



HAL
open science

Modélisation multi-agents pour la gestion individuelle et collective d'une maladie infectieuse

Stéphane Krebs, Sébastien Picault, Pauline Ezanno

► **To cite this version:**

Stéphane Krebs, Sébastien Picault, Pauline Ezanno. Modélisation multi-agents pour la gestion individuelle et collective d'une maladie infectieuse. 26e Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA), Christophe Lang, Nicolas Marilleau, Oct 2018, Métabief, France. pp.191-200. hal-01979509

HAL Id: hal-01979509

<https://hal.science/hal-01979509>

Submitted on 13 Jan 2019

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

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

Modélisation multi-agents pour la gestion individuelle et collective d'une maladie infectieuse

S. Krebs^a
stephane.krebs@inra.fr

S. Picault^{a,b}
sebastien.picault@oniris-nantes.fr

P. Ezanno^a
pauline.ezanno@oniris-nantes.fr

^a BIOEPAR, INRA, Oniris, Université Bretagne Loire, 44307, Nantes, France

^b Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189, CRIStAL, F-59000 Lille, France

Résumé

Cet article propose un cadre d'analyse multi-agents pour l'évaluation de stratégies de maîtrise des maladies animales infectieuses à l'échelle d'un territoire. La formalisation des comportements des éleveurs a permis de comparer des scénarii de maîtrise de la maladie à l'échelle du territoire tenant compte de l'hétérogénéité des agents et de leurs interactions. Les simulations, réalisées sous NetLogo, ont montré l'émergence de patterns spatio-temporels contrastés d'évolution de la sévérité de la maladie à l'échelle du territoire, et de les comparer à un cadre analytique. Les travaux réalisés ont également permis d'évaluer l'efficacité d'interventions publiques.

Mots-clés : *Maladies infectieuses, décision décentralisée, politiques publiques, automate cellulaire, économie de la santé animale*

Abstract

This paper introduces a multi-agent framework for assessing regional control strategies for infectious animal diseases. The formalization of farmers' behaviors allowed us to compare territorial control strategies accounting for the heterogeneity of agents and of their interactions. NetLogo simulations showed contrasted spatio-temporal patterns of the evolution of disease severity at a territorial scale. They were compared to an analytical model. We also assessed the efficiency of public policies.

Keywords: *Infectious diseases, decentralized decision, public policies, cellular automata, animal health economics*

1 Introduction

Les maladies infectieuses sont causées par des agents pathogènes qui se diffusent d'un individu à l'autre dans une population, soit par des contacts directs entre individus, soit via l'environnement ou des vecteurs. Face à une maladie infectieuse, les agents économiques peuvent allouer des ressources pour prévenir sa survenue, la contenir ou atténuer ses effets, voire l'éradiquer. Les décisions des agents économiques sont donc prises au regard de leur contexte sanitaire, qui en retour est influencé par les décisions des agents. La nature transmissible des agents pathogènes peut induire des phénomènes d'*externalités*, les décisions d'un agent économique pouvant avoir des répercussions sur le bien-être des agents avec lesquels il est en relation. Lorsque l'initiative de la gestion est laissée à la libre appréciation des individus (*prise de décision décentralisée*), la poursuite par chacun de son intérêt propre est de nature à produire des résultats non satisfaisants à l'échelle de la communauté. En effet, il est vraisemblable que le niveau d'effort de maîtrise consenti par les agents s'avère insuffisant pour maximiser le bien-être collectif [1]. Dès lors, il en résulte des besoins de stratégies coordonnées de gestion des maladies infectieuses.

La modélisation mathématique constitue un outil puissant pour comprendre comment un agent pathogène se diffuse dans une population d'hôtes et évaluer des stratégies coordonnées de maîtrise, en tenant compte de l'existence de boucles de rétroactions et de l'existence d'*externalités*. Ainsi, dans la litté-

rature, l'approche privilégiée consiste en un couplage de modèles épidémiologiques (destinés à rendre compte des processus biophysiques à l'œuvre en matière de diffusion d'un agent pathogène au sein d'une population) et de modèles économiques (destinés à rendre compte des comportements des agents économiques dans un contexte épidémiologique particulier) [2, 3]. Les modèles développés reposent néanmoins sur les hypothèses implicites d'*agent représentatif* ou de *mean-field approximation*, qui consistent à extrapoler le comportement d'un système à partir de celui d'un agent unique ou du comportement moyen de celui-ci.

Ces approches échouent cependant à prendre en compte deux caractéristiques importantes du système réel, à savoir l'hétérogénéité des agents économiques et leurs interactions au sein du système réel. Dans les faits, l'hétérogénéité des agents renvoie pour une large part à leurs caractéristiques individuelles (rationalité limitée, aversion vis-à-vis du risque, information plus ou moins parfaite, etc.), qui font qu'un même agent, placé dans des contextes différents (sanitaires, par exemple) ne se comportera pas nécessairement de la même manière, et que deux agents placés dans un même contexte se comporteront potentiellement de manière différente. De plus, dans le monde réel, les individus sont en perpétuelle interaction. Si les approches traditionnelles permettent une prise en compte des interactions via les processus biophysiques, elles parviennent plus difficilement à tenir compte de la nature locale des interactions entre agents (relations de voisinage ou proximité dans des réseaux sociaux) et de l'influence plus ou moins directe sur le comportement d'un agent des décisions prises par ses pairs, qu'il s'agisse de comportements stratégiques (e.g. *opportunisme*) ou non (e.g. *mimétisme*). Enfin, dans les approches traditionnelles, les comportements sont supposés invariants au cours du temps, alors que dans le monde réel, les individus s'adaptent continuellement aux évolutions de leur environnement (l'équilibre du système n'est pas né-

cessairement la norme) et apprennent de leurs choix passés (phénomènes d'apprentissage).

La littérature interdisciplinaire émergente autour des *systèmes adaptatifs complexes* offre une perspective différente, en se focalisant sur la prise en compte de l'hétérogénéité des agents, leurs interactions, la nature adaptative de leurs comportements, la possibilité d'effets d'apprentissage, la sensibilité aux décisions passées, la rationalité limitée des agents, leur insertion dans des réseaux ou encore l'absence d'équilibre du système [4, 5]. En s'inscrivant dans une perspective *bottom-up*, l'idée force de cette approche est de faire émerger des patterns sur la base des comportements individuels, autrement dit de simuler le comportement d'un système sur la base du comportement de ses composants [4].

L'objectif de cet article est double. Sur le plan académique, il s'agit d'élaborer un cadre d'analyse théorique permettant de rendre compte de la diffusion d'un agent pathogène à l'échelle d'un territoire, et d'évaluer des stratégies collectives de maîtrise, en tenant compte du caractère décentralisé du processus de prise de décision. Sur un plan plus opérationnel, dans la mesure où la gestion d'une maladie à une échelle territoriale peut s'avérer difficile à prédire finement eu égard à la complexité des mécanismes à l'œuvre, il s'agit de fournir à un gestionnaire collectif du risque des outils d'aide à la réflexion. Ces outils doivent notamment lui permettre, lors de la définition de dispositifs incitatifs, de tenir compte de la manière dont les individus sont susceptibles de réagir aux mesures incitatives proposées et d'apprécier les impacts de ces mesures à l'échelle macroscopique.

Afin d'illustrer le propos, l'exemple développé dans le présent article est celui de la gestion d'une maladie animale endémique transmissible, à l'échelle d'une petite région agricole.

2 Modèles individuels de décision

Modèle statique. Les décisions individuelles des éleveurs en matière de gestion des maladies animales peuvent être appréhendées très simplement, sur la base du modèle proposé par McInerney, Howe et Schepers [6]. On considère un éleveur, confronté à la présence d'une maladie animale et décidant d'agir – ou non – pour maîtriser la maladie à l'échelle de son troupeau (choix binaire discret). L'éleveur cherche à minimiser le coût économique induit par la maladie (C).

La maladie induit des pertes correspondant à une proportion γ (appelée aussi sévérité de la maladie) du revenu agricole habituel R^{ref} . Le coût sans maîtrise est donc : $C^{no_control} = \gamma \cdot R^{ref}$.

Avec une mesure de maîtrise de coût E et d'efficacité φ (représentant l'atténuation de la sévérité de la maladie), le coût devient :

$$C^{control} = (1 - \varphi) \cdot \gamma \cdot R^{ref} + E \quad \text{avec } 0 \leq \varphi \leq 1$$

L'éleveur décide de maîtriser la maladie lorsque le coût économique de la maladie en situation de maîtrise est moindre qu'en l'absence de maîtrise :

$$(1 - \varphi) \cdot \gamma \cdot R^{ref} + E < \gamma \cdot R^{ref}, \text{ soit } \gamma > \frac{E}{\varphi \cdot R^{ref}}$$

L'éleveur sera d'autant plus enclin à intervenir pour maîtriser la maladie que le coût de la mesure de maîtrise est faible ou que son efficacité est élevée.

Modèle dynamique. La diffusion d'un agent pathogène dans une population d'hôtes étant un phénomène dynamique, le paramètre γ peut donc évoluer au cours du temps. Par souci de simplicité, considérons R^{ref} et E comme constants, et φ comme constante et indépendante du niveau de sévérité de la maladie. L'évolution de la sévérité est alors :

$$\gamma_t = \gamma_{t-1} + r \cdot \gamma_{t-1} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{t-1}}{\gamma^{max}}\right) \quad \text{avec } 0 \leq r \leq 1$$

La sévérité de la maladie sur l'exploitation est bornée entre 0 (absence de maladie) et un

niveau maximal (γ^{max}). La convergence vers ce plateau s'effectue d'autant plus rapidement que la valeur du paramètre r est élevée.

L'éleveur décidera d'implémenter la mesure de maîtrise lorsque :

$$\gamma_{t-1} \cdot \left(1 + r \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{t-1}}{\gamma^{max}}\right)\right) > \frac{E}{\varphi \cdot R^{ref}}$$

En calculant les racines du polynôme, on trouve un seuil de sévérité de la maladie, au-delà duquel l'éleveur décide d'implémenter la mesure de maîtrise :

$$\gamma_{t-1} > \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma^{max}}{r} \cdot \left[(1+r) - \sqrt{(1+r)^2 - 4 \cdot \frac{r}{\gamma^{max}} \cdot \frac{E}{\varphi \cdot R^{ref}}} \right]$$

L'existence du seuil d'intervention est garantie dès lors que :

$$\varphi > \frac{4 \cdot r \cdot E}{(1+r)^2 \cdot \gamma^{max} \cdot R^{ref}}$$

Comme attendu, ce seuil augmente avec le coût de maîtrise (E) et décroît avec l'efficacité de la mesure (φ). On peut caractériser les régimes possibles à l'aide d'un diagramme de phase en fonction des valeurs de r et de φ (FIG. 1).

Régime A : Lorsque la valeur du seuil demeure supérieure au niveau maximal de sévérité γ^{max} , l'éleveur n'a aucun intérêt à implémenter la mesure de maîtrise. La sévérité de la maladie converge alors vers γ^{max} .

Régime B : Lorsque la valeur du seuil est comprise entre 0 et γ^{max} , l'éleveur implémente la mesure de maîtrise. Avec un niveau initial de sévérité faible, l'éleveur laisse dans un premier temps la situation de son troupeau se détériorer (accroissement de la sévérité de la maladie), avant de se décider à maîtriser la maladie. Lorsque le niveau initial de sévérité est supérieur au seuil d'intervention, l'éleveur implémente la mesure de maîtrise jusqu'à ce que le niveau de sévérité soit ramené en-deçà du seuil d'intervention. On observe alors des oscillations du niveau de sévérité autour de la valeur du seuil d'intervention.

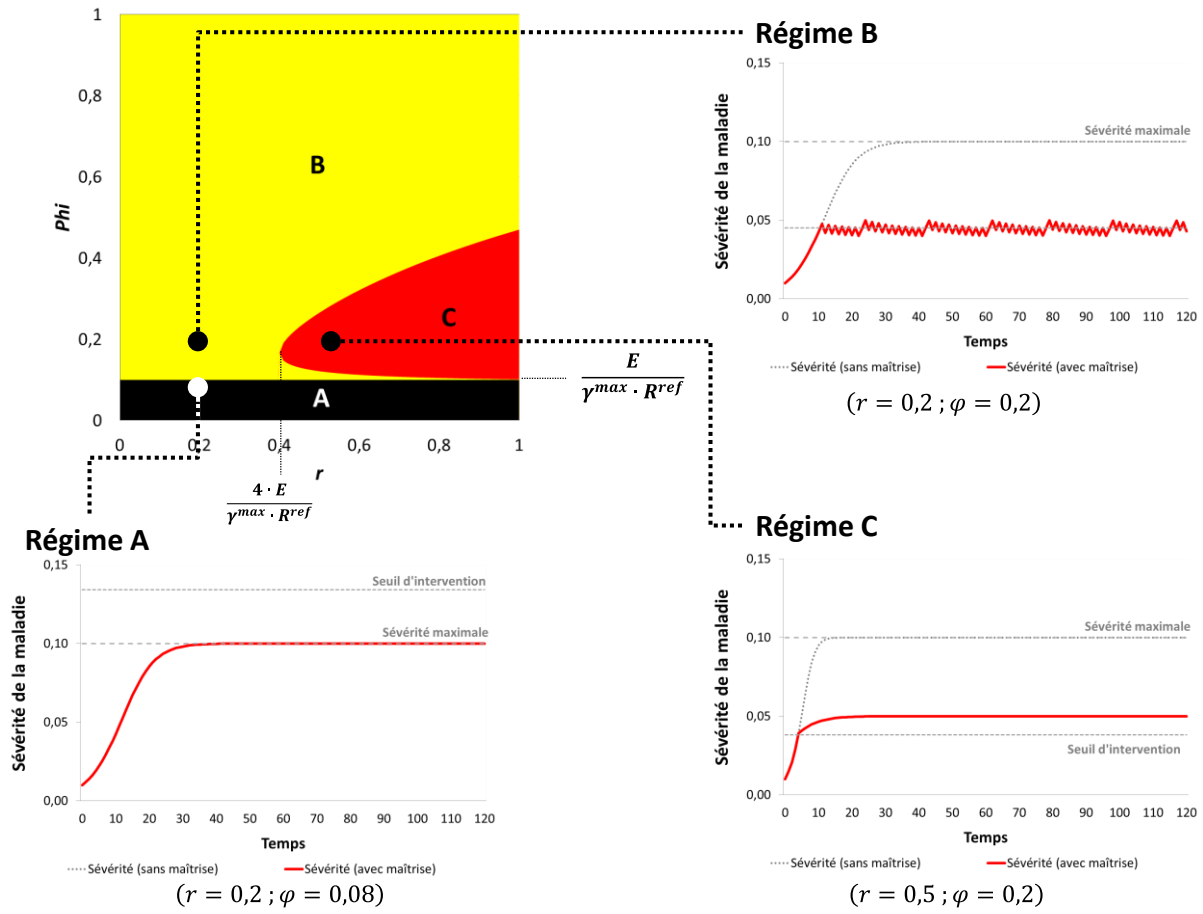


FIG. 1 – Diagramme de phase montrant les trois régimes possibles selon r et φ .

Régime C : Lorsque l'efficacité de la mesure de maîtrise n'est pas suffisante pour ramener le niveau de sévérité en deçà du seuil d'intervention (*i.e.* l'efficacité de la maîtrise insuffisante au regard de la capacité de l'agent pathogène à se diffuser), l'éleveur implémente à chaque pas de temps la mesure de maîtrise. La sévérité de la maladie converge vers un niveau de sévérité correspondant à $\gamma^* = \gamma^{max} \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{r \cdot (1 - \varphi)}\right)$, inférieur au niveau de sévérité maximale γ^{max} .

Une tendance à l'éradication est dans ce contexte envisageable, dès lors que la mesure de maîtrise présente un niveau d'efficacité suffisant. En termes opérationnels, en considérant le revenu de référence et le niveau d'efficacité de la mesure comme donnés, le seul levier disponible est le coût de la mesure de maîtrise, sur lequel un gestionnaire collectif du

risque sanitaire peut influencer par une incitation financière.

Modèle spatialisé. Pour de nombreux agents pathogènes, une transmission par un voisinage géographique est possible [7, 8]. Supposons ici que la sévérité de la maladie à l'échelle d'une exploitation est impactée par la sévérité moyenne dans les exploitations voisines, elle évolue donc comme suit :

$$\gamma_t = \gamma_{t-1} + r \cdot (\gamma_{t-1} + \alpha \cdot \bar{\gamma}_{t-1}^{neigh}) \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{t-1}}{\gamma^{max}}\right)$$

où $\bar{\gamma}_{t-1}^{neigh}$ désigne la sévérité moyenne de la maladie dans les exploitations voisines et α un paramètre destiné à pondérer l'influence du voisinage sur la diffusion spatiale de l'agent pathogène. L'éleveur décide d'implémenter la mesure de maîtrise lorsque :

$$\gamma_{t-1} + r \cdot (\gamma_{t-1} + \alpha \cdot \bar{\gamma}_{t-1}^{neigh}) \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{t-1}}{\gamma^{max}}\right) > \frac{E}{\varphi \cdot R^{ref}}$$

d'où un seuil de d'intervention :

$$\gamma_{t-1} > \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma^{max}}{r} \left[\left(1 + r \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot \bar{\gamma}_{t-1}^{neigh}}{\gamma^{max}} \right) \right) - \sqrt{-4 \cdot \frac{r}{\gamma^{max}} \cdot \left(\frac{E}{\varphi \cdot R^{ref}} - r \cdot \alpha \cdot \bar{\gamma}_{t-1}^{neigh} \right)} \right]$$

Le seuil d'intervention varie à l'inverse de la sévérité moyenne dans le voisinage et varie dans le temps et l'espace.

3 Simulation du modèle spatial

Sur la base de la formalisation des décisions individuelles de maîtrise des éleveurs menée dans la section précédente, nous avons évalué par simulation plusieurs scénarii de gestion d'une maladie endémique à l'échelle d'une petite région agricole. Le modèle théorique étant développé en temps et en espace discrets, et les interactions entre agents s'opérant localement, un modèle d'automate cellulaire a été implémenté en NetLogo.

Considérons un territoire, composé d'agents-cellules identiques représentant chacun un éleveur, qui décide individuellement d'agir ou non pour maîtriser la maladie, selon les règles de décisions précédentes. Les agents sont supposés rationnels et parfaitement informés. Ils disposent notamment d'une capacité de calcul illimitée : ils connaissent et observent leur statut sanitaire propre et celui de leur voisinage, et sont pleinement en mesure d'anticiper les conséquences des décisions

prises par (et pour) eux-mêmes ou leur voisins. Le type de voisinage considéré est un voisinage de Moore. L'unique source d'hétérogénéité et de stochasticité provient de la situation sanitaire (sévérité initiale) des exploitations, tirée uniformément entre 0 et γ^{max} . La taille de la grille est de 81×81 et l'espace considéré est torique. Les simulations sont réalisées sur 120 pas de temps. Chaque scénario a été répété 25 fois, sans différences notables de résultats.

Le TAB. 1 synthétise les valeurs des paramètres utilisées dans les simulations. Elles ont été choisies de manière à se situer dans le régime B du diagramme de phase (FIG. 1). La diffusion de l'agent pathogène et l'efficacité de la mesure de maîtrise sont modérées.

Par souci de réalisme, un seuil d'extinction de l'infection et un seuil de reprise sont fixés arbitrairement de même valeur 0.01. Ainsi, une sévérité qui tombe en dessous du seuil d'extinction est fixée à 0, et inversement, si la sévérité dans le voisinage d'un troupeau non infecté dépasse le seuil de reprise, ce troupeau passe à une sévérité de 0.01.

Enfin, on postule l'absence de réintroduction de l'agent pathogène par l'extérieur du territoire. L'éradication est atteinte à l'échelle du territoire lorsque toutes les sévérités sont nulles.

3.1 Gestion décentralisée de la maladie

Scénario 1 : 'Laissez-faire'. Dans ce scénario, chaque éleveur décide d'implémenter (ou non) la mesure de maîtrise sur la base de la

Paramètre	Signification	Valeur
r	Paramètre de la fonction de diffusion	0.2
φ	Efficacité de la mesure de maîtrise	0.2
α	Paramètre régissant l'influence du voisinage dans la fonction de diffusion	0.2
γ^{max}	Sévérité maximale	0.1
R^{ref}	Revenu de référence	100
E	Dépense de maîtrise	1

TAB. 1 – Valeurs des paramètres employés dans les simulations et permettant de se situer dans le régime B (FIG. 1)

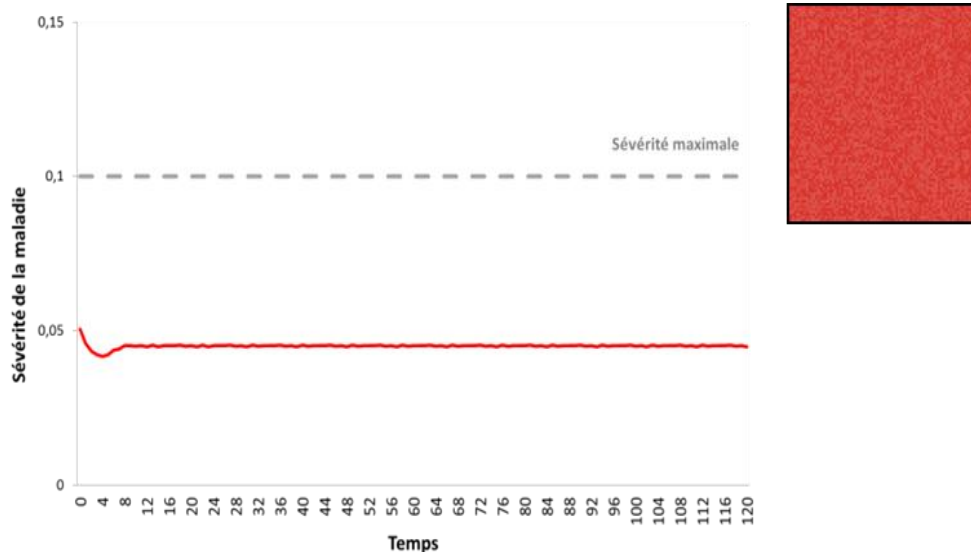


FIG. 2 — Scénario 1. ‘Laissez-Faire’

situation sanitaire (sévérité) propre à son troupeau, en fonction du seuil d’intervention. Les interactions entre agents ne s’opèrent que par le processus biophysique de diffusion de l’agent pathogène et de l’impact de la maladie à l’échelon local (voisinage immédiat).

A l’échelle macroscopique, les décisions des agents de maîtriser ou non la maladie débouchent sur une réduction de la sévérité moyenne à l’échelle du territoire. La sévérité de la maladie converge vers le seuil d’intervention comme prévu dans l’étude analytique (FIG. 2). Avec le jeu de paramètres employé pour la simulation, la proportion d’éleveurs implémentant la mesure de maîtrise à chaque pas de temps tend à osciller autour de 55%, avec un profil *en dents de scie*. En termes de pattern spatio-temporel, on note une tendance à l’homogénéisation de la situation sanitaire des exploitations. Ce scénario sert de référence pour le reste de l’analyse.

Scénario 2 : ‘Mimétisme’. Le second scénario explore les conséquences macroscopiques d’une seconde source d’interaction entre agents. Le comportement individuel d’un agent peut en effet, en plus des interactions indirectes locales induites par la diffusion de l’agent pathogène, être directement influencé par les décisions prises par les agents qui composent son voisinage (comportement mimétique). L’agent peut décider d’implémenter

la mesure même s’il n’est pas économiquement incité à le faire au regard de la situation sanitaire propre de son troupeau, dès lors qu’une certaine proportion d’agents dans son voisinage implémente la mesure de maîtrise.

Dans ce scénario, un éleveur ne décide d’implémenter la mesure que si (i) la sévérité de la maladie dans le troupeau excède la valeur du seuil d’intervention (quelle que soit la situation sanitaire des troupeaux voisins), ou (ii) qu’un nombre minimum de voisins (noté N_{impl}^{min}) implémente la stratégie de maîtrise et que la sévérité moyenne dans le voisinage est non nulle (quelle que soit la situation sanitaire du troupeau).

Les résultats de simulations menées pour différentes valeurs de N_{impl}^{min} montrent trois types de patterns spatio-temporels (FIG. 3). Dans des conditions restrictives ($N_{impl}^{min} \geq 7$), le pattern obtenu s’apparente à celui de la situation de référence, tandis que dans des conditions faiblement ou moyennement restrictives ($N_{impl}^{min} \leq 5$), l’éradication de la maladie peut être obtenue. Lorsque $N_{impl}^{min} = 6$, le pattern obtenu correspond à une situation intermédiaire de processus de diffusion de la sévérité par vagues à l’échelle du territoire. Pour comparer les résultats avec ceux du scénario de référence, un indicateur de *coût social de la maladie* a été calculé pour chaque simulation

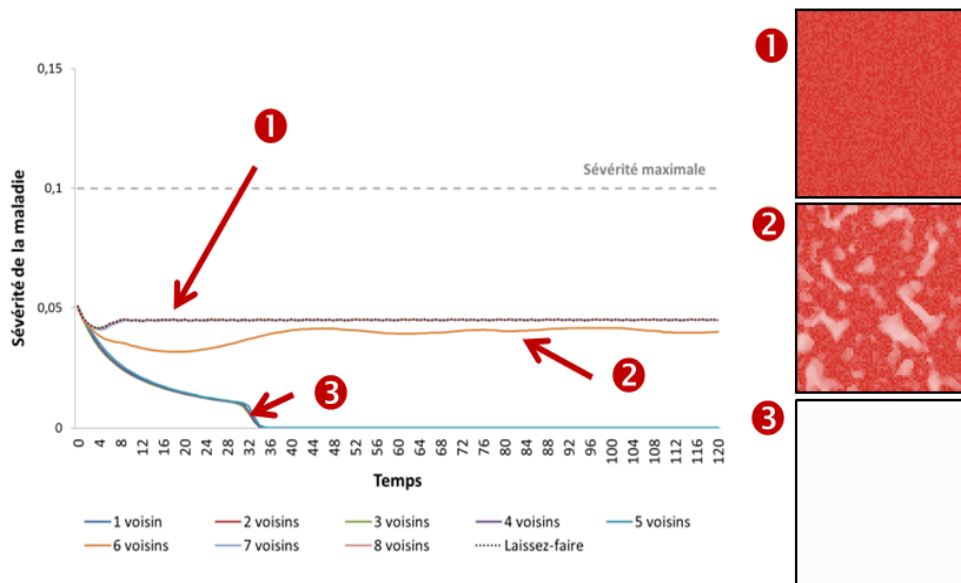


FIG. 3 — Scénario 2. ‘Mimétisme

(non présenté ici, voir [9]). La comparaison entre valeurs de N_{impl}^{min} montre que lorsque les décisions d’un agent sont influencées par les décisions de ses voisins, l’éradication peut être atteinte dès lors que $N_{impl}^{min} \leq 5$. Le coût social de la maladie est alors divisé par 5.

Néanmoins, il est peu vraisemblable que les éleveurs intègrent spontanément les efforts de maîtrise consentis par leurs voisins dans leur propre processus de décision. La possibilité d’éradication de la maladie permise dans ce scénario ouvre cependant la voie à des stratégies de gestion coordonnées de la maladie à l’échelle du territoire. Une amélioration de l’information des agents sur les actions de maîtrise entreprises dans le voisinage et la promotion de règles simples de décision (implémenter la mesure de maîtrise lorsqu’un nombre suffisant de voisins consent des efforts de maîtrise) permettrait d’améliorer significativement le bien-être social.

3.2 Gestion coordonnée de la maladie

Scénario 3 : ‘Subventionnement partiel’. Pour coordonner les efforts de maîtrise à l’échelle du territoire, un gestionnaire collectif du risque sanitaire, agissant comme planificateur social, est introduit dans le modèle. Il décide de subventionner (pour tout ou partie)

la mesure de maîtrise, de manière à favoriser son implémentation par les agents.

Les résultats de simulation montrent deux types de patterns spatio-temporels (FIG. 4). L’éradication de la maladie peut être atteinte, dès lors que le niveau de subventionnement 80 % du montant de la dépense de maîtrise. Pour des niveaux plus faibles de subventionnement, la situation tend à se rapprocher de la situation de référence. En abaissant le seuil d’intervention, le subventionnement de la mesure contribue à diminuer la sévérité de la maladie à l’échelle du territoire.

En intégrant les ressources allouées par le planificateur social dans la définition du coût social de la maladie, les résultats de simulation montrent que le coût social est minimal pour un niveau de subventionnement de 80% [9].

Les ressources du planificateur social étant limitées, un second indicateur détermine le niveau de subventionnement présentant le meilleur retour sur investissement : le ratio bénéfice-coût. D’une part, le *bénéfice* considéré est la réduction, due à la maîtrise, du manque à gagner induit par la maladie. Il est obtenu en soustrayant du coût social de la maladie correspondant au scénario de référence le coût social obtenu pour les différents

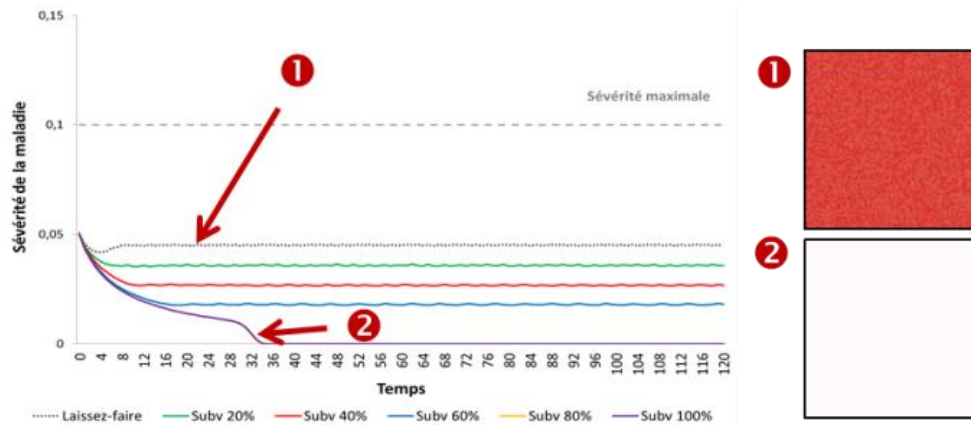


FIG. 4 – Scénario 3. ‘Subventionnement partiel’

niveaux de subventionnement. D’autre part, le coût correspond aux montants alloués par le planificateur au subventionnement de la mesure de maîtrise. Le ratio bénéfice-coût le plus élevé est obtenu pour un niveau de subventionnement de 80 % : Un euro investi par le planificateur social dans la maîtrise de la maladie permet de réduire le manque à gagner induit par la maladie de 16.31€.

Scénario 4 : ‘Subventionnement conditionnel’. Pour limiter les coûts de subventionnement et promouvoir des synergies locales en matière de gestion du risque sanitaire, le planificateur social peut conditionner l’octroi du subventionnement. Dans ce scénario, l’agent ne bénéficie du montant de la subvention que lorsqu’un nombre donné d’agents dans le voisinage ($N_{subsidy}^{min}$) a implémenté la mesure. Dans un tel système, plus les conditions fixées par le planificateur sont restrictives ($N_{subsidy}^{min}$ élevé), plus le coût sera faible pour ce dernier.

La FIG. 5 illustre les cinq types de patterns spatio-temporels obtenus, en simulant le modèle pour différentes valeurs de $N_{subsidy}^{min}$ et en fixant le niveau de subventionnement de la mesure de maîtrise à 80 %.

En conditions très restrictives ($N_{subsidy}^{min} \geq 7$), le pattern obtenu correspond à celui du scénario de référence, avec une convergence de la valeur de la sévérité moyenne autour du seuil d’intervention. Lorsque $N_{subsidy}^{min} = 6$, le pat-

tern correspond à des fluctuations du niveau de sévérité de la maladie, liées à des processus de diffusion par vagues de l’agent pathogène à l’échelle du territoire. En conditions intermédiaires ($N_{subsidy}^{min} = 6$), la situation sanitaire s’améliore temporairement. On observe ensuite des fluctuations de la sévérité de la maladie, liées à des processus de diffusion par vagues. Lorsque le planificateur relâche encore ses conditions ($2 \leq N_{subsidy}^{min} \leq 5$), le subventionnement permet toujours une amélioration de la situation sanitaire à l’échelle du territoire, mais des foyers résiduels de maladie subsistent. Sous certaines conditions ($N_{subsidy}^{min} = 4$ ou $N_{subsidy}^{min} = 5$) une reprise de circulation de l’agent pathogène est possible à partir de ces foyers. Enfin, pour des conditions faiblement restrictives ($N_{subsidy}^{min} \leq 1$), l’éradication peut être atteinte.

A l’instar du précédent scénario, le modèle permet au planificateur social de déterminer les paramètres les plus efficaces du système d’incitation, *i.e.* le meilleur couple ‘montant de la subvention’/ ‘degré de conditionnement du subventionnement’. Nous avons déterminé empiriquement que le coût social était minimal pour un subventionnement non conditionné de la dépense de maîtrise à hauteur de 80 % [9], ce qui entraîne l’éradication de la maladie. Le meilleur ratio bénéfice-coût pour le planificateur social correspond à un subventionnement de la mesure à hauteur de 80 % de la dépense de maîtrise, octroyé dès

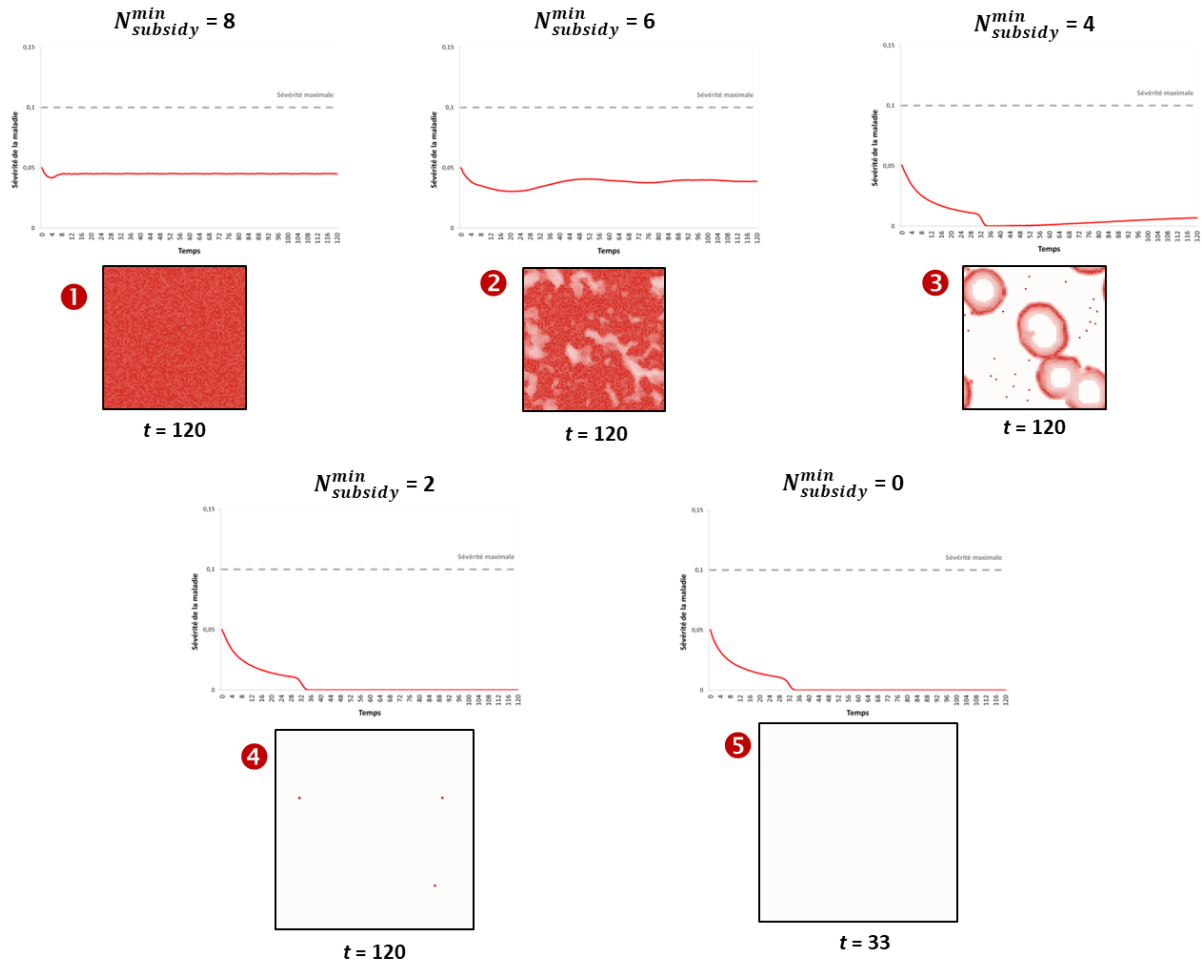


FIG. 5 – Scénario 4. ‘Subventionnement conditionnel’

lors que deux éleveurs du voisinage au moins implémentent la mesure de maîtrise. Pour ces paramètres, l'éradication de la maladie n'est cependant pas obtenue (persistance de foyers résiduels de maladie).

4 Conclusion

Dans cet article, un cadre d'analyse a été proposé pour évaluer des stratégies de maîtrise des maladies infectieuses endémiques, à l'échelle d'un territoire, en conjuguant étude mathématique et simulation. A cette fin, un modèle d'automate cellulaire, reposant sur une représentation simple du comportement des agents, a été développé puis simulé, en envisageant différents scénarii (laissez-faire, mimétisme, subventionnement d'une mesure de maîtrise par un planificateur social). Com-

parativement à des approches plus traditionnelles, basées sur un raisonnement en termes d'agent représentatif, l'approche proposée a permis, en tenant explicitement compte de l'hétérogénéité des agents et de leurs interactions au sein du système, de faire émerger une gamme relativement large de patterns spatio-temporels en matière de sévérité de la maladie à l'échelle de la zone géographique considérée. Sur un plan plus opérationnel, l'approche proposée a notamment permis de tenir compte de la manière dont les agents sont susceptibles de réagir aux incitations mises en place par un gestionnaire collectif du risque et d'ouvrir des voies de réflexion intéressantes en matière de conception de dispositifs incitatifs. Ainsi, dans le dernier scénario testé, la possibilité de persistance de foyers résiduels de maladie et la possibilité pour l'agent pa-

thogène de rediffuser à partir de ces derniers soulève la question de la robustesse des systèmes incitatifs, autrement dit de leur capacité, une fois une quasi-éradication atteinte, à empêcher toute reprise de circulation de l'agent pathogène.

La démarche proposée, qui repose sur la construction d'un modèle simple et hautement stylisé, nous a permis de produire des résultats analytiques et de simulation facilement interprétables, de nature à illustrer la plus-value d'une prise en compte de l'hétérogénéité des agents et de leurs interactions dans la conception de dispositifs collectifs de gestion des maladies infectieuses. Il est possible de choisir des valeurs de paramètres et des échelles temporelles représentatives de diverses maladies des plantes ou des animaux de production.

L'analyse se doit maintenant d'être prolongée par une exploration plus large de différents contextes épidémiologiques (diffusion lente, modérée ou rapide de l'agent pathogène dans et entre exploitations), ainsi que différents niveaux d'efficacité de la mesure de maîtrise. Sur la base du travail réalisé, un certain nombre d'enrichissements sont également envisagés. Les extensions du modèle peuvent concerner, notamment, une modélisation plus fine du comportement des agents (e.g., rationalité limitée, information imparfaite, attitude vis-à-vis du risque, apprentissage), des interactions renforcées entre agents (e.g., comportements stratégiques, insertion dans des réseaux économiques ou sociaux conduisant à de la coopération), diverses stratégies du planificateur (e.g., limitation des ressources susceptibles d'être allouées à la maîtrise de la maladie), ou encore l'introduction d'hétérogénéité spatiale dans le modèle (e.g., situations sanitaires géographiquement contrastées, densités de troupeaux, relations topologiques). A cet égard, le travail présenté ici ne constitue qu'une première étape, qui permet d'illustrer tout le potentiel de cette approche.

Remerciements

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet MIHMES, cofinancé par l'ANR (Investissements d'Avenir ANR-10-BINF-07) et par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) des Pays-de-la-Loire. Ils bénéficient également d'un financement du département Santé Animale de l'INRA.

Références

- [1] R.S. Epanchin-Niell et J.E. Wilen, Individual Cooperative Management of Invasive Species in Human-mediated Landscapes, *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 97, pp. 180-198, 2015
- [2] S. Funk, M. Salathé et V.A.A. Jansen, Modelling the influence of human behaviour on the spread of infectious diseases: a review, *Journal of the Royal Society Interface*, Vol. 7, pp. 1247-1256, 2010
- [3] F. Verhelst, Willem L. et P. Beutels, Behavioural change models for infectious disease transmission: a systematic review (2010-2015), *Journal of the Royal Society Interface*, Vol. 13, pp. 1247-1256, 2016
- [4] J.M. Epstein et R. Axtell, *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, MIT Press, 1996
- [5] J.H. Miller et S.E. Page. Axtell, *Complex Adaptive Systems An Introduction to Computational Models of Social Life*, Princeton University Press, 2007
- [6] J.P. McInerney, K.S. Howe et J.A. Schepers, A framework for the economic analysis of disease in farm livestock. *Preventive Veterinary Medicine*, Vol. 13, pp 37-154, 1992
- [7] P. Pandit, T. Hoch, P. Ezanno, F. Beaudeau et E. Vergu, Spread of *Coxiella burnetii* between dairy cattle herds in an enzootic region: modelling contributions of airborne transmission and trade. *Veterinary Research*, Vol. 47(1):48, 2016
- [8] L. Qi, E. Vergu, B.L. Dutta, A. Joly et P. Ezanno, Proximity contacts and trade movements drive the spread of endemic pathogens in heterogeneous managed metapopulation. *Epidemics* (submitted).
- [9] S. Krebs, Maîtrise des maladies animales endémiques transmissibles : Une approche par automate cellulaire, 10^{èmes} JRSS INRA-SFER-CIRAD, Paris, 8-9 décembre 2016