proportion de la population doit être vaccinée. Le seuil d'immunité doit en fait être multiplié par $\frac{1}{E}$, où E correspond à l'efficacité du vaccin (*Fine et al. 2011*).

L'évaluation des caractéristiques de l'agent peut également aider à déterminer si la vaccination est une option de gestion réalisable. Les maladies causées par des virus, des bactéries ou des protozoaires (c.-à-d. des microparasites) sont plus susceptibles de se prêter au développement et à l'application de vaccins que celles qui sont dues à des infections par des helminthes ou des arthropodes (c.-à-d. des macroparasites). La raison en est que le premier groupe d'agents pathogènes induit généralement une immunité durable après l'infection, tandis que le second a tendance à entraîner des infections persistantes et récurrentes, le niveau d'immunité étant en corrélation avec la charge parasitaire (*Wobeser 1994*). Par conséquent, l'immunité collective sera beaucoup plus difficile à atteindre lorsqu'il s'agit de macroparasites, car les individus peuvent redevenir sensibles après une infection. De plus, les agents qui évoluent lentement seront plus faciles à contrôler par la vaccination. Certains agents pathogènes, comme les virus de la grippe, évoluent rapidement, ce qui leur permet d'échapper aux défenses immunologiques de l'hôte. Le développement d'un vaccin contre ces agents peut s'avérer assez difficile, car il nécessitera probablement un perfectionnement continu pour être protecteur (par exemple, vaccin contre la grippe humaine). Le mode et les hétérogénéités de transmission peuvent également avoir des répercussions importantes sur l'efficacité des programmes de vaccination, la répartition spatiale requise des efforts de vaccination, ainsi que le moment et la durée des efforts à déployer. Cela signifie que si des modèles mathématiques sont utilisés pour guider les programmes de vaccination, ils doivent intégrer les aléas du ou des modes de transmission afin de saisir de manière appropriée la dynamique de la maladie et de mesurer avec précision les impacts de la vaccination (*Antonovics 2017*). Par exemple, dans le cas des pathogènes à taux de propagation élevé, il sera nécessaire de vacciner une plus grande proportion de la population et l'immunisation doit être rapide pour maximiser l'efficacité des efforts de contrôle. La gamme d'hôtes de l'agent est également d'une importance particulière pour la vaccination. Si le pathogène infecte plusieurs hôtes avec des caractéristiques de cycle de vie variables, il peut être difficile d'avoir un

programme de vaccination efficace car le vaccin doit être efficace et pouvoir être administré à toute une série d'espèces. De plus, immuniser certaines populations hôtes mais pas d'autres ne sera probablement pas efficace à long terme car il existera toujours des populations réservoirs susceptibles de servir de source d'infection pour tous les hôtes.

Comme toujours, les caractéristiques de la population hôte seront également importantes à prendre en compte lors de la planification des programmes de vaccination. L'âge moyen d'infection chez les hôtes déterminera le délai pendant lequel la vaccination sera administrée efficacement. Si l'infection survient tôt dans la vie de l'hôte, il se peut qu'il n'y ait pas suffisamment de temps pour vacciner les animaux avant qu'ils ne soient infectés. L'exemple le plus extrême de ce cas est lorsqu'une maladie est transmise verticalement de la mère au jeune, mais d'autres agents pathogènes qui infectent les jeunes peu après le déclin des anticorps maternels sont tout aussi problématiques à traiter par la vaccination. La taille et la structure de contact de la population hôte peuvent également déterminer l'efficacité de la vaccination. Par exemple, les grandes populations hôtes qui sont structurées dans l'espace (par exemple, les espèces territoriales) nécessiteront une réflexion approfondie sur l'étendue spatiale des efforts de vaccination et sur le niveau de vaccination nécessaire à chaque site local. De même, le taux d'ajout d'individus sensibles dans la population déterminera la proportion de la population qui devra être vaccinée. Les espèces qui ont des taux de reproduction élevés ou les populations qui connaissent des taux d'immigration élevés nécessiteront probablement plus d'efforts pour atteindre le seuil d'immunité en raison de l'afflux important d'individus sensibles (*Wobeser 1994*). La prédation peut également être un moteur important de la dynamique de la maladie et avoir un impact sur la faisabilité de la vaccination. Si la prédation se concentre sur les individus sensibles (par exemple, les jeunes), elle peut en réalité réduire le niveau de vaccination nécessaire. Cependant, si la prédation élimine de manière disproportionnée les animaux vaccinés, elle peut entraver les objectifs de la vaccination. Par exemple, dans les populations fortement chassées, il peut y avoir une sélection pour la chasse d'animaux plus âgés, qui sont plus susceptibles d'être vaccinés ou immunisés contre une infection passée.

Il existe également des considérations logistiques uniques lorsqu'il s'agit de concevoir et de mettre en œuvre un programme de vaccination. L'un de ces facteurs est le taux d'assimilation si le vaccin est administré de manière passive. Par exemple, si des appâts oraux sont utilisés pour la vaccination, les taux d'absorption par l'hôte focal ainsi que par les espèces non ciblées doivent être évalués afin de déterminer la bonne densité d'appâts à placer dans le paysage pour s'assurer de vacciner la proportion souhaitée de la population (*Tripp et al. 2014*). De plus, la durée de fonctionnement du programme de vaccination est essentielle. Dans certaines situations où il existe un risque persistant d'exposition, il est possible que des efforts de vaccination soient nécessaires dans un avenir prévisible. Les ressources et le personnel nécessaires doivent être disponibles pour soutenir les efforts de vaccination à long terme. Les jalons et les paramètres du succès doivent également être clairement établis, en particulier si un investissement à long terme dans le programme est prévu. Comme mentionné précédemment, cela signifie qu'il faut trouver un moyen de différencier les individus vaccinés de ceux qui se sont rétablis de l'infection. La façon dont le programme de vaccination sera appliqué dans l'environnement est également une question de conception importante. Souvent, il peut être difficile de vacciner dans l'environnement comme souhaité à cause de l'impossibilité d'accéder à certaines régions, en raison d'un terrain inhospitalier, de terres privées, d'une urbanisation étendue, etc. Ces contraintes doivent être prises en compte lors de la conception afin de garantir une couverture spatiale adéquate du vaccin, ou au minimum une délimitation des zones pouvant servir de sources d'infection en raison d'une vaccination inadéquate. Il doit également y avoir un moyen économique de fabriquer le vaccin et les composants associés nécessaires à la livraison (par exemple, l'appât) pour pouvoir mettre en œuvre le programme de vaccination à l'échelle requise. Ce point n'est pas une

considération anodine car si le vaccin est spécifique à un hôte sauvage, il se peut qu'il n'existe pas de source de matériel facilement disponible, ce qui signifie alors que les matériaux doivent être fabriqués par l'agence. Il peut s'agir d'une entreprise difficile et exigeante en ressources. Enfin, il existe probablement, selon le pays, de nombreux obstacles administratifs qui devront être franchis avant l'utilisation d'un vaccin utilisé dans la faune sauvage sur le terrain. Il s'agit notamment de démontrer la sécurité du vaccin pour les espèces non cibles. Il faut souvent des années pour qu'un vaccin soit approuvé pour une utilisation à grande échelle sur le terrain !

Sur le plan social, les programmes de vaccination sont souvent mieux acceptés que ceux mentionnés précédemment. Cela est probablement dû à la familiarité et à l'acceptation générale par le public de la vaccination pour promouvoir la santé humaine et des animaux domestiques, et à l'absence de retrait individuel des animaux avec cette option de gestion. Cependant, ils nécessitent également quelques considérations uniques. Par exemple, si des appâts doivent être distribués pour réaliser une vaccination orale, il est important d'informer le public de la région afin de le sensibiliser et d'empêcher le retrait ou l'ingestion des animaux, notamment par les enfants ou les animaux domestiques. De plus, il est essentiel d'éduquer le public sur la sécurité du vaccin pour l'espèce cible, mais aussi pour les espèces non-cibles comme les animaux domestiques. Le public peut également être un précieux allié pour la mise en œuvre de la vaccination. Par exemple, les chasseurs et les clubs de chasse peuvent être en mesure de distribuer des appâts oraux ou de participer aux efforts de capture des animaux. Enfin, comme pour les autres options de gestion décrites, l'élaboration et l'exécution d'un bon plan de communication qui tient le public et les décideurs au courant des objectifs et des résultats du programme sont essentielles, en particulier pour les programmes de vaccination à long terme.

Il existe quelques exemples de programmes de vaccination à grande échelle pour le contrôle des maladies de la faune sauvage. L'un d'entre eux est le programme de vaccination contre la peste sylvatique dans l'ouest des États-Unis. La peste sylvatique, causée par la bactérie *Yersinia pestis*, peut avoir des répercussions importantes sur les colonies de chiens de prairie (*Cynomys spp.*) et provoquer leur disparition à l'échelle locale. Les chiens de prairie sont une espèce clé dans les écosystèmes de prairies et sont la principale proie du putois d'Amérique (*Mustela nigripes*), une espèce en voie de disparition inscrite sur la liste fédérale. La peste menace la population de putois à la fois par la mortalité directe et indirectement par la réduction significative de leur stock de proies. Récemment, un vaccin oral a été développé et testé sur 29 sites dans l'ouest des États-Unis (Rocke et al. 2017). Le vaccin est un poxvirus recombinant de raton laveur, modifié pour exprimer deux antigènes protecteurs de *Y. pestis*, le F1 et une protéine V tronquée (Rocke et al. 2014). Le vaccin a été administré via un appât oral contenant du beurre de cacahuète comme attractif et 0,25 % de rhodamine B, un biomarqueur visible dans les poils, les moustaches et les excréments des animaux dans les 24 heures suivant la consommation. Le marqueur a été utilisé pour vérifier si l'individu avait consommé l'appât et reçu le vaccin. Il convient de noter qu'avant d'être utilisé à grande échelle, le vaccin a fait l'objet d'essais approfondis en matière de sécurité et d'efficacité avant de recevoir finalement l'agrément de l'USDA pour une utilisation expérimentale sur le terrain. En utilisant les informations issues de tests précédents (Tripp et al. 2014), les appâts ont été distribués sur les sites à un taux de 100/ha. Sur chaque site, il y avait des parcelles de traitement et de contrôle appariées. Les parcelles de contrôle n'ont reçu que des appâts placebo tandis que les sites de traitement ont été traités avec des appâts contenant le vaccin. Les individus ont été piégés et un plan de marquage-recapture a été utilisé pour évaluer la survie. Cette approche expérimentale a été réalisée pour évaluer l'efficacité du vaccin. Les résultats de ce programme de vaccination ont démontré que les indices d'abondance étaient plus élevés sur les sites vaccinés, tandis que sur les sites où la peste est survenue au cours de l'étude, la survie apparente était plus faible sur les sites qui avaient reçu les appâts placebo (Rocke et al. 2017). Ces résultats ont indiqué l'efficacité du vaccin à fournir une protection au moins partielle

aux chiens de prairie contre la peste. Ils ont également donné l'impulsion nécessaire pour commencer l'application à grande échelle de la vaccination dans l'ensemble de l'habitat du putois d'Amérique en 2019 avec la distribution d'un million d'appâts sur environ 8 000 ha. Afin de faciliter ce programme de vaccination, une entreprise privée a été engagée pour produire de grandes quantités d'appâts. En outre, des progrès technologiques ont été réalisés pour distribuer efficacement les appâts, ce qui était auparavant effectué à la main. Ces progrès comprenaient notamment le développement de dispositifs de distribution fonctionnant avec des drones et des véhicules tout-terrain. Ce programme de vaccination fournit un bon exemple de plusieurs des considérations que nous avons décrites et de la façon de surmonter plusieurs des défis liés à l'élaboration de programmes de vaccination de la faune sauvage.

Un autre exemple de programme de vaccination réussi dans la faune sauvage est l'utilisation de la vaccination orale pour contrôler la rage chez les animaux sauvages. La rage est une zoonose très répandue causée par des virus à ARN du genre *Lyssavirus*, de la famille des *Rhabdoviridae*. Cette maladie est largement répandue sur la plupart des continents et se trouve généralement chez les espèces mésocarnivores qui peuvent servir de source d'infection pour les animaux domestiques et les humains. Les efforts de vaccination contre la rage ont une longue histoire qui remonte aux années 1970. Le vaccin actuellement utilisé est un vaccin à vecteur viral de la vaccine, recombinant et atténué. Il existe actuellement deux appâts vaccinaux oraux produits commercialement et recommandés par l'Organisation mondiale de la santé (*Maki et al. 2017*). Nous allons parler du vaccin RABORAL V-RG®, mais cela ne constitue pas une approbation de ce produit. Il s'agit plutôt du produit pour lequel des informations détaillées sont facilement disponibles et qui est largement utilisé (avec plus de 250 millions d'appâts distribués dans le monde). Des tests approfondis ont été effectués pour garantir la sécurité, la stabilité et l'efficacité de ce vaccin (*Maki et al. 2017*). Le vaccin est administré par le biais d'appâts oraux, qui sont composés de farine et/ou d'huile de poisson. Les appâts sont distribués dans l'environnement par voie aérienne, par appâtage manuel ou dans des stations d'appâtage, selon l'espèce et le pays concernés. L'appât comprend un marqueur de tétracycline afin de permettre la détection des individus qui l'ont consommé. Les campagnes de vaccination orale à grande échelle ont permis de contrôler la rage dans le monde entier. Elles ont par exemple été utilisées avec succès en France, en Belgique et au Luxembourg pour éliminer la rage chez le renard roux (*Vulpes vulpes*). Elles ont également été utilisées en Ukraine pour combattre la rage chez le renard ainsi qu'en Israël pour contrôler la rage chez le renard roux et le chacal doré (*Canis aureus*). En Amérique du Nord, de vastes programmes de vaccination orale à long terme ont été menés pour contrôler et limiter avec succès la propagation de la rage chez le raton laveur (*Procyon lotor*), la mouffette (*Meles mephitis*), le coyote (*Canis latrans*), le renard roux et le renard gris (*Urocyon cinereoargenteus* ; *Maki et al. 2017*). La réussite des programmes de vaccination contre la rage chez les animaux sauvages ne fait aucun doute. Ce succès a nécessité des efforts et des ressources considérables, non seulement lors du développement du vaccin, mais également pendant le déploiement sur le terrain, où l'optimisation de l'absorption pour diverses espèces a fait l'objet d'études approfondies. Ainsi, il est clair que la vaccination peut être un outil précieux pour gérer les maladies de la faune sauvage lorsque les ressources et la volonté sociétale de la mettre en place sont soutenues ; les campagnes de vaccination orale contre la rage à travers le monde comptent probablement encore parmi les meilleurs exemples de contrôle des maladies de la faune sauvage grâce aux programmes de vaccination.

En conclusion, les programmes de vaccination peuvent être des outils puissants et efficaces pour contrôler les maladies chez les espèces d'animaux sauvages. Ils bénéficient généralement du soutien du public et ne nécessitent pas de retirer d'animaux. Cependant, leur utilisation chez les animaux sauvages peut s'avérer difficile pour les raisons suivantes : nécessité de développer souvent des vaccins sur mesure sûrs et stables, charge réglementaire associée, nécessité de

développer une méthode d'administration efficace, délai souvent important avant la disponibilité des vaccins pour une utilisation sur le terrain et nécessité de maintenir souvent des engagements à long terme pour leur application dans une population. Ainsi, les programmes de vaccination présentent un grand potentiel, mais ils ne sont pas toujours la bonne solution à tous les problèmes de maladies de la faune sauvage.

Combinaison d'outils

Nous avons décrit un ensemble d'outils qui peuvent être utiles pour gérer les maladies de la faune sauvage. Nous avons également essayé de détailler, bien que partiellement, des considérations importantes associées à l'application de chaque technique. Il arrive souvent que ces outils puissent être utilisés conjointement pour gérer plus efficacement la maladie de la faune sauvage en question. Par exemple, les programmes d'abattage sélectif et de vaccination peuvent être plus efficaces lorsqu'ils sont appliqués simultanément que lorsque chacun est utilisé isolément. Par conséquent, lorsqu'on tente de gérer un problème de maladie de la faune sauvage, il est utile non seulement d'évaluer la série d'actions potentielles, mais également d'examiner si certaines peuvent être appliquées en synergie pour obtenir de meilleurs résultats.

Un excellent exemple récent de l'utilisation de plusieurs outils pour la gestion des maladies de la faune sauvage est celui des mesures de gestion prises pour contrôler la maladie débilitante chronique (MDC) des cervidés en Norvège. En 2016, la MDC a été détectée chez des rennes (*Rangifer tarandus*) et des élans (*Alces alces*) sauvages en Norvège. L'infection chez les rennes était particulièrement perturbante, car la Norvège gère les derniers spécimens de renne sauvage de la toundra en Europe (*Benestad et al. 2016*). En réponse, les agences de gestion ont adopté une approche agressive pour s'attaquer à ce problème. Dans une tentative d'éradication de la MDC classique en Norvège, les autorités compétentes, en recourant à la chasse et à l'abattage par les agences, ont éliminé la totalité du troupeau de rennes sauvages de la région touchée, près de Nordfjella, où le premier cas de MDC a été détecté. Cela a consisté à éliminer environ 2 000 animaux, dont 19 ont été testés positifs à la MDC. À présent, l'intention est de laisser la zone en jachère pendant au moins 5 ans avant de réintroduire les rennes. Pendant ce temps, les efforts viseront à minimiser l'utilisation de la zone affectée par les populations d'autres espèces d'ongulés grâce à des programmes d'abattage. En outre, l'accès à près de 660 pierres à lécher, suspectées de poser un risque de transmission de prions, a été bloqué par l'utilisation de clôtures, afin d'empêcher leur utilisation par les ongulés sauvages tout en permettant aux moutons domestiques d'y accéder. Le gouvernement a également construit > 24 km de clôtures pour restreindre l'accès des ongulés sauvages et semi-domestiques à la région touchée. Enfin, le gouvernement maintient un vaste programme de surveillance ciblée de la MDC dans l'ensemble du pays afin de surveiller la maladie et de mesurer le succès des efforts de contrôle (*VKM 2017*).

L'exemple ci-dessus montre l'utilisation de plusieurs outils et méthodes pour tenter d'éradiquer une maladie de la faune sauvage. L'abattage, la chasse, la réduction de la densité, l'installation de clôtures et de vastes efforts de communication ont tous été des éléments importants des efforts de lutte contre la MDC en Norvège. Bien qu'il reste à voir si ce style de gestion agressif réussira à éradiquer la maladie, il y a beaucoup à apprendre des succès et des échecs de ces actions.

Tableau 4. Exemple d'évaluation de l'application de deux outils de gestion pour manipuler la distribution des hôtes.

ÉVALUATION DE L'ACTION DE GESTION				
CLÉ				
	action de gestion adaptée			
	action de gestion non affectée ou équivoque			
AI	représente un défi pour l'action de gestion			
Modification de la distribution				
Caractéristiques des compartiments		Résultat	Dispersion	Utilisation de clôtures
<i>Agent</i>	Endémique	Oui		
		Non		
	Nouveau pour le système	Oui		
		Non		
	Localisé	Oui		
		Non		
	Urgence médiée par l'environnement	Oui		
		Non		
	Transmission par vecteur	Oui		
		Non		
	Transmission directe	Oui		
		Non		
	Transmission indirecte	Oui		
		Non		
	Transmission/propagation assistée par l'Homme	Oui		
		Non		
	Affecte plusieurs hôtes	Oui		
		Non		
	Taux de transmission	Élevé		
		Faible		
Effets saisonniers	Oui			
	Non			
<i>Hôte</i>	Grande population	Oui		
		Non		
	Migrateur	Oui		
		Non		
	Mobile	Oui		
		Non		
	Facile à endormir	Oui		
		Non		
	Interactions interspécifiques	Oui		
		Non		
	Animal de troupeau ou vivant en grands groupes	Oui		
		Non		
	Défis comportementaux pour les clôtures	Oui		
		Non		
	Petite taille	Oui		
		Non		
	Interactions potentielles avec des animaux	Oui		
		Non		
	Structure sociale complexe	Oui		
		Non		
Conservation préoccupante	Oui			
	Non			

Tableau 4. Suite

<i>Environnement</i>	La gestion aura un impact sur les espèces non cibles	Oui		
		Non		
	Modification de l'habitat nécessaire	Oui		
		Non		
	Habitat disponible en dehors de la zone affectée	Oui		
		Non		
	L'environnement sert de source ponctuelle ou de réservoir	Oui		
		Non		
	Accessible pour la gestion	Oui		
		Non		
<i>Logistique</i>	Impacts à long terme sur la structure	Oui		
		Non		
	Ressources disponibles pour une application/maintenance à long terme	Oui		
		Non		
	Infrastructure humaine dans la région	Oui		
		Non		
	Mise en œuvre rapide nécessaire	Oui		
		Non		
<i>Social</i>	Autres outils de contrôle disponibles	Oui		
		Non		
	Disponibilité de l'expertise nécessaire	Oui		
		Non		
	Le public est au courant des actions de gestion	Oui		
		Non		
	Le public est résistant à la gestion	Oui		
		Non		
	Des plans de communication peuvent être élaborés	Oui		
		Non		
	Existence d'un soutien politique	Oui		
		Non		
Intérêts du bétail dans la gestion	Oui			
	Non			
Problèmes de santé humaine	Oui			
	Non			
Groupes d'intérêts spéciaux devant être engagés	Oui			
	Non			

<i>Environment</i>	Management will impact non-target species	Yes	👎	👎
		No	👍	👍
	Habitat alteration necessary	Yes	👎	👎
		No	👍	👍
	Available habitat outside affected area	Yes	👍	👍
		No	👎	👎
	Environment serves as point source or reservoir	Yes	👍	👍
		No	👎	👎
	Accessible for management	Yes	👍	👍
		No	👎	👎
<i>Logistics</i>	Long-term impacts on structure	Yes	👎	👎
		No	👍	👍
	Resources available for long-term application/maintenance	Yes	👎	👍
		No	👎	👎
	Human infrastructure in the region	Yes	👎	👎
		No	👍	👍
	Needs to be implemented rapidly	Yes	👍	👎
		No	👎	👍
	Other control tools available	Yes	👎	👎
		No	👍	👍
<i>Social</i>	Necessary expertise available	Yes	👍	👍
		No	👎	👎
	Public is aware of management actions	Yes	👍	👍
		No	👎	👎
	Public is resistant to management	Yes	👎	👎
		No	👍	👍
	Communications plans can be developed	Yes	👍	👍
		No	👎	👎
	Political support exists	Yes	👍	👍
		No	👎	👎
<i>Social</i>	Livestock interests in management	Yes	👎	👍
		No	👍	👍
	Human health concerns	Yes	👎	👎
		No	👍	👍
	Special interest groups that need to be engaged	Yes	👎	👎
		No	👍	👍

RÉFÉRENCES

1. Alderman, D.J. 1996. Geographical spread of bacterial and fungal diseases of crustaceans. *Revue Scientifique et Technique* 15:603-632. <https://doi.org/10.20506/rst.15.2.943>.
2. Amman, B.R., L. Nyakarahuka, A.K. McElroy, K.A. Dodd, T.K. Sealy, A.J. Schuh, T.R. Shoemaker, S. Balinandi, P. Atimnedi, W. Kaboyo, S.T. Nichol, and J.S. Towner. 2014. Marburgvirus resurgence in Kitaka Mine bat population after extermination attempts, Uganda. *Emerging Infectious Diseases* 20:1761-1764. <https://doi.org/10.3201/eid2010.140696>.
3. Antonovics, J. 2017. Transmission dynamics: critical questions and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 372:20160087. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0087>.
4. Barnes, A.M. 1982. Surveillance and control of bubonic plague in the United States. Pages 237-270 in Edwards, M.A. and U. McDonnell (eds). *Animal Disease in Relation to Animal Conservation*. Academic Press, London.
5. Bakker K.M, T.E. Rocke, J.E. Osorio, R.C. Abbott, C. Tello, J.E. Carrera, W. Valderrama, C. Shiva, N. Falcon, and D.G. Streicker. 2019. Fluorescent biomarkers demonstrate prospects for spreadable vaccines to control disease transmission in wild bats. *Nature Ecology & Evolution* 3:1697-1704. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1032-x>.
6. Bechert, U. 2012. Noninvasive techniques to assess health and ecology of wildlife populations. Pages 60-70 *dans* Miller, R.E. and M.E. Fowler, M.E. (eds.). *Fowler's Zoo and Wild Animal Medicine: Current Therapy*. Elsevier Saunders, St. Louis, MO.
7. Benestad, S.L., G. Mitchell, M. Simmons, B. Ytrehus, and T. Vikøren. 2016. First case of chronic wasting disease in Europe in a Norwegian free-ranging reindeer. *Veterinary Research* 47:88. <https://doi.org/10.1186/s13567-016-0375-4>.
8. Bienen, L. and G. Tabor. 2006. Applying an ecosystem approach to brucellosis control: can an old conflict between wildlife and agriculture be successfully managed? *Frontiers in Ecology and the Environment* 4:319-327. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2006\)4\[319:AAEATB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)4[319:AAEATB]2.0.CO;2).
9. Blanchong J.A., S.J. Robinson, M.D. Samuel, and J.T. Foster. 2016. Application of genetics and genomics to wildlife epidemiology. *Journal of Wildlife Management* 80:593-608. <https://doi.org/10.1002/jwmg.1064>.
10. Bode, M. and B. Wintle. 2010. How to build an efficient conservation fence. *Conservation Biology* 24:182-188. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01291.x>.
11. Campbell, T.W. 1996. Clinical pathology. Pages 248-257 *dans* Mader, D.R. (ed.). *Reptile Medicine and Surgery*. W.B. Sanders Company, Philadelphia, PA.
12. Cheng, T.L., S.M. Rovito, D.B. Wake, and V.T. Vredenburg. 2011. Coincident mass extirpation of neotropical amphibians with the emergence of the infectious fungal pathogen

Batrachochytrium dendrobatidis. Proceedings of the National Academy of Sciences 108:9502-9507. <https://doi.org/10.1073/pnas.1105538108>.

13. Cotterill, C.G, P.C. Cross, E.K. Cole, R.K. Fuda, J.D. Rogerson, B.M. Scurlock, and J.T. du Toit. 2018. Winter feeding of elk in the Greater Yellowstone Ecosystem and its effects on disease dynamics. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 373:20170093. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0093>.
14. Dowdle, W.R. 1998. The principles of disease elimination and eradication. Bulletin of the World Health Organization 76:22-25.
15. Fine, P., K. Eames, and D.L. Heymann. 2011. "Herd immunity": a rough guide. Clinical Infectious Diseases 52:911-916. <https://doi.org/10.1093/cid/cir007>.
16. Friend, M. and J.C. Franson. 1999a. Chapitre 4 : Disease control operations. Pages 19-48 dans Friend, M. and J.C. Franson (eds.). Field Manual of Wildlife Diseases. Biological Resources Division. Information and Technology Report 1999-001. https://pubs.usgs.gov/itr/1999/field_manual_of_wildlife_diseases.pdf.
17. Friend, M. and J.C. Franson. 1999b. Chapitre 38 : Avian botulism. Pages 271-282 dans Friend, M. and J.C. Franson (eds.). Field Manual of Wildlife Diseases. Biological Resources Division. Information and Technology Report 1999-001. https://pubs.usgs.gov/itr/1999/field_manual_of_wildlife_diseases.pdf.
18. Galimand, M, A. Guiyoule, G. Gerbaud, B. Rasoamanana, S. Chanteau, E. Carniel, and P. Courvalin. 1997. Multidrug resistance in *Yersinia pestis* mediated by transferable plasmid. New England Journal of Medicine 337:677-681. <https://doi.org/10.1056/NEJM199709043371004>.
19. Garwood, T., C.P. Lehman, D.P Walsh, E.F. Cassirer, T.E. Besser, and J.A. Jenks. 2020. Removal of chronic *Mycoplasma ovipneumoniae* carrier ewes eliminates pneumonia in a bighorn sheep population. Ecology and Evolution 00:1-12. <https://doi.org/10.1002/ece3.6146>.
20. Gire, S.K., A. Goba, K.G. Andersen, R.S. Sealfon, D.J. Park, L. Kanneh, S. Jalloh, M. Momoh, M. Fullah, G. Dudas, et al. 2014. Genomic surveillance elucidates Ebola virus origin and transmission during the 2014 outbreak. Science 345:1369-1372. <https://doi.org/10.1126/science.1259657>.
21. Hudson, P.J., D. Newborn, and A.P. Dobson. 1992. Regulation and stability of a free-living host-parasite system: *Trichostrongylus tenuis* in red grouse. I. Monitoring and parasite reduction experiments. Journal of Animal Ecology 61:477-486. <https://doi.org/10.2307/5338>.
22. Hyde, J. 2007. Drug-resistant malaria – an insight. FEBS Journal 274:4688-4698. <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2007.05999.x>.
23. Koneman, E.W., S.D. Allen, W.M. Janda, P.C. Schreckenberger, and W.C. Winn, Jr. (eds.). 1997. Color Atlas and Textbook of Diagnostic Microbiology (5th edition). Lipincott Williams & Wilkins, Hagerstown, MD.

24. Lachish, S., H. McCallum, D. Mann, C.E. Pukk, and M.E. Jones. 2010. Evaluation of selective culling of infected individuals to control Tasmanian devil facial tumor disease. *Conservation Biology* 24:841-851. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01429.x>.
25. Lam, T.T. and O.G. Pybus. 2018. Genomic surveillance of avian-origin influenza A viruses causing human disease. *Genome Medicine* 10:50. <https://doi.org/10.1186/s13073-018-0560-3>.
26. le Roex, N., D. Cooper, P.D. van Helden, E.G. Hoal, and A.E. Jolles. 2016. Disease control in wildlife: evaluating a test and cull programme for bovine tuberculosis in African buffalo. *Transboundary and Emerging Diseases* 63:647-657. <https://doi.org/10.1111/tbed.12329>.
27. Leendertz, F.H., G. Pauli, K. Maetz-Rensing, W. Boardman, C. Nunn, H. Ellerbrok, S.A. Jensen, S. Junglen, and C. Boesch, C. 2006. Pathogens as drivers of population declines: the importance of systematic monitoring in great apes and other threatened mammals. *Biological Conservation* 131:325-337. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.05.002>.
28. Maki, J., A. Guiot, M. Aubert, B. Brochier, F. Cliquet, C.A. Hanlon, R. King, E.H. Oertli, C.E. Rupprecht, C. Schumacher, D. Slate, B. Yakobson, A. Wohlers, and E.W. Lankau. 2017. Oral vaccination of wildlife using a vaccinia-rabies-glycoprotein recombinant virus vaccine (RABORAL V-RG®): a global review. *Veterinary Research* 48:57. <https://doi.org/10.1186/s13567-017-0459-9>.
29. Manjerovic, M.B., M.L. Green, N. Mateus-Pinilla, and J. Novakofski. 2014. The importance of localized culling in stabilizing chronic wasting disease prevalence in white-tailed deer populations. *Preventive Veterinary Medicine* 113:139-145. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2013.09.011>.
30. McDonald R.A, R.J. Delahay, S.P. Carter, G.C. Smith, and C.L. Cheeseman. 2008. Perturbing implications of wildlife ecology for disease control. *Trends in Ecology and Evolution* 23:53-56. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.011>.
31. Myserud, A. and C.M. Rolandsen. 2019. Fencing for wildlife disease control. *Journal of Applied Ecology* 56:519-525. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13301>.
32. Nettles, V.G., J.H. Shaddock, R.K. Sikes, and C.R. Reyes. 1979. Rabies in translocated raccoons. *American Journal of Public Health* 69:601-602. <https://dx.doi.org/10.2105%2Fajph.69.6.601>.
33. Nicholson, J. and J. Lindon. 2008. Metabonomics. *Nature* 455:1054-1056. <https://doi.org/10.1038/4551054a>.
34. Plowright, R.K., K.R. Manlove, T.E. Besser, D.J. Páez, K.R. Andrews, P.E. Matthews, L.P. Waits, P.J. Hudson, and E.F. Cassirer. 2017. Age-specific infectious period shapes dynamics of pneumonia in bighorn sheep. *Ecology Letters* 20:1325-1336. <https://doi.org/10.1111/ele.12829>.
35. Prentice, J.C., N.J. Fox, M.R. Hutchings, P.C.L. White, R.S. Davidson, and G. Marion. 2019. When to kill a cull: factors affecting the success of culling wildlife for disease control. *Journal of the Royal Society Interface* 16: 2018090. <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0901>.

36. Rocke T.E., B. Kingstad-Bakke, W. Berlier, and J.E. Osorio. 2014. A recombinant raccoon poxvirus vaccine expressing both *Yersinia pestis* F1 and truncated V antigens protects animals against lethal plague. *Vaccines* 2:772-784. <https://doi.org/10.3390/vaccines2040772>.
37. Rocke, T.E., D.W. Tripp, R.E. Russell, R.C. Abbott, K.L.D. Richgels, M.R. Matchett, D.E. Biggins, R. Griebel, G. Schroeder, S.M. Grassel, et al. 2017. Sylvatic plague vaccine partially protects prairie dogs (*Cynomys* spp.) in field trials. *EcoHealth* 14:438-450. <https://doi.org/10.1007/s10393-017-1253-x>.
38. Rust, M.K. 2016. Insecticide resistance in fleas. *Insects* 7:10. <https://doi.org/10.3390/insects7010010>.
39. Streicker D.G., S. Recuenco, W. Valderrama, J. Gomez Benavides, I. Vargas, V. Pacheco, R.E. Condori, J. Montgomery, C.E. Rupprecht, P. Rohani, and S. Altizer. 2012. Ecological and anthropogenic drivers of rabies exposure in vampire bats: implications for transmission and control. 2012. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279:3384-3392. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.0538>.
40. Tanner, E., A. White, P. Acevedo, A. Balseiro, J. Marcos, and C. Gortázar. 2019. *Scientific Reports* 9:7940 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44148-9>.
41. Thomson, G.R., M.L. Penrith, M.W. Atkinson, S.J. Atkinson, D. Cassidy, and S.A. Osofsky. 2013. Balancing livestock production and wildlife conservation in and around southern Africa's transfrontier conservation areas. *Transboundary Emerging Diseases* 60:492-506. <https://doi.org/10.1111/tbed.12175>.
42. Tripp D.W., T.E. Rocke, S.P. Streich, N.L. Brown, and J. Ramos. 2014. Season and application rates affect vaccine bait consumption by prairie dogs. *Journal of Wildlife Diseases* 50:224-34. <https://doi.org/10.7589/2013-04-100>.
43. Tuytens F.A.M., D.W. Macdonald., L.M. Rogers, C.L. Cheeseman, and A.W. Roddam. 2000. Comparative study on the consequences of culling badgers (*Meles meles*) on biometrics, population dynamics and movement. *Journal of Animal Ecology* 69:567-580. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.2000.00419.x>.
44. Vantassel, S.M. and M.A. King. 2018. *Wildlife Carcass Disposal. Wildlife Damage Management Technical Series. USDA, APHIS, WS National Wildlife Research Center. Fort Collins, Colorado.* <http://digitalcommons.unl.edu/nwrcwdmts/19>.
45. VKM, Norwegian Scientific Committee for Food Safety. 2017. Report from the Norwegian Scientific Committee for Food Safety (VKM) 2017:9.
46. Waits, L.P. and D. Paetkau. 2005. Noninvasive genetic sampling tools for wildlife biologists: a review of applications and recommendations for accurate data collection. *Journal of Wildlife Management* 69:1419-1433. [https://doi.org/10.2193/0022-541X\(2005\)69\[1419:NGSTFW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0022-541X(2005)69[1419:NGSTFW]2.0.CO;2).
47. White, C.L., H.S. Ip, C.U. Meteyer, D.P. Walsh, J.S. Hall, M. Carstensen, and P.C. Wolf. 2015. Spatial and temporal patterns of avian paramyxovirus-1 outbreaks in double-crested

- cormorant (*Phalacrocorax auritus*) in the USA. *Journal of Wildlife Diseases* 51:101-112. <https://doi.org/10.7589/2014-05-132>.
48. Wobeser, G.A. 1994. *Investigation and Management of Disease in Wild Animals*. Plenum Press, New York, NY.
49. Wobeser, G. 2004. Disease management strategies for wildlife. *Revue Scientifique et Technique* 21:159-178. <https://doi.org/10.20506/rst.21.1.1326>.
50. Woods G.M., S. Fox, A.S. Flies, C.D. Tovar, M. Jones, R. Hamede, D. Pemberton, A.B. Lyons, S.S. Bettiol. 2018. Two decades of the impact of Tasmanian devil facial tumor disease. *Integrative and Comparative Biology* 58:1043-1054. <https://doi.org/10.1093/icb/icy118>
51. World Health Organization (WHO). 2008. *Anthrax in Humans and Animals* (4th edition). World Health Organization, Genève. ISBN 9789241547536. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK310486/>.

