

## COMMENT ESTIMER LE NOMBRE DE DOSES D'UN VACCIN À AVOIR EN STOCK POUR COMBATTRE UNE MALADIE EXOTIQUE SI CELLE-CI DEVAIT ÊTRE INTRODUE DANS UN PAYS INDEMNE ? \*

Casal Jordi<sup>1,2,9</sup>, Saegerman Claude<sup>3,9</sup>, Bertagnoli Séphane<sup>4</sup>, Meyer Gilles<sup>4,9</sup>, Ganière Jean-Pierre<sup>5,9</sup>,  
Caufour Philippe<sup>6</sup>, De Clercq Kris<sup>7</sup>, Jacquet Philippe<sup>4</sup>, Hautefeuille Claire<sup>8</sup>,  
Étore Florence<sup>8</sup> et Napp Sebastian<sup>2</sup>



### RÉSUMÉ

Le virus de la dermatose nodulaire contagieuse (VDNC) est un virus à ADN appartenant à la famille des *Poxviridae* et au genre *Capripoxvirus*. La DNC est une maladie transfrontalière hautement contagieuse chez les bovins qui entraîne des pertes économiques importantes. La maladie a été signalée pour la première fois en 2014 dans l'Union européenne (à Chypre), puis en Grèce l'année suivante. En 2016, elle s'est propagée dans différents pays des Balkans. Une méthode stochastique simple pour estimer la taille d'une banque de vaccins est présentée. Elle a été appliquée à l'arrivée hypothétique d'une épizootie de la DNC en France. La taille du stock de vaccins a été calculée en tenant compte de trois paramètres qui sont la diffusion spatiale de la maladie, le temps nécessaire pour obtenir une bonne couverture vaccinale de la population d'intérêt et la densité du bétail dans la région où l'épizootie démarre. Les résultats ont été comparés à un modèle plus raffiné et validé, utilisé comme méthode de référence. Les différences entre le modèle simplifié et le modèle raffiné dans différents scénarios envisagés varient de 7 % à 10,5 % de plus de vaccins dans la méthode simple par rapport à la méthode raffinée pour couvrir 90 % des simulations et de 9,0 % à 13,8 % pour 75 % des simulations. En supposant une période nécessaire de sept semaines pour vacciner tous les animaux, et une propagation de la maladie de 7,3 km/semaine, le nombre de bovins serait de 740 716 têtes ou moins, pour 90 % des simulations (608 196 pour 75 % des simulations). Le modèle simplifié est facile à utiliser et à adapter à différentes maladies et pays et ne nécessite pas beaucoup de données pour fonctionner.

**Mots-clés :** dermatose nodulaire contagieuse (DNC), bovins, diffusion, vaccination, France, modèle stochastique, maladie exotique, prévention.

.../..

Article reçu le 25 novembre 2018 ; accepté le 4 décembre 2018

\* Texte de la communication présentée au cours de la Journée scientifique AEEMA, 1<sup>er</sup> juin 2018

<sup>1</sup> Departament de Sanitat i Anatomia Animals. Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Barcelona, Espagne

<sup>2</sup> IRTA, Centre de Recerca en Sanitat Animal (CRESA, IRTA-UAB), Bellaterra, Barcelona, Espagne

<sup>3</sup> Unité de Recherche en épidémiologie et analyse de risques appliquées aux sciences vétérinaires (UREAR-ULg), Fundamental and Applied Research for Animals and Health (FARAH) Center, Université de Liège, Belgique

<sup>4</sup> École nationale vétérinaire de Toulouse, INRA UMR1225 IHAP, Université de Toulouse, France

<sup>5</sup> ONIRIS, Nantes, France

<sup>6</sup> CIRAD, Montpellier, France

<sup>7</sup> CODA-CERVA, Bruxelles, Belgique

<sup>8</sup> Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), Maisons-Alfort, France

<sup>9</sup> Membre du Comité d'experts spécialisé en Santé et bien-être animal, Anses

Correspondance : [Jordi.casal@uab.cat](mailto:Jordi.casal@uab.cat)

.../..

**ABSTRACT**

*The lumpy skin disease (LSD) virus is a DNA virus belonging to the family Poxviridae and the genus Capripoxvirus. LSD is a highly contagious transboundary disease in cattle that causes significant economic losses. The disease was reported for the first time during the year 2014 in the European Union, (Cyprus, and next year in Greece. In 2016, it spread to different Balkan countries. A simple stochastic method for estimating the size of a vaccine bank is presented. It was applied to the hypothetical introduction of an epizootic of the LSD in France. The size of the vaccine bank was calculated taking into account three parameters which are the spatial spread of the disease, the time needed to obtain a good vaccination coverage of the population of interest and the density of the livestock in the region where the epizootic starts. The results were compared to a more refined and validated model, used as a reference method. The differences between the simplified model and the refined model in different scenarios considered vary from 7.0% to 10.5% more vaccines in the simple method compared to the refined method to cover 90% of the simulations and 9.0% to 13.8% for 75% of the simulations. Assuming a necessary 7 week period to vaccinate all animals, and a disease spread of 7.3 km/week, the number of cattle would be 740,716 heads or less for 90% of the simulations (608,196 for 75% simulations). The simplified model is easy to use and adapt to different diseases and countries and does not require many data to work.*

**Keywords:** Lumpy skin disease (LSD), Cattle, Spread, Vaccination, France, Stochastic modelling, Exotic disease, Prevention.




---

**I - INTRODUCTION**


---

Les autorités vétérinaires nationales de tous les pays se préoccupent beaucoup de la préparation à l'introduction d'une maladie exotique. En effet, une réponse efficace et rapide à la suite de l'introduction d'une nouvelle maladie peut permettre une réduction importante du coût de la maladie en raison du nombre réduit d'animaux qui seraient affectés et d'une possible éradication précoce de la maladie. Ce dernier aspect est d'une importance capitale pour réduire les restrictions commerciales dues à l'introduction de maladies transfrontalières, en particulier pour les pays qui exportent un grand nombre d'animaux comme la France.

La préparation comprend différents aspects tels que la surveillance, la mise en place de mesures préventives (notamment aux frontières), l'élaboration de plans d'urgence et le stockage de tout le matériel éventuellement nécessaire en cas de crise sanitaire. Les vaccins sont l'un des produits à stocker afin d'assurer un contrôle rapide de certaines maladies exotiques. Initialement, les

banques de vaccins étaient composées de réserves de vaccins en vrac prêts à être utilisés. Elles ont ensuite évolué pour stocker des antigènes inactivés concentrés dans de l'azote liquide, ce qui permet de disposer de vaccins prêts à être utilisés rapidement [De Clercq *et al.*, 2008].

Plusieurs pays et groupes de pays ont des banques de vaccins, d'antigènes concentrés ou de produits similaires différents. A titre d'exemple, pour la fièvre aphteuse, on dénombre 16 banques de vaccins, dont 12 nationales et 4 autres opérant sur une base internationale [Forman et Garland, 2002]. L'Union européenne (UE) dispose également d'une banque de vaccins pour le contrôle de la peste porcine classique (PPC). L'Organisation mondiale de la santé animale (OIE) possède une vaste expérience dans la gestion des banques de vaccins pour différentes maladies. Ainsi, en octobre 2017, l'OIE avait 3 banques de vaccins opérationnelles (pour la rage en Afrique et en Asie, la fièvre aphteuse en Asie du Sud-Est et la peste des petits ruminants (PPR) en Afrique de l'Ouest) [OIE, 2018].

La vaccination en anneau est une mesure de contrôle utile en cas d'apparition d'une maladie exotique. Elle a été appliquée dans différents pays pour lutter contre la fièvre aphteuse [Muleme *et al.*, 2013] ou la PPC. Pour la dermatose nodulaire contagieuse (DNC) en Irak, la vaccination a concerné également tous les troupeaux situés dans un rayon de 10 km autour des foyers [Al-Salihi et Hassan, 2015]. Dans certains cas, comme lors de l'épizootie de grippe équine en Australie en 2007, la zone a été modifiée pour tenir compte des conditions locales [Perkins *et al.*, 2011].

L'objectif de cet article est de décrire une méthode simple pour estimer la taille d'une banque de vaccins nécessaire pour gérer une campagne de vaccination d'urgence en cas d'introduction d'une maladie exotique donnée dans un pays donné. La méthode a été appliquée pour évaluer le nombre de vaccins à stocker pour lutter contre une épizootie de DNC en France métropolitaine. Ensuite, cette méthode simple a été validée en utilisant une méthodologie plus complexe.

---

## II - MATÉRIEL ET MÉTHODE

---

### 1. DERMATOSE NODULAIRE CONTAGIEUSE

La DNC est due à un virus de la famille des *Poxviridae*, du genre *Capripoxvirus* [Tuppurainen et Oura, 2012]. Le virus affecte les bovins, les buffles et les zébus. L'Organisation mondiale de la santé animale (OIE) a classé la DNC parmi les maladies à déclaration obligatoire en raison de son impact économique important. Le signe clinique le plus typique est la présence de nodules dans la peau. Les nodules régressent ou évoluent vers de la nécrose, des ulcères et finalement des cicatrices. Ces lésions peuvent également apparaître dans d'autres tissus des voies respiratoire, digestive et génitale, ainsi que dans les ganglions lymphatiques [Prozesky et Barnard, 1982]. La méthode de transmission la plus importante se fait par des vecteurs hématophages transmettant le virus par voie mécanique. La propagation de la maladie dans certaines zones se fait généralement sous forme de taches, avec des sauts sporadiques sur de plus longues distances.

De nos jours, les autorités vétérinaires et les chercheurs s'accordent à penser qu'une combinaison entre un programme de vaccination d'urgence et l'application de mesures de restriction des mouvements, avec ou sans élimination des animaux affectés cliniquement, constitue la meilleure option de maîtrise en vue de l'éradication de la DNC [EFSA, 2017].

La DNC est restée enzootique en Afrique subsaharienne pendant des décennies, mais à la fin du siècle dernier, elle s'est répandue en Égypte (1988), au Moyen-Orient (1989) et, ces dernières années, à nouveau au Moyen-Orient (2012), puis en Turquie (2013), Chypre (2014) et différents pays des

Balkans, pays du Caucase et Fédération de Russie (2015-2016) [Saegerman *et al.*, 2018a et 2018b].

### 2. SCÉNARIO

Nous avons simulé le nombre de vaccins nécessaires dans le cas où la DNC serait introduite en France et provoquerait une épizootie. Les données sur le nombre de troupeaux de bovins et le nombre de bovins par département, ainsi que la surface de ces départements, ont été obtenues à partir des statistiques agricoles annuelles de 2015 et de l'Institut national de l'information géographique et forestière de France.

### 3. MODÈLE

Pour déterminer la taille de la banque de vaccins nécessaire pour contrôler une épizootie de maladie exotique, différents facteurs ont été pris en compte :

- La vitesse de propagation de l'infection à travers la zone touchée (c'est-à-dire la distance parcourue par la maladie par semaine). La valeur utilisée pour les calculs dans l'exemple de la DNC en France est la vitesse de diffusion avec laquelle la DNC s'est propagée de la Turquie occidentale aux pays des Balkans entre mai 2015 et août 2016. Cette vitesse de propagation a été estimé à 7,3 km/semaine [Mercier *et al.*, 2018] ;
- Le délai entre l'introduction de la maladie et la réalisation d'une vaccination efficace de la population bovine, ce qui implique le développement d'une réponse immunitaire

Protectrice dans une proportion adéquate de la population (c'est-à-dire une bonne couverture vaccinale). Pour le calcul de ce délai, trois périodes doivent être considérées : (1) le temps écoulé entre l'introduction de la maladie et sa détection et le début de la campagne de vaccination, (2) le temps nécessaire pour vacciner l'ensemble de la population cible, et (3) le temps nécessaire pour assurer une protection efficace des animaux après la vaccination. Pour la DNC en France, nous avons estimé que le temps nécessaire à une vaccination efficace pouvait varier entre 4 semaines (meilleur scénario) et 8 semaines (pire scénario) ;

- La densité de population des bovins dans la zone où le premier foyer de la maladie exotique est détecté. Les densités ont été calculées par département (division administrative de second niveau en France, après les régions). Le risque d'introduction du VDNC dans le pays est principalement lié à l'introduction de bovins vivants infectés provenant d'une zone touchée. Étant donné que le nombre d'animaux provenant des zones touchées importées dans

le pays est très faible [Étore *et al.*, 2018] et que le nombre d'animaux importés et les zones touchées varient dans le temps, il est inutile d'utiliser ces données pour les simulations. Nous avons donc supposé que la DNC pouvait être introduite dans n'importe quelle partie de la France et que le risque que le premier foyer se déclare dans un département donné était directement proportionnel à la taille de la population de chaque département. Cela nous a permis d'évaluer l'ensemble des scénarios possibles après l'introduction de la DNC en France.

Une autre hypothèse était que tous les bovins présents dans la région seraient vaccinés. Les calculs peuvent être raffinés, le cas échéant, en fonction de l'âge des animaux à immuniser et des capacités de vaccination réelles sur le terrain.

Le produit des trois valeurs, à savoir la vitesse de diffusion, le délai entre l'infection et la vaccination efficace de toute la population et la densité du bétail, donne la taille de la banque de vaccins à stocker. Les équations à considérer pour le calcul sont les suivantes :

#### ➤ Estimation de la densité de population des bovins dans chaque département (Dép.) et chaque région (Rég.)

$$\text{Densité Dép.} = \frac{\text{Nombre de bovins dans le Dép.}}{\text{Surface du Dép.}} \quad (\text{Équation 1})$$

$$\text{Densité Rég.} = \frac{\text{Nombre de bovins dans la Rég.}}{\text{Surface de la Rég.}} \quad (\text{Équation 2})$$

Les experts ont considéré l'apparition d'un premier foyer apparaît dans un département donné en utilisant des nombres aléatoires pondérés par le recensement du bétail (probabilité plus grande qu'un premier cas apparaisse dans un département

plus peuplé et dès lors plus susceptible d'importer des animaux). Pour simplifier les calculs, le département a été considéré comme étant un carré avec un côté de :

$$\text{Côté} = \sqrt{\text{Surface}} \quad (\text{Équation 3})$$

Un autre nombre aléatoire définit l'emplacement du premier foyer dans le département. Si le rayon de la zone de vaccination dépasse les limites du département, la vaccination s'appliquera également à la zone correspondante des

départements voisins de la même région. Afin de simplifier les calculs, il a été supposé que la zone de vaccination ne dépasse jamais les limites de la région qui touchent une autre région, la mer ou un pays voisin.

$$\text{Localisation du premier foyer} = \text{Numéro aléatoire} \times \text{Côté} \quad (\text{Équation 4})$$

### ➤ Estimation du nombre d'animaux à vacciner

Lorsque toute la zone de vaccination se trouvait à l'intérieur du département (c'est-à-dire que le rayon de vaccination est plus court que la distance entre le nombre aléatoire définissant

l'emplacement du foyer et la limite du département), la densité de bovins de ce département a été considérée. Lorsque la zone de vaccination dépassait le département, la densité de la région a été considérée (figure 1).

$$\text{Nombre de bovins} = \text{Densité Dép.} \times \pi \times \text{rayon de la vaccination}^2 \quad (\text{Équation 5})$$

$$\text{Nombre de bovins en dehors du Dép. (mais à l'intérieur de la Rég.)} = \text{Densité Rég.} \times (\varphi - \sin(\varphi)) \times \text{rayon de vaccination}^2 / 2 \quad (\text{Équation 6})$$

$$\text{Nombre de bovins à l'intérieur du Dép.} = \text{Densité du Dép.} \times (\pi \times \text{rayon de vaccination}^2 - (\varphi - \sin(\varphi)) \times \text{rayon de vaccination}^2 / 2) \quad (\text{Équation 7})$$

Avec  $\varphi$  qui est l'angle (en degrés) formé par les deux lignes reliant la position du premier foyer et les deux intersections du cercle de la zone de vaccination et

du côté du département (figure 1). Celui-ci est calculé de la manière suivante :

$$\varphi = 2 \times \text{ArcCos} \left( \frac{\text{Côté Dép.} \times \text{nombre aléatoire}}{\text{rayon de vaccination}} \right) \quad (\text{Équation 8})$$

La figure 1 montre deux exemples illustrant les deux situations pour les départements de la Nièvre (dép. 58) et de Saône-et-Loire (dép. 71) et de la région Bourgogne Franche Comté.

Le modèle a été construit dans une feuille de calcul Excel®, utilisant une macro pour simuler 20 000 itérations.

## 4. VALIDATION DES RÉSULTATS

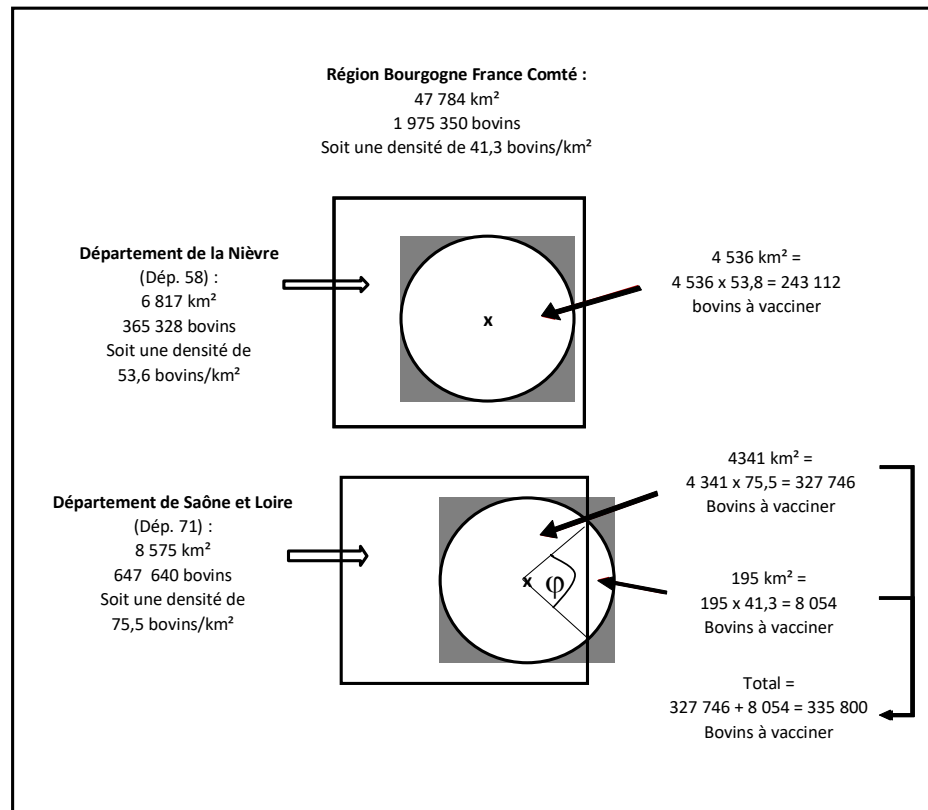
Pour la validation des résultats du modèle, un modèle plus sophistiqué, fondé sur les caractéristiques géographiques réelles de la France, a été construit et utilisé comme modèle de référence. Pour ce faire, tous les troupeaux français de chaque département ont d'abord été répartis au hasard dans ce département. Cela a permis de créer une carte de la France avec la localisation approximative de chacun des troupeaux du pays (c'est-à-dire en tenant compte de l'hétérogénéité de la densité de bovins d'un département à l'autre). Il a été supposé que tous les troupeaux de chaque département avaient la même taille, obtenue en divisant le nombre de bovins dans ce département par le nombre de troupeaux. Dans un deuxième

temps, la propagation de la DNC a été simulée. Pour ce faire, un troupeau en France a été sélectionné au hasard comme le cas index de la maladie. Ensuite, l'hypothèse que la maladie se propageait à une vitesse donnée (7,3 km par semaine) [Mercier *et al.*, 2018], c'est-à-dire que le rayon de la zone circulaire affectée par la maladie augmentait à cette vitesse. Par conséquent, le nombre de troupeaux et d'animaux inclus dans cette zone (c'est-à-dire potentiellement affectés par la maladie) a été simulé pour chaque semaine (de la semaine 1 à la semaine 20). Le processus de sélection d'un troupeau aléatoire et de simulation de la propagation de la maladie a été répété mille fois pour tenir compte du fait que la maladie peut commencer dans n'importe quel troupeau de la France métropolitaine et que les conséquences (nombre de troupeaux et d'animaux affectés) varieront selon les départements et la densité des troupeaux et des animaux dans ceux-ci.

Toutes les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel R [R Core Team, 2014]. Les packages *sp* [Pebesma et Bivand, 2005], *Rgeos* [Bivand et Rundel, 2016], *dplyr* [Wickham et François, 2015] et *tidyr* [Wickham, 2016] ont été utilisés pour développer le modèle raffiné.

Figure 1

**Représentation graphique des calculs permettant d'obtenir le nombre de bovins à vacciner : l'épizootie apparaît soit dans le département de la Nièvre (en haut de la figure) et la zone de vaccination se trouve entièrement dans ce département, soit dans le département de Saône-et-Loire (en bas de la figure) et une partie du cercle de propagation de la maladie va au-delà du département, affectant d'autres départements de la région**



### III - RÉSULTATS

Le tableau 1 montre, pour le modèle simple et le modèle raffiné, les percentiles 50, 75, 90 et 95 estimés du nombre des animaux qui serait à inclure dans la zone de vaccination en cas d'introduction du VDNC en France métropolitaine et tenant compte d'une période de propagation de la maladie entre 4 et 8 semaines.

Pendant une période de 7 semaines entre l'introduction du VDNC et la mise en place d'une vaccination efficace, la zone de vaccination aurait un rayon de 51,1 km autour du cas index (zone de 8 203 km<sup>2</sup>). Pour cette période, 90 % des simulations utilisant le modèle simple incluaient 740 716 bovins ou moins. En considérant les 75 % des simulations, le nombre de bovins à vacciner serait de 608 196. En utilisant le modèle raffiné, le nombre nécessaire d'animaux à vacciner serait

respectivement de 678 328 (90 % des simulations) et 544 324 (75 % des simulations), soit respectivement 9,2 % et 11,7 % de plus avec le modèle simple en comparaison avec le modèle raffiné de référence). Pour les différentes périodes considérées entre le début de la maladie (première déclaration) et la fin de la vaccination, la différence varie de 7 % à 10,5 % pour les valeurs représentant 90 % des simulations et de 9,0 % à 13,8 % pour les valeurs représentant 75 % des simulations. Pour les valeurs proches de la médiane (ainsi que pour les valeurs très extrêmes, c'est-à-dire le percentile 95), la méthode simple tend à surestimer le nombre de bovins à vacciner.

La répartition du nombre de bovins à vacciner selon les deux méthodes est illustrée à la figure 2.

Tableau 1

**Nombre de bovins à vacciner en fonction du temps écoulé entre l'apparition du premier foyer et le dernier animal de la zone qui doit être immunisé.**

Les pourcentages (50 % à 95 %) indiquent les centiles correspondants pour cette semaine.

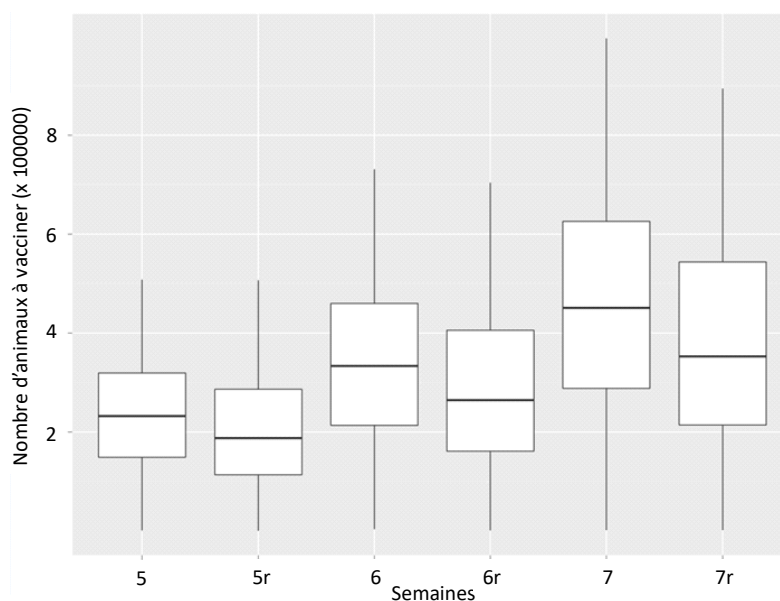
En gras, le nombre d'animaux estimé à l'aide de la méthode simplifiée, en italique à l'aide de la méthode affinée, et la différence entre eux.

Semaine	Rayon	Méthode	50 %	75 %	90 %	95 %
4	29.2	<b>Simple</b>	<b>147 903</b>	<b>200 238</b>	<b>244 905</b>	<b>301 617</b>
		<i>Raffinée</i>	<i>122 907</i>	<i>186 456</i>	<i>232 150</i>	<i>267 158</i>
		Différence	20,3 %	7,4 %	5,5 %	12,9 %
5	36.5	<b>Simple</b>	<b>229 640</b>	<b>312 011</b>	<b>382 094</b>	<b>464 799</b>
		<i>Raffinée</i>	<i>188 015</i>	<i>286 339</i>	<i>357 068</i>	<i>405 460</i>
		Différence	22,1 %	9,0 %	7,0 %	14,6 %
6	43.8	<b>Simple</b>	<b>327 074</b>	<b>447 711</b>	<b>546 728</b>	<b>660 538</b>
		<i>Raffinée</i>	<i>264 875</i>	<i>405 724</i>	<i>505 105</i>	<i>564 229</i>
		Différence	23,5 %	10,3 %	8,2 %	17,1 %
7	51.1	<b>Simple</b>	<b>442 474</b>	<b>608 196</b>	<b>740 716</b>	<b>894 534</b>
		<i>Raffinée</i>	<i>352 950</i>	<i>544 324</i>	<i>678 328</i>	<i>744 464</i>
		Différence	25,4 %	11,7 %	9,2 %	20,2 %
8	58.4	<b>Simple</b>	<b>577 119</b>	<b>795 938</b>	<b>965 141</b>	<b>1 149 848</b>
		<i>Raffinée</i>	<i>453 062</i>	<i>699 144</i>	<i>873 654</i>	<i>955 775</i>
		Différence	27,4 %	13,8 %	10,5 %	20,3 %

Figure 2

**Boîte à moustaches avec le nombre de bovins à vacciner en fonction du délai (de 5 à 7 semaines) entre la détection du premier cas de DNC et la vaccination complète de la zone.**

Les zones 5r, 6r et 7r représentent les résultats obtenus avec la méthode affinée (les chiffres sans lettre indiquent les valeurs de la méthode simple).



Le tableau 2 montre les départements ayant le plus grand nombre de bovins dans la zone de vaccination. Si le premier foyer apparaissait dans la Manche et la Mayenne, il faudrait environ un million de doses pour garantir 90 % des simulations sur une

période de sept semaines. Pour la méthode de référence, le nombre serait nettement inférieur (près de 800 000 doses). Pour les autres départements les différences sont plus petites.

**Tableau 2**

**Départements avec le plus grand nombre de doses nécessaires pour vacciner l'ensemble de la population dans 90 % des simulations prenant en compte des périodes de 6 et 7 semaines entre l'infection et la vaccination et selon les deux méthodes de calcul (méthode simple et méthode de référence)**

Département	Période de 6 semaines			Période de 7 semaines		
	Modèle simple	Modèle raffiné	Différence (%)	Modèle simple	Modèle raffiné	Différence (%)
Manche	751 984	583 263	29	1 029 076	770 710	34
Mayenne	735 707	624 342	18	1 005 020	827 239	21
Ille-et-Vilaine	577 384	585 450	-1	788 052	779 620	1
Vendée	549 055	452 639	21	746 617	584 645	28
Cantal	502 568	461 072	9	690 894	606 018	14
Creuse	470 231	513 101	-8	644 676	711 497	-9
Côtes-d'Armor	467 306	436 708	7	635 977	578 289	10
Maine-et-Loire	463 469	478 781	-3	631 177	622 878	1
Loire-Atlantique	463 343	434 377	7	631 694	587 808	7
Orne	461 668	501 317	-8	628 509	686 677	-8

#### IV - DISCUSSION

La préparation à l'introduction de maladies exotiques dans un pays constitue un défi de taille car, dans le cas d'une épizootie, les conséquences économiques peuvent être dévastatrices. La vaccination est une mesure de maîtrise de choix pour un certain nombre de maladies. Dans ces cas, la disponibilité d'un nombre suffisant de doses de vaccin sur une courte période est d'une importance primordiale. Le meilleur moyen de faire face à une telle situation est de créer une banque (stock) de vaccins avec un nombre suffisant de doses de vaccins. Toutefois, le stockage de plus de doses que nécessaire représente un gaspillage de ressources, tandis que le stockage de doses inférieures aux besoins peut mettre en péril le contrôle de la maladie. Par conséquent, une estimation précise du nombre de doses de vaccin pouvant être nécessaire en cas d'introduction d'une maladie donnée est essentielle.

Dans le cas de l'introduction de la DNC dans un pays indemne, la meilleure option pour la contrôler est la vaccination du bétail couplée à la prévention des mouvements d'animaux dans les zones touchées [Saegerman et De Clercq, 2018]. L'objectif d'une campagne de vaccination est d'immuniser une proportion suffisamment élevée de la population vulnérable. Pour cette raison, nous avons supposé que l'objectif d'une vaccination d'urgence devrait être de couvrir 100 % de la population de bovins. Dans les zones précédemment vaccinées, il n'est pas nécessaire de vacciner les jeunes veaux car ils peuvent avoir des anticorps colostraux jusqu'à l'âge de 6 mois. Toutefois, dans les zones non vaccinées auparavant indemnes, tous les animaux, y compris les veaux, doivent être vaccinés comme cela a été réalisé par les autorités grecques en 2015 [Tasioudi *et al.* 2016].



En cas d'épizootie de DNC en France et en tenant compte d'un délai de 4 à 8 semaines nécessaire entre la déclaration du premier cas de DNC et le moment où la couverture vaccinale est maximale, il faut compter devoir vacciner entre 245 000 et 965 000 têtes dans 90 % des simulations. Dans les simulations, la vitesse de propagation calculée par [Mercier *et al.*, 2018] a été utilisée. Ces auteurs ont examiné deux modes de dispersion, une propagation locale associée aux vecteurs et une transmission à des troupeaux situés à des distances moyennes éventuellement liées à des mouvements de bétail. Cependant, la transmission sur de grandes distances n'a pas été envisagée [Saegerman *et al.*, 2018b].

En plus de donner une idée de la taille de la banque de vaccins nécessaire, le modèle peut également aider à avoir une idée de la quantité de personnel et de ressources matérielles qu'il faudrait affecter pour contrôler l'épizootie, ce qui est essentiel pour la préparation à la crise. Par ailleurs, la DNC est une maladie vectorielle, ce qui signifie qu'elle est très saisonnière et que sa transmission est faible en hiver. Les valeurs présentées ici sont adaptées au pire des scénarios, c'est-à-dire une arrivée de la maladie entre mai et août, en période d'activité vectorielle maximale [Mercier *et al.*, 2017].

La vaccination en anneau a déjà été appliquée pour lutter contre la fièvre aphteuse, la PPC et d'autres maladies. En lien avec la DNC, une vaccination en anneau dans un rayon de 10 km autour des foyers a déjà été appliquée en Irak [Al-Salihi et Hassan, 2015]. Même si une zone de protection circulaire peut constituer un point de départ lorsque des politiques de contrôle sont planifiées, des facteurs

géographiques locaux doivent être pris en compte pour affiner la zone géographique à vacciner. En effet, des caractéristiques géographiques telles que des rivières, des montagnes ou des routes peuvent être responsables d'une répartition irrégulière des cas de DNC. Un modèle incluant des routes nécessite 20 % de surfaces en moins par rapport à l'application d'un rayon unique sans prises en compte de celles-ci [Rivas *et al.*, 2012].

L'avantage du modèle que nous présentons est sa simplicité et la possibilité de l'adapter à différentes conditions (par exemple, différentes maladies ou différents pays). Il suffit de disposer de données sur la propagation de la maladie, le temps nécessaire pour la vaccination et sur l'effectif des animaux à vacciner. Pour 90 % des simulations, le nombre d'animaux inclus dans un rayon compris entre 36 et 58 km autour de la première exploitation touchée est de 7 % à 10,5 % plus élevé avec la méthode la plus simple en comparaison de la méthode plus raffinée utilisée comme méthode de référence. En outre, il est facile de construire ce modèle en utilisant des formules simples basées sur des fonctions trigonométriques et avec peu de données. Les modèles plus complexes impliqueront l'utilisation de logiciels pouvant être compliqués et nécessiteront des connaissances avancées en programmation. Enfin, il convient de rappeler qu'il est crucial de détecter le plus rapidement l'arrivée d'une maladie exotique dans un pays indemne. Dès lors, une bonne sensibilisation des acteurs de la filière (ex. fermiers, vétérinaire, négociants) à la reconnaissance de la maladie et sa déclaration est cruciale et doit être faite en temps de paix [Saegerman et De Clercq, 2018].

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

Al-Salihi K.A., Hassan I.Q. - Lumpy Skin Disease in Iraq: Study of the Disease Emergence. *Transbound Emerg. Dis.*, 2015, **62**, 457-462.

Bivand R., Rundel C. - rgeos: Interface to Geometry Engine - Open Source (GEOS). R package version 0.3-19, année 2016.  
<https://CRAN.R-project.org/package=rgeos>

De Clercq K., Goris N., Barnett P.V., MacKay D.K. - FMD vaccines: reflections on quality aspects for applicability in European disease control policy. *Transbound Emerg. Dis.*, 2008, **55**, 46-56.

EFSA (European Food Safety Authority) - Scientific report on lumpy skin disease: I. Data collection and analysis. *EFSA Journal*, 2017, **15**, 4773, 54 pp.

Étoré F., Bertagnoli S., Casal J., Caufour P., De Clercq K., Ganière J.-P., Hautefeuille C., Jacquet P., Meyer G., Saegerman C. - Risque d'introduction de la dermatose nodulaire contagieuse en France par les importations/échanges de bovins vivants. *Épidémiol. et santé anim.*, 2018, **74**, 119-130.

- Forman A.J., Garland A.J.M. - Foot and mouth disease: the future of vaccine banks. *Rev. sci. tech. Off. Int. Epiz.*, 2002, **21**, 601-612.
- Mercier A., Arsevska E., Bournez L., Bronner A., Calavas D., Cauchard J., Falala S., Caufour P., Tisseuil C., Lefrançois T., Lancelot R. - Spread rate of lumpy skin disease in the Balkans, 2015-2016. *Transbound Emerg. Dis.*, 2018, **65**, 240-243.
- Muleme M., Barigye R., Khaitsa M.L., Berry E., Wamono A.W., Ayebazibwe C. - Effectiveness of vaccines and vaccination programs for the control of foot-and-mouth disease in Uganda, 2001-2010. *Trop. Anim. Health Prod.*, 2013, **45**, 35-43.
- OIE - Vaccine banks. Available from: <http://www.oie.int/en/support-to-oie-members/vaccine-bank/> (consulté le 20 novembre 2018).
- Pebesma E.J., Bivand R S. - Classes and methods for spatial data in R. *R News* 5 (2), année 2005. <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>.
- Perkins N.R., Webster W.R., Wright T., Denney I., Links I. - Vaccination program in the response to the 2007 equine influenza outbreak in Australia. *Austr. Vet. J.*, 2011, **89**(1), 126-134.
- Prozesky L., Barnard B.J. - A study of the pathology of lumpy skin disease in cattle. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research*, 1982, **49**, 167-175.
- R Core Team - R: A language and environment for statistical computing, 2014. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from: <http://www.R-project.org/>
- Rivas A.L., Fasina F.O., Hammond J.M., Smith S.D., Hoogesteijn A.L., Febles J.L., Hittner J.B., Perkins D.J. - Epidemic Protection Zones: Centred on Cases or Based on Connectivity? *Transbound Emerg. Dis.*, 2012, **59**(5), 464-469.
- Saegerman C., De Clercq K. - La dermatose nodulaire contagieuse : actualités. *Point Vétérinaire*, 2018, **382**, 56-63.
- Saegerman C., Bertagnoli S., Meyer G., Ganière J.P., Caufour P., De Clercq K., Jacquiet P., Fournié G., Hautefeuille C., Etoire F., Casal J. - Risk of introduction of lumpy skin disease in France by the import of vectors in animal trucks. *PLoS One*, 2018a, **13**(6), e0198506.
- Saegerman C., Bertagnoli S., Meyer G., Ganière J.P., Caufour P., De Clercq K., Jacquiet P., Hautefeuille C., Étoré F., Casal J. - Risk of introduction of Lumpy Skin Disease in France by the import of cattle. *Transboundary Emerging Diseases*, 2018b, Accepted.
- Tasioudi K.E., Antoniou S.E., Iliadou P., Sachpatzidis A., Plevraki E., Agianniotaki E.I., Fouki C., Mangana-Vougiouka O., Chondrokouki E., Dile C. - Emergence of Lumpy Skin Disease in Greece, 2015. *Transbound Emerg. Dis.*, 2016, **63**, 260-265.
- Tuppurainen E., Oura C. - Review: lumpy skin disease: an emerging threat to Europe, the Middle East and Asia. *Transbound Emerg. Dis.*, 2012, **59**, 40-48.
- Wickham H. - tidy: Easily Tidy Data with "spread()" and "gather()" Functions, 2016. R package version 0.4.1. <https://CRAN.R-project.org/package=tidy>
- Wickham H., Francois R. dplyr: A Grammar of Data Manipulation, 2015. R package version 0.4.3. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>



## Remerciements

Cette étude a été réalisée par un groupe de travail *ad hoc* de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses).