

Maîtrise des maladies animales endémiques transmissibles : Une approche par automate cellulaire

Stéphane Krebs

UMR 1300 Biologie, épidémiologie et analyse de risque en santé animale (Oniris-INRA)
Ecole Nationale Vétérinaire, Agro-alimentaire et de l'Alimentation Nantes Atlantique – Oniris
Atlanpole – La Chantrerie
CS 40706
44307 NANTES Cedex 3
France
E-mail : stephane.krebs@oniris-nantes.fr

Résumé :

Dans la présente communication, un cadre d'analyse destiné à l'évaluation de stratégies de maîtrise des maladies animales endémiques transmissibles à l'échelle d'une petite région agricole est proposé. A cette fin, un modèle multi-agent, reposant sur une formalisation simple des comportements des éleveurs a été développé, puis simulé, en considérant différents scénarii de maîtrise de la maladie (situation de laissez-faire, prise en compte des interactions entre éleveurs, subventionnement de la mesure de maîtrise par un planificateur social). Les résultats obtenus ont notamment permis de mettre en évidence l'émergence à l'échelle macroscopique de divers patterns spatio-temporels en matière d'évolution de la sévérité de la maladie à l'échelle de la zone géographique considérée. Les travaux réalisés ont également permis d'évaluer l'efficacité puis de hiérarchiser différentes modalités d'intervention en matière de maîtrise de la maladie à l'échelle collective. Ce travail ne constitue cependant qu'une première étape, à visée illustrative. L'analyse se doit notamment d'être prolongée, par une exploration plus large et exhaustive de différents contextes épidémiologiques (diffusion lente, modérée ou rapide de la maladie à l'échelle du territoire considéré), ainsi que différents niveaux d'efficacité de la mesure de maîtrise.

Mots-clés :

Maladies animales endémiques transmissibles – Gestion collective – Prise de décision décentralisée
– Modélisation multi-agent – Economie de la santé animale

JEL Code :

Q12

Maîtrise des maladies animales endémiques transmissibles :

Une approche par automate cellulaire

1.- Introduction

a.- Les maladies animales endémiques transmissibles et leur gestion

En matière de gestion des maladies animales endémiques transmissibles, un point de vue fréquemment adopté est celui d'un gestionnaire collectif, agissant comme un planificateur social et capable de décider des mesures de maîtrise adéquates à implémenter pour contenir – sinon éradiquer – une maladie à l'échelle d'un territoire. Dans la réalité, les maladies se propagent à l'échelle de ce territoire, sur lequel sont représentés une multitude d'éleveurs, qui agissent pour maîtriser la maladie à l'échelle de leur troupeau, indépendamment les uns des autres. Ce processus décentralisé de prise de décision tend à rendre plus complexe la maîtrise d'une maladie à l'échelle du territoire, dès lors qu'elle implique une coordination d'une multitude d'agents économiques (Epanchin-Niell *et al.*, 2010 ; Epanchin-Niell et Wilen, 2015).

Individuellement, chaque éleveur décide d'agir – ou non – pour maîtriser la maladie et choisit le cas échéant des actions de maîtrise qu'il implémente en mettant en balance les bénéfices et les coûts associés à la maîtrise de la maladie à l'échelle du troupeau. Lorsque le coût excède les bénéfices associés à la maîtrise de la maladie – ou lorsque l'information dont dispose l'éleveur concernant la situation sanitaire de son troupeau est imparfaite –, l'éleveur peut être amené à produire des efforts insuffisants – voire à ne pas produire d'efforts – pour maîtriser la maladie. D'un point de vue collectif, cela peut s'avérer problématique, puisque la maladie a alors la possibilité de se diffuser dans les troupeaux voisins et par extension se propager progressivement à l'ensemble du territoire considéré (externalités spatio-dynamiques). Lorsque l'éleveur ne tient compte que des seules conséquences de ses actions à l'échelle de son propre troupeau, ses efforts de maîtrise peuvent ainsi s'avérer sous-dimensionnés au plan collectif. Il demeure peu vraisemblable que les éleveurs internalisent de leur propre chef les externalités induites par la diffusion de la maladie et coopèrent spontanément avec leurs voisins pour maîtriser la maladie. En effet, un éleveur ne se proposerait pas spontanément de contribuer à l'atténuation des pertes induites par la maladie ou à l'éradication de la maladie dans un élevage du voisinage, dans l'espoir d'éviter que son propre troupeau ne soit infecté (ou dans l'espoir de retarder cette infection). Par extension, une contribution volontaire et spontanée d'un éleveur à la maîtrise de la maladie à l'échelle plus large du territoire demeure encore moins vraisemblable.

Les problèmes soulevés par la gestion des maladies animales endémiques transmissibles relèvent d'une gamme plus large de phénomènes économiques et sociaux, les macro-effets de microdécisions, dont l'exploration dans la littérature économique a été initiée avec les travaux de l'économiste américain Thomas C. Schelling.

b.- T.C. Schelling et les macro-effets de microdécisions

Dans l'ouvrage *Micromotives and Macrobehavior* (1978), Schelling met l'accent sur les interactions économiques et sociales qui surviennent lorsqu'un grand nombre de participants est impliqué. Il s'intéresse à la large diversité de situations dans lesquelles un individu réagit, répond et s'adapte à ce qui l'entoure et échoue à percevoir la manière dont ses actions, combinées à celles des autres, débouchent sur des résultats inattendus à l'échelle macroscopique. Les analyses de Schelling mettent en évidence les dangers à inférer des caractéristiques individuelles sur la base d'un résultat observé à l'échelle macroscopique et de tirer des conclusions sur le comportement agrégé en s'appuyant sur ce que l'on connaît des préférences individuelles des agents (Kuran, 2008).

Dans le chapitre 3 de l'ouvrage, Schelling s'intéresse au concept de masse critique. Il s'agit de comprendre comment un comportement est susceptible de se diffuser au sein d'une population et s'auto-entretient, lorsqu'un nombre suffisant d'individus au sein de la population a commencé à adopter ce comportement. Lorsque la masse critique est atteinte, l'influence du comportement de certains individus sur celui des autres individus peut déboucher sur un effet multiplicateur. Ces phénomènes de masse critique peuvent déboucher sur des phénomènes de thermostat. Afin d'illustrer son propos, Schelling évoque l'exemple d'un programme de vaccination volontaire des nourrissons contre la rougeole dans un pays en développement. Originellement, la participation à ce programme était satisfaisante. La maladie étant grave, les mères de famille étaient enclines à amener leurs enfants dans les centres de vaccination, malgré un éloignement parfois important entre ces centres et leur lieu de résidence. Rapidement, la plupart des bébés se trouvèrent vaccinés et le nombre de bébés non vaccinés fut trop faible pour relancer le processus épidémique. En moins d'une année, la maladie avait quasiment disparu au sein de la population. Avec la naissance de nouveaux bébés, la population non vaccinée s'accrut, permettant au processus épidémique de reprendre, incitant les mères à faire vacciner leurs nourrissons. L'année suivante, les conséquences de la maladie s'étant estompées, les centres de vaccination ont à nouveau été désertés. L'année suivante, une nouvelle épidémie de rougeole touchait les nourrissons. Dans ce cycle de la rougeole, les oscillations à la hausse ou à la baisse sont générées de manières différentes. Les oscillations à la baisse sont liées au temps de réaction des mères de famille aux conséquences de la maladie. Les oscillations à la hausse sont liées à la vitesse de propagation de la rougeole au sein d'une population non immunisée. Les unes se mesurent en mois, les autres en années, avec un *pattern temporel* qui s'apparente moins à un mouvement de vagues qu'à une succession de pics indépendants.

Dans le chapitre 4 de l'ouvrage, Schelling s'intéresse à des situations dans lesquelles des *patterns spatiaux* (ségrégation résidentielle) peuvent émerger spontanément, sur la seule base d'un processus de décision décentralisé. A cette fin, il développe un modèle simple de voisinage (dit 'Solitaire de Schelling'), dans lequel les individus préfèrent simplement qu'une partie au moins de leur voisinage leur soit semblable. Il parvient à mettre en évidence que même des préférences peu marquées peuvent déboucher sur de la ségrégation résidentielle.

c.- Modélisation multi-agent (*agent-based modelling*)

Les travaux de Schelling (solitaire de Schelling en particulier) ont ouvert la voie à l'introduction des *agent-based models* (ABM) dans le champ des sciences sociales. Si la mise en œuvre de ces modèles s'avérait originellement délicate, les avancées réalisées sur la plan informatique au cours des dernières décennies ont progressivement permis leur implémentation à plus large échelle. Epstein et Axtell (1996) qualifient les ABM portant sur des processus sociaux de sociétés artificielles (*artificial societies*). Dans ces sociétés artificielles, des structures sociales et comportements de groupe émergent de l'interaction d'individus, opérant dans des environnements artificiels en se conformant à un ensemble de règles prédéfinies. Epstein et Axtell (1986) voient dans ces sociétés artificielles des laboratoires, dans lesquels il devient possible de donner naissance *in silico* à des structures sociales, l'objectif étant la découverte de mécanismes fondamentaux susceptibles de donner à des structures sociales ou comportement collectifs d'intérêt à l'échelle macroscopique. En règle générale, de telles expériences *in silico* impliquent trois ingrédients de base : des agents, un environnement et des règles.

Les **agents** sont les individus composant la société artificielle. Chaque agent est caractérisé par des états individuels et des règles comportementales. Les états individuels peuvent être invariants tout au long de la vie de l'agent, ou au contraire évoluer au cours du temps, via les interactions entre agents ou via les interactions de l'agent avec son environnement. Ces évolutions dépendent alors des règles qui régissent les comportements des agents et de l'environnement. Les actions des agents sont mises en œuvre de manière délibérée, ce qui implique qu'à l'échelon individuel, les agents répondent de manière prédictible aux incitations et à l'information disponible.

Dans les modèles de société artificielle, la vie se déroule dans un **environnement** donné (un territoire, un paysage par exemple), modélisé à l'aide d'une grille. L'environnement peut également renvoyer à des structures plus abstraites, comme un réseau social, dont les propriétés peuvent évoluer au cours du temps. L'environnement constitue néanmoins un milieu indépendant des agents, sur lequel ces derniers opèrent et avec lequel ils interagissent.

Il existe enfin des **règles** qui régissent le comportement des agents et des sites qui composent leur environnement. Ces règles peuvent être de type agent-environnement (lorsque la règle lie le comportement des agents à leur environnement) ou de type agent-agent (lorsque la règle lie le comportement des agents entre eux). Les règles comportementales peuvent différer selon leur degré de sophistication : il peut s'agir de règles très simples, invariantes au cours du temps (règles naïves, routines) ou plus sophistiquées. Des règles naïves tendent à minimiser les capacités humaines, tandis qu'une hypothèse de rationalité totale des agents tend à les exagérer (du moins dans des contextes non triviaux). Dans la réalité, le comportement humain demeure plus dynamique, un individu s'adaptant et modifiant son comportement au regard de ce qui fonctionne « bien ». Quelquefois, les individus se conforment ainsi à des règles plus sophistiquées, qui leur permettent d'apprendre des changements de règles de comportement (phénomène d'apprentissage, mais qui n'en constitue pas moins une règle fixe). Le modélisateur doit alors faire des hypothèses explicites quant à l'intelligence et à la capacité d'adaptation des agents. Peu importe le fait que les agents soient sophistiqués ou adaptatifs, ils se conforment toujours à des règles introduites dans le code informatique du modèle. Il convient enfin de définir des règles explicites concernant la manière dont les agents interagissent les uns avec les autres, autrement dit de positionner les agents dans une structure d'interaction. Ces structures d'interaction peuvent être représentés d'un point de vue spatial, ou par le biais de réseaux.

En termes d'outputs, les ABM peuvent produire des équilibres, donner naissance à des patterns et structures émergentes, ou générer de la complexité. Ces différents types d'outputs peuvent être obtenus à partir d'un même modèle. Les ABM permettent ainsi de modéliser des phénomènes d'*émergence*. Typiquement, en introduisant une population d'agents en interaction dans un environnement simulé, il devient possible de mettre en évidence, à l'échelle macroscopique, d'éventuels patterns sociaux. Ce sont ces patterns et régularités que les économistes cherchent à comprendre, expliquer et prédire, et que les décideurs cherchent à modifier pour le mieux.

Lors de la construction d'un ABM, la nature inductive du travail de modélisation permet de prendre en considération des environnements plus riches et plus proches de la réalité que ne le permettent les approches conventionnelles. Dans le cas d'un ABM, l'économiste n'est contraint que par sa propre imagination et ses propres centres d'intérêt, alors que dans le cas d'un modèle économique « standard », il doit prendre garde à ce que le modèle puisse toujours faire l'objet d'une résolution analytique. La grande flexibilité et le potentiel accru de réalisme offert par les ABM élargissent ainsi considérablement la gamme de questionnements susceptibles d'être explorés. En affranchissant le modélisateur des considérations de prouvabilité, les ABM permettent de se focaliser sur les aspects du monde qu'il considère comme les plus pertinents. Il peut alors traduire les hypothèses pertinentes sous la forme d'un code informatique et simuler les implications logiques de ces hypothèses. En raison de la nature inductive du travail de modélisation, le résultat n'est pas connu *a priori*. Certains ABM produisent des désordres chaotiques et les hypothèses doivent être repensées. Mais souvent, les ABM produisent des résultats intéressants, qui peuvent être doublés par des résultats analytiques (il devient plus facile de prouver un résultat lorsque celui-ci est connu). Ainsi, a minima, les ABM peuvent être pensés comme des outils puissants permettant de générer des idées.

d.- Objectif de l'étude

Notre objectif, dans le cadre du présent travail, est de développer un cadre d'analyse simplifié, destiné à permettre l'évaluation de stratégies de maîtrise des maladies animales endémiques transmissibles, à l'échelle d'un territoire (petite région agricole).

A cette fin, un modèle multi-agent, s'appuyant sur des hypothèses comportementales simples, est développé puis simulé.

L'efficacité de mesures incitatives, mises en place à l'échelle collective est ensuite évaluée, comparativement à une situation de référence, qui correspond à une situation de prise de décision décentralisée.

2.- Le modèle de base

Le point de départ de ce travail est un modèle d'**automate cellulaire**. Un automate cellulaire consiste en une grille régulière de cellules, caractérisées chacune par un état qui évolue au cours du temps. A chaque pas de temps, l'état d'une cellule est fonction de l'état antérieur de la cellule et de l'état des cellules qui composent son voisinage immédiat. Les mêmes règles sont utilisées pour actualiser simultanément l'ensemble des cellules composant la grille, donnant naissance à une nouvelle génération de cellules. En dépit de leur grande simplicité, les automates cellulaires produisent des comportements macroscopiques, qui peuvent s'avérer complexes. La structure spatio-dynamique est particulièrement importante pour modéliser des processus soumis à des contraintes physiques, comme cela est souvent le cas des systèmes agricoles gérés. En contraste avec les modèles à compartiment (modèles épidémiologiques standards), les automates cellulaires et ABM n'agrègent pas les individus dans des compartiments, mais autorisent les individus à être hétérogènes au regard de leurs attributs. Bien que les modèles d'automates cellulaires aient été utilisés extensivement pour modéliser des processus spatio-dynamiques, leur usage en économie agricole demeure insuffisamment répandu (une application uniquement en santé animale).

a.- Modélisation des comportements individuels

Afin de formaliser les comportements individuels des éleveurs, un modèle microéconomique très simple, inspiré du cadre d'analyse proposé par McInerney, Howe et Schepers (1992), a été développé. Dans ce modèle, 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 élevage (choix binaire/discret). L'éleveur cherche à minimiser le coût économique induit par la maladie. Le coût économique de la maladie (noté C) a deux composantes : des manques à gagner induits par la maladie d'une part (notés L) et des dépenses de maîtrise (notés E) :

$$C = L + E$$

On définit R^{ref} comme le revenu retiré par l'éleveur de l'exploitation en l'absence de maladie pour une période de temps considérée. Du fait de la présence de la maladie, on considère qu'une certaine proportion du revenu, notée γ , est détruite. En l'absence de maîtrise de la maladie, le revenu retiré par l'éleveur de l'exploitation correspond alors à $(1 - \gamma) \cdot R^{ref}$. Le coût économique de la maladie en l'absence de maîtrise de la maladie ($C^{no_control}$) correspond alors simplement aux pertes induites par la maladie (L), l'éleveur ne supportant pas de coût additionnel de maîtrise ($E = 0$) :

$$C^{no_control} = \gamma \cdot R^{ref} \quad \text{avec } 0 \leq \gamma \leq 1$$

Lorsque l'éleveur a la possibilité d'implémenter la mesure de maîtrise, la sévérité de la maladie est atténuée, dans une certaine proportion, notée φ . Le revenu retiré par l'éleveur de l'exploitation lorsqu'il décide de maîtriser la maladie correspond alors à $(1 - (1 - \varphi) \cdot \gamma) \cdot R^{ref}$. Les pertes induites par la maladie correspondent alors à $(1 - \varphi) \cdot \gamma \cdot R^{ref}$. L'éleveur consent en contrepartie une dépense de maîtrise E . Le coût économique de la maladie en cas de maîtrise de la maladie ($C^{control}$)

correspond alors à la somme des pertes induites par la maladie (L) et des coûts induits par la maîtrise de la maladie (E) :

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

L'éleveur décide de maîtriser la maladie lorsque le coût économique de la maladie en situation de maîtrise $C^{control}$ est inférieur au coût économique de la maladie en l'absence de maîtrise :

$$C^{control} < C^{no_control}$$

autrement dit, lorsque :

$$(1 - \varphi) \cdot \gamma \cdot R^{ref} + E < \gamma \cdot R^{ref}$$

En réarrangeant cette équation, il devient possible d'établir que l'éleveur décide d'intervenir pour maîtriser la maladie dès lors que la sévérité de la maladie γ_t excède un certain seuil, qualifié de seuil d'intervention :

$$\gamma > \frac{E}{\varphi \cdot R^{ref}}$$

Ceteris paribus, l'éleveur est d'autant plus enclin à intervenir pour maîtriser la maladie (*i.e.* la valeur du seuil d'intervention est d'autant plus basse) que le coût de la mesure de maîtrise est faible ou que l'efficacité de la mesure de maîtrise est efficace.

Evolution de la sévérité de la maladie. On introduit ensuite dans le modèle la possibilité, pour le paramètre γ , d'évoluer au cours du temps¹. La relation qui régit l'évolution du paramètre de sévérité entre deux pas de temps est la suivante :

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

L'idée sous-jacente dans cette spécification est que la sévérité de la maladie sur l'exploitation est bornée entre 0 (situation correspondant à l'absence de maladie) et un niveau maximal de sévérité, noté γ^{max} (Figure 1a). La convergence vers ce plateau se fait d'autant plus rapidement que la valeur du paramètre r est élevée (Figure 1b).

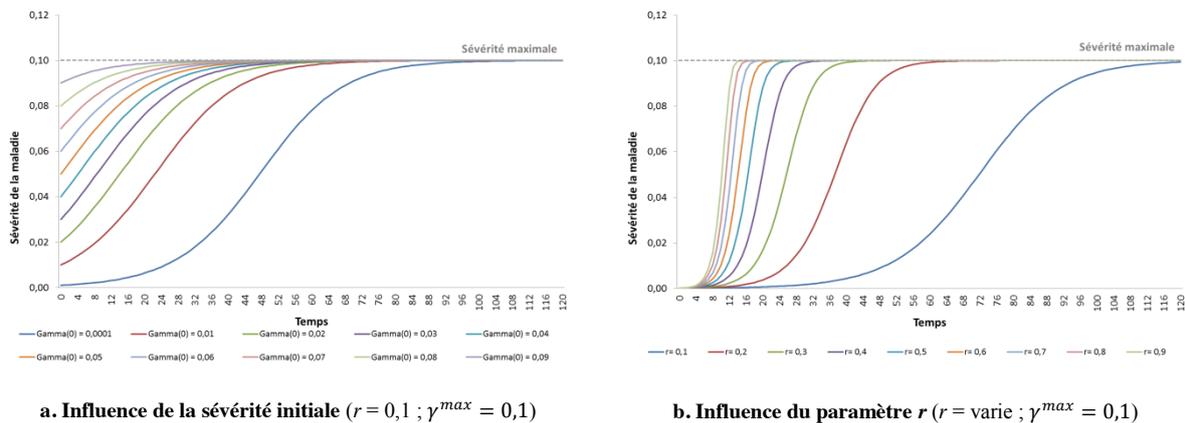


Figure 1. Evolution temporelle de la sévérité de la maladie (absence de stratégie de maîtrise)

¹ Par souci de simplicité, on considère que le revenu de référence (R^{ref}) et le montant de la dépense de maîtrise (E) sont invariants au cours du temps. L'efficacité de la mesure de maîtrise (φ) est également supposée invariante au cours du temps et indépendante du niveau de sévérité de la maladie.

Comme indiqué précédemment, l'éleveur a la possibilité, à chaque pas de temps, d'agir pour maîtriser la maladie dans son troupeau. L'implémentation d'une mesure de maîtrise lui permet de réduire, dans une certaine proportion φ les pertes induites par la maladie. La mesure de maîtrise est d'autant plus efficace que la valeur prise par le paramètre est élevée. Lorsque l'efficacité de la mesure est limitée, la spécification retenue permet de rendre compte de situations dans lesquelles l'implémentation de la mesure à chaque pas de temps ne permet que de stabiliser la situation sanitaire de l'élevage ou de contenir la sévérité de la maladie à un niveau inférieur à γ^{max} (Figure 2).

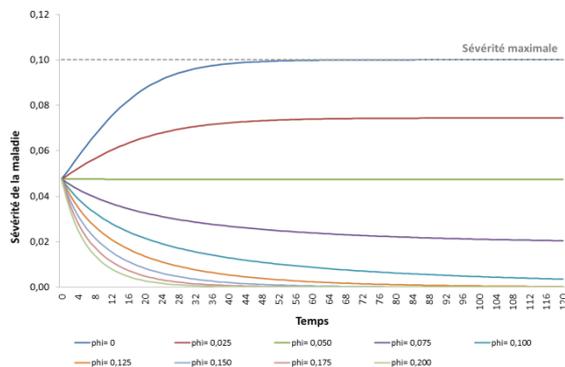


Figure 2. Evolution temporelle de la sévérité de la maladie (absence de stratégie de maîtrise) selon la valeur du paramètre φ ($r = 0,1$; $\gamma^{max} = 0,1$; φ varie)

Gestion de la maladie à l'échelon individuel. L'éleveur décidera ainsi d'implémenter la mesure de maîtrise lorsque :

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

autrement dit lorsque :

$$-\frac{r}{\gamma^{max}} \cdot \gamma_{t-1}^2 + (1+r) \cdot \gamma_{t-1} - \frac{E}{\varphi \cdot R^{ref}} > 0$$

En calculant les racines du polynôme, il devient possible de définir un seuil de sévérité de la maladie, au-delà duquel l'éleveur décide d'implémenter la mesure de maîtrise² :

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

La valeur de ce seuil est influencée positivement par le montant de la dépense de maîtrise (E) et négativement par l'efficacité de la mesure de maîtrise (φ). Autrement dit, l'éleveur sera – toutes choses égales par ailleurs – d'autant plus enclin à implémenter la mesure de maîtrise que le coût de la mesure est faible ou que son efficacité est élevée.

Plusieurs cas de figure peuvent alors survenir.

² L'existence du seuil d'intervention est garantie dès lors que :

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

Le premier cas de figure correspond à une situation dans laquelle la valeur du seuil demeure supérieure au niveau maximal de sévérité de la maladie γ^{max} (Figure 3). Dans cette configuration, l'élève n'aura aucun intérêt à implémenter la mesure de maîtrise. La sévérité de la maladie converge alors vers le niveau maximal de sévérité γ^{max} .

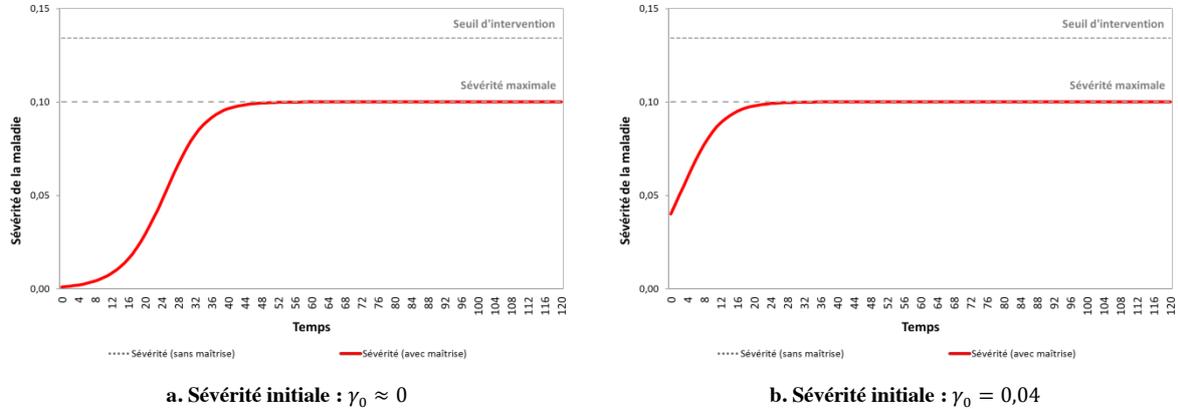


Figure 3. Evolution de la sévérité de la maladie lorsque la valeur du seuil est supérieure à la sévérité maximale de la maladie ($r = 0,2$; $\varphi = 0,08$; $R^{ref} = 100$; $E = 1$; $\gamma^{max} = 0,1$). Valeur du seuil d'intervention : 0,1342

Lorsque la valeur du seuil est comprise entre 0 et γ^{max} l'élève implémentera la mesure de maîtrise. Lorsque le niveau initial de sévérité de la maladie est faible, l'élève laissera dans un premier temps la situation se dégrader (accroissement de la sévérité de la maladie), avant de se décider à agir pour maîtriser la maladie. Lorsque le niveau initial de sévérité de la maladie est supérieur au seuil d'intervention, l'élève 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 dans le niveau de sévérité de la maladie autour de la valeur du seuil d'intervention (Figure 4).

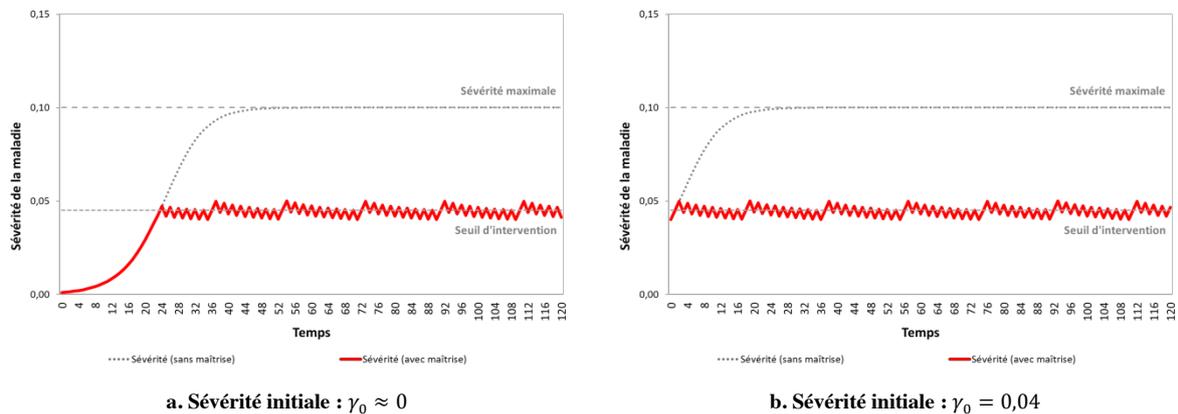


Figure 4. Evolution de la sévérité de la maladie lorsque la valeur du seuil est inférieure à la sévérité maximale de la maladie ($r = 0,2$; $\varphi = 0,2$; $R^{ref} = 100$; $E = 1$; $\gamma^{max} = 0,1$). Valeur du seuil d'intervention : 0,0450

Lorsque l'efficacité de la mesure de maîtrise n'est pas suffisante pour ramener le niveau de sévérité de la maladie en deçà du seuil d'intervention (*i.e.* l'efficacité de la maîtrise insuffisante au regard de la capacité de la maladie à se diffuser), l'élève implémentera à chaque pas de temps la mesure de maîtrise. La sévérité de la maladie convergera alors vers un certain niveau de sévérité, correspondant à $\gamma^* = \gamma^{max} \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{r \cdot (1 - \varphi)}\right)$ et inférieur au niveau de sévérité maximal γ^{max} (Figure 5).

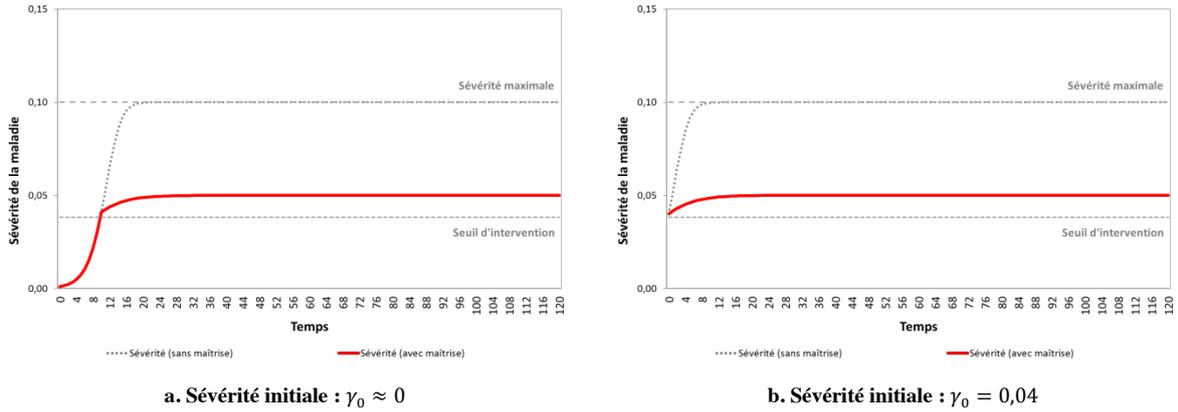


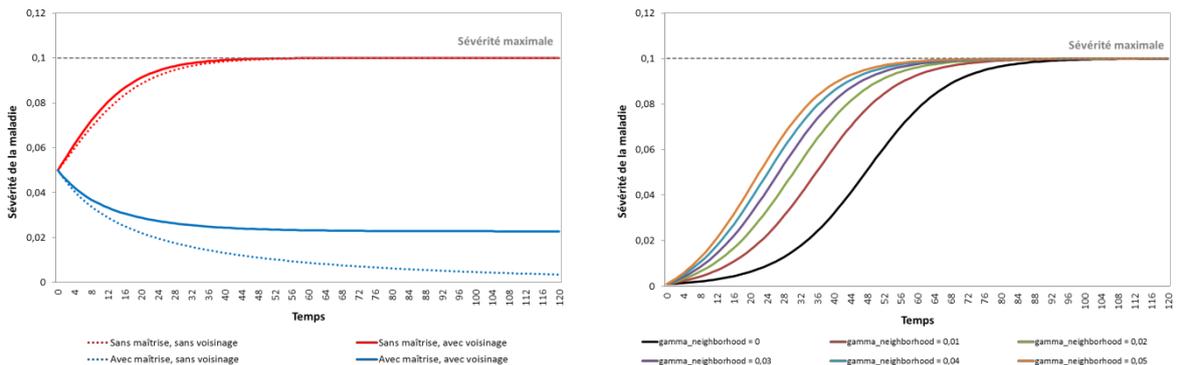
Figure 5. Evolution de la sévérité de la maladie lorsque la valeur du seuil est inférieure à la sévérité maximale de la maladie ($r = 0,5$; $\varphi = 0,2$; $R^{ref} = 100$; $E = 1$; $\gamma^{max} = 0,1$). Valeur du seuil d'intervention : 0,0382

b.- Spatialisation du modèle

On introduit ensuite dans le modèle la possibilité pour la maladie de se transmettre par le voisinage. Très simplement, on suppose que la sévérité de la maladie à l'échelle d'un élevage est mécaniquement impactée par la sévérité moyenne de la maladie dans les élevages voisins. La relation décrivant l'évolution au cours du temps de la sévérité de la maladie est modifiée comme suit :

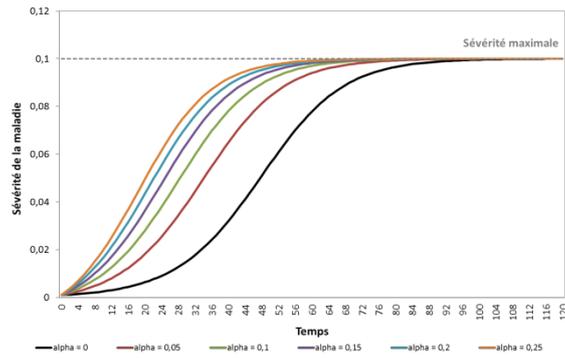
$$\gamma_t = \gamma_{t-1} + r \cdot (\gamma_{t-1} + \alpha \cdot \bar{\gamma}_{t-1}^{neighborhood}) \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{t-1}}{\gamma^{max}}\right)$$

où $\bar{\gamma}_{t-1}^{neighborhood}$ désigne la sévérité moyenne de la maladie dans les élevages voisins et α un paramètre destiné à pondérer l'influence du voisinage sur la diffusion spatiale de la maladie. L'idée sous-jacente dans cette spécification est que lorsque la sévérité moyenne de la maladie est nulle dans les exploitations du voisinage, la sévérité de la maladie n'est pas impactée dans le troupeau considéré, tandis que lorsque la sévérité de la maladie moyenne de la maladie dans le voisinage est importante, la sévérité de la maladie est accrue dans le troupeau considéré.



($r = 0,1$; $\alpha = 0,2$; $\gamma^{max} = 0,1$; $\bar{\gamma}^{neighborhood} = 0,05$; $\varphi = 0,1$)

($r = 0,1$; $\alpha = 0,2$; $\gamma^{max} = 0,1$; $\bar{\gamma}^{neighborhood}$ varie)



c. Influence du paramètre α sur la diffusion de la maladie
 ($r = 0,1$; $\alpha = \text{varie}$; $\gamma^{max} = 0,1$; $\bar{\gamma}^{neighborhood} = 0,05$)

Figure 6. Influence du voisinage sur la diffusion de la maladie

Dans le modèle simulé, le voisinage considéré est un voisinage de Moore (Figure 7). La valeur de $\bar{\gamma}^{neighborhood}$ correspond à la sévérité moyenne de la maladie observée dans les 8 cellules adjacentes.

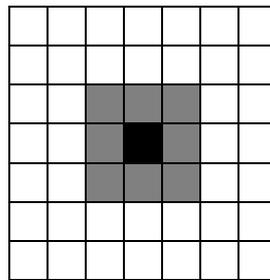


Figure 7. Voisinage de Moore (8 voisins)

Le processus spatial de diffusion de la maladie est illustré par la Figure 8. Dans la situation initiale, un élevage impacté par la maladie est introduit au centre de la grille. A partir de ce foyer originel, la maladie va alors se diffuser aux élevages voisins, pour concerner (après un certain laps de temps) l'ensemble des élevages présents dans la zone considérée, lorsqu'aucun effort de maîtrise de la maladie n'est entrepris.

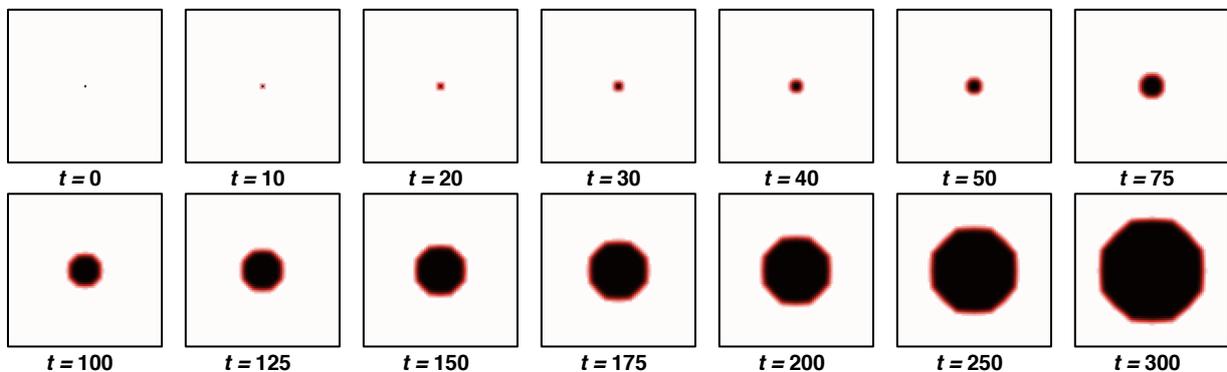


Figure 8. Diffusion spatiale de la maladie à l'échelle du territoire
 ($r = 0,1$; $\alpha = 0,2$; $\gamma^{max} = 0,1$)

Gestion de la maladie à l'échelon individuel

Comme précédemment, l'éleveur décidera de maîtriser la maladie lorsque le coût économique de la maladie en situation de maîtrise ($C^{control}$) est inférieur au coût économique de la maladie en l'absence de maîtrise ($C^{no_control}$) :

$$C^{control} < C^{no_control}$$

L'éleveur décide d'implémenter la mesure de maîtrise si :

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

ou :

$$\left(-\frac{r}{\gamma^{max}}\right) \cdot \gamma_{t-1}^2 + \left(1 + r \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot \bar{\gamma}_{t-1}^{neighborhood}}{\gamma^{max}}\right)\right) \cdot \gamma_{t-1} + \left(r \cdot \alpha \cdot \bar{\gamma}_{t-1}^{neighborhood} - \frac{E}{\varphi \cdot R^{ref}}\right) > 0$$

En calculant les racines du polynôme, il devient possible, comme dans le modèle non spatialisé, de définir le seuil de sévérité de la maladie au-delà duquel l'éleveur décide d'implémenter la mesure de maîtrise :

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

Il convient de noter que la valeur du seuil d'intervention est influencée négativement par la situation sanitaire du voisinage. Une sévérité moyenne de la maladie élevée dans le voisinage tend à abaisser le seuil d'intervention, autrement dit à rendre les éleveurs plus enclins à s'engager dans la maîtrise de la maladie. Enfin, il convient de souligner que dans la mesure où $\bar{\gamma}_{t-1}^{neighborhood}$ intervient dans la définition du seuil, l'incitation à intervenir pour maîtriser la maladie est variable selon les éleveurs, puisqu'elle dépend du contexte 'local' (situation sanitaire propre et situation sanitaire dans le voisinage).

Par souci de réalisme, une hypothèse additionnelle a été réalisée pour la simulation du modèle concernant l'existence d'un seuil d'extinction de la maladie (*i.e.* en-deçà d'un certain seuil de sévérité de la maladie, la maladie s'éteint). Ce seuil a été fixé arbitrairement à 0,01 dans le modèle. Dans le même ordre d'idée, afin de permettre à la maladie de reprendre sa circulation dans l'environnement, on a considéré que lorsque la sévérité moyenne de la maladie dans le voisinage excédait un seuil de reprise de circulation de la maladie, le troupeau considéré était à nouveau touché par la maladie. Ainsi, dans les modèles simulés, lorsque la sévérité moyenne de la maladie dans le voisinage excède 0,01, la sévérité moyenne de la maladie dans le troupeau considéré s'établit arbitrairement à 0,01 (si le troupeau n'est pas infecté).

3.- Simulation du modèle

Les simulations présentées dans ce travail ont été menées en utilisant la plateforme de modélisation multi-agents NetLogo (Figure 9).

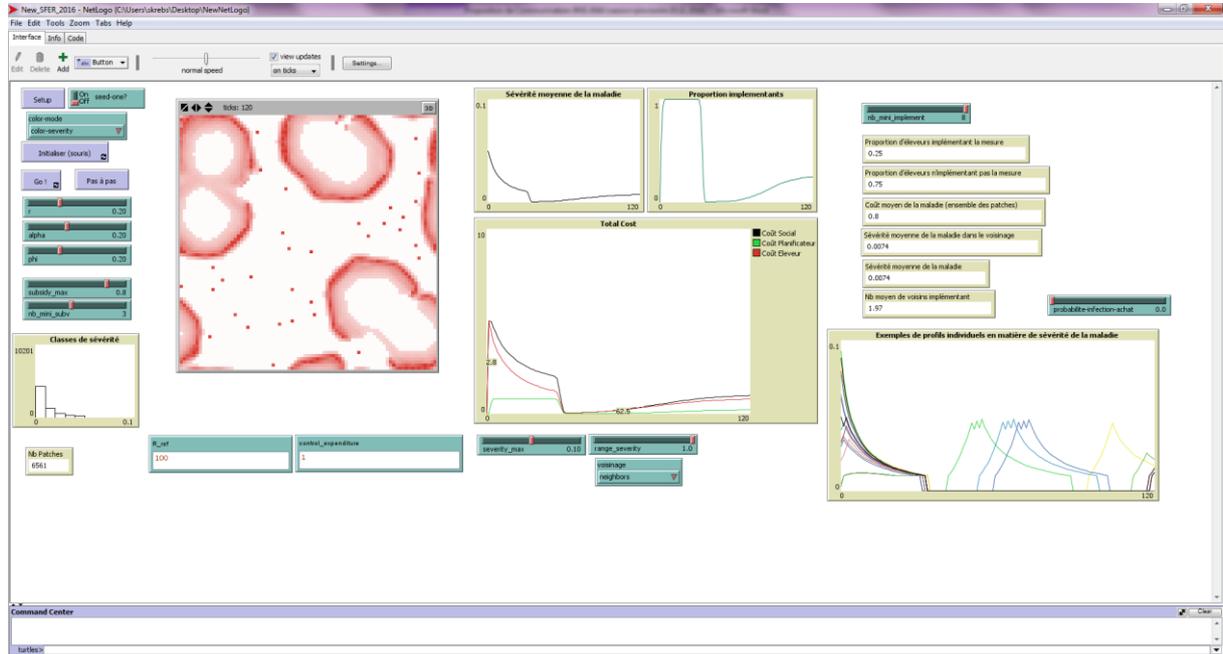


Figure 9. Interface du logiciel NetLogo

Le Tableau 1 synthétise les valeurs des paramètres employés dans les simulations.

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

Tableau 1. Valeurs des paramètres employés dans les simulations

Dans les différents scénarii testés, il a été fait l'hypothèse que tous les élevages présents sur le territoire considéré étaient identiques (en termes de taille de troupeau, de comportement modélisé, etc.), l'unique source d'hétérogénéité étant le niveau initial de sévérité de la maladie. Pour la simulation, un niveau de sévérité initiale est généré pour chaque cellule composant la grille de manière aléatoire (Figure 10). Sur cette figure, la teinte des cellules est d'autant plus foncée que la sévérité de la maladie est proche de γ^{max} (les cellules teintées en blanc matérialisant des élevages non touchés par la maladie).

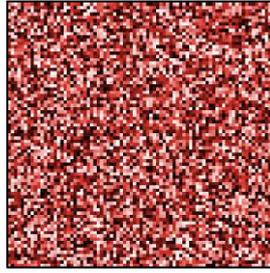
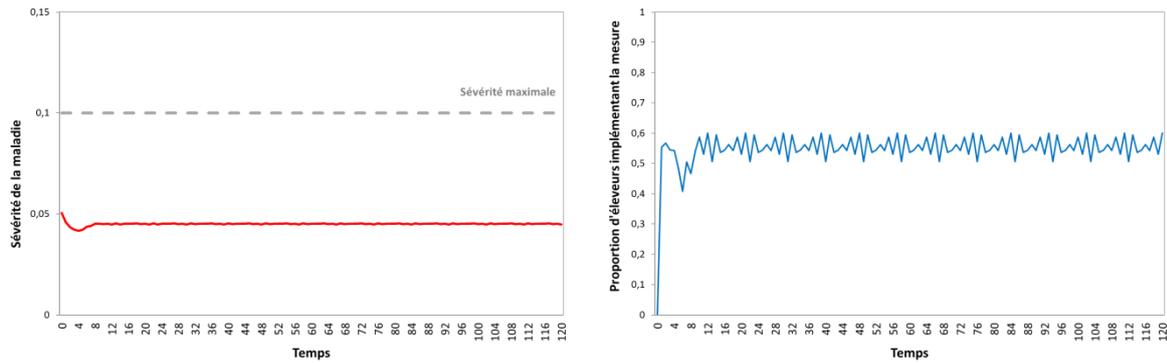


Figure 10. Situation initiale
(Taille de la grille : $81 \times 81 = 6561$ cellules).

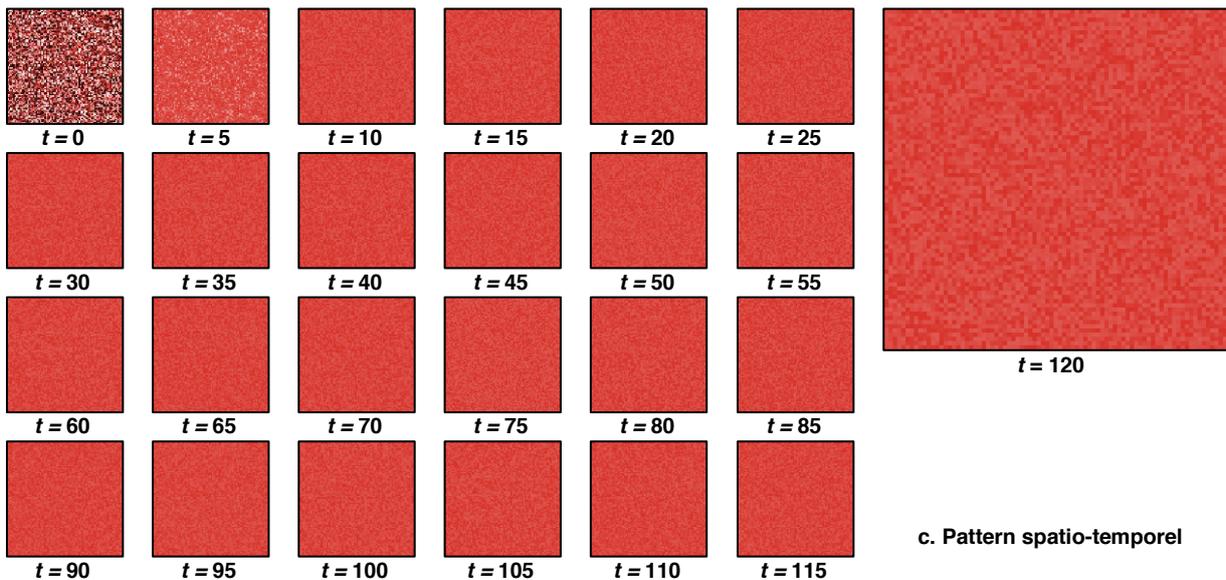
a.- Scénario 1. Situation de ‘Laissez-faire’

Le premier scénario examiné correspond à une situation de ‘Laissez-faire’. Dans ce scénario, chaque éleveur décide d’implémenter (ou non) la mesure de maîtrise, en comparant la sévérité de la maladie dans le troupeau au seuil d’intervention. A l’échelle macroscopique, l’implémentation de la mesure par les éleveurs débouche sur une réduction de la sévérité moyenne de la maladie à l’échelle de la zone géographique concernée. Elle converge alors vers un niveau de sévérité correspondant au seuil d’intervention (Figure 11a). Avec le jeu de paramètres employé pour la simulation de ce scénario, la proportion d’éleveurs qui implémente la mesure de maîtrise tend à osciller autour de 55%, avec des, avec un profil en dents de scie (Figure 11b.). En termes de pattern spatio-temporel, on note une tendance à l’homogénéisation de la situation sanitaire des élevages.



a. Sévérité moyenne de la maladie

b. Proportion d’éleveurs implémentant la mesure de maîtrise



c. Pattern spatio-temporel

Figure 11. Scénario 1 : ‘Laissez-faire’

Ces résultats servent de scénario de référence pour la suite de l'analyse.

b.- Scénario 2. Interactions entre éleveurs : 'Mimétisme'

Le second scénario testé cherche à tenir compte des interactions potentielles entre les acteurs. Dans ce scénario ('Mimétisme'), on considère qu'un éleveur décide d'implémenter la mesure de maîtrise :

- lorsque la sévérité de la maladie dans le troupeau excède le seuil d'intervention (quelle que soit la situation sanitaire des troupeaux voisins) ;
- **ou** lorsqu'un nombre minimum de voisins (noté *nb_mini_implement*) implémente la stratégie de maîtrise et que le niveau moyen de sévérité de la maladie dans le voisinage est non nul. Le nombre requis de voisins implémentant la stratégie de voisinage est paramétrable dans le modèle.

Lorsqu'aucune de ces conditions n'est satisfaite, l'éleveur ne fait rien pour maîtriser la maladie.

Afin d'illustrer le propos, on considère tout d'abord une situation dans laquelle l'éleveur décide d'implémenter la stratégie de maîtrise lorsque la moitié au moins de ses voisins implémente la mesure de maîtrise (*nb_mini_implement* = 4). Les résultats obtenus font apparaître qu'une éradication de la maladie peut alors être obtenue à l'échelle du territoire (Figure 12).

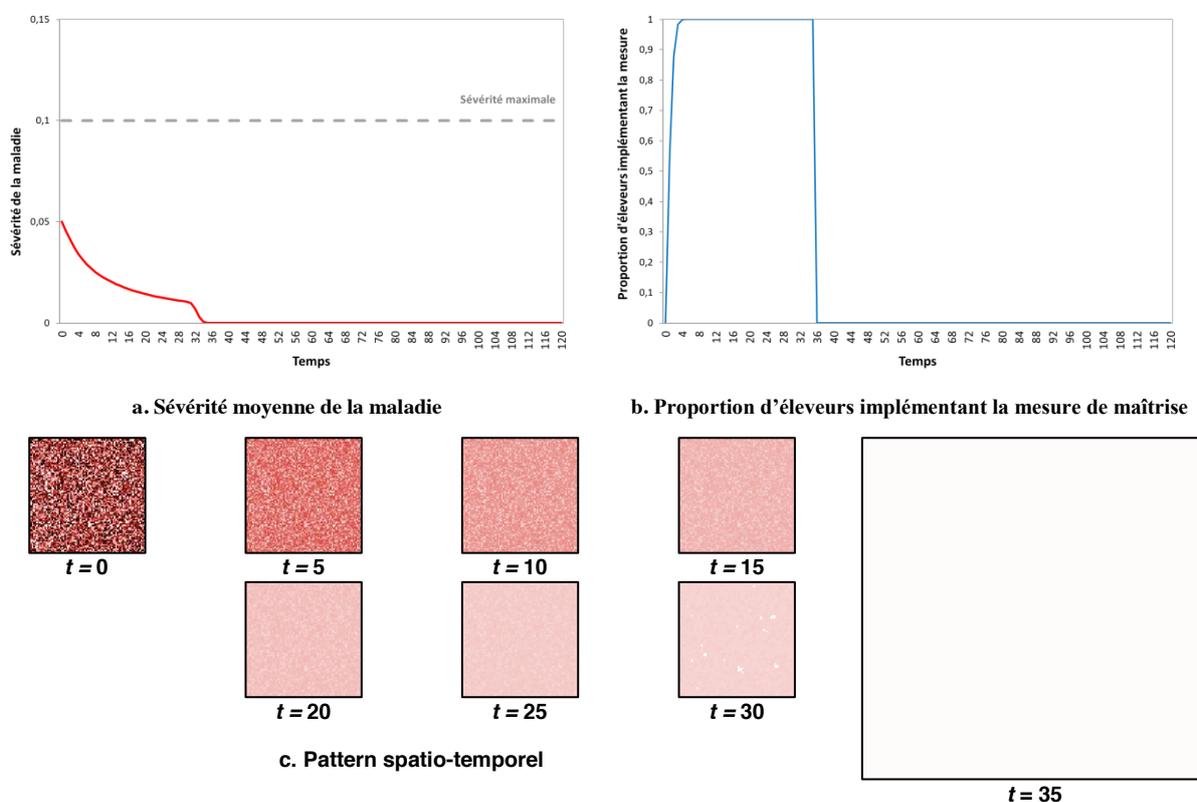
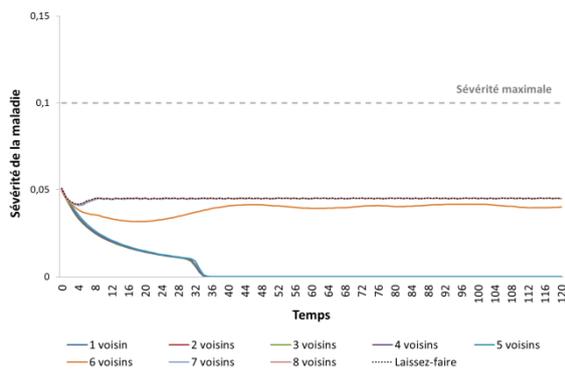


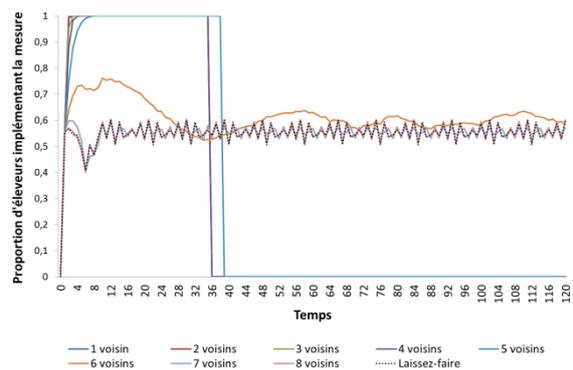
Figure 12. Scénario 2 : Interactions entre éleveurs ('mimétisme')

En simulant le modèle pour différentes valeurs de *nb_mini_implement*, il devient possible d'identifier le nombre minimum de voisins requis pour parvenir à une éradication de la maladie à l'échelle du territoire.

Dans des conditions restrictives (*nb_mini_implement* = 7 ou *nb_mini_implement* = 8), l'éradication de la maladie ne peut être obtenue et les résultats produits par la simulation du modèle tendent à se rapprocher de ceux obtenus dans le scénario de référence (situation de laissez-faire). Dans les autres cas de figure (i.e. *nb_mini_implement* ≤ 5), l'éradication de la maladie à l'échelle du territoire peut être obtenue (Figure 13). Lorsque *nb_mini_implement* = 6, la situation obtenue correspond à une situation intermédiaire (diffusion par vague de la sévérité à l'échelle du territoire).



a. Sévérité moyenne de la maladie selon la valeur de *nb_mini_implement*



b. Proportion d'éleveurs implémentant la mesure de maîtrise selon la valeur de *nb_mini_implement*

Figure 13. Scénario 2 : Interactions entre éleveurs ('mimétisme')

De manière à faciliter la comparaison des résultats obtenus avec ceux obtenus dans le scénario de référence, un indicateur de coût social de la maladie a été calculé. L'indicateur retenu correspond à la somme actualisée des coûts induits par la maladie à l'échelle du territoire, sur un horizon temporel de 120 périodes. L'indicateur de coût social de la maladie a ensuite été normalisé, en prenant pour valeur de référence 100 la valeur de l'indicateur obtenue pour le scénario de référence (situation de 'Laissez-faire').

	1 voisin	2 voisins	3 voisins	4 voisins	5 voisins	6 voisins	7 voisins	8 voisins
Coût social de la maladie	19,34	19,38	19,22	19,42	20,33	88,90	99,77	99,96

Tableau 2. Scénario 2 : Interactions entre éleveurs ('mimétisme')
(les cases colorées en vert correspondent à des situations dans lesquelles l'éradication est atteinte)

La prise en compte par l'éleveur des actions de maîtrise entreprises dans le voisinage, lorsqu'elles débouchent sur une éradication de la maladie (i.e. lorsque *nb_mini_implement* < 6), permet de diviser par 5 environ le coût social de la maladie (Tableau 2). Malheureusement, il demeure peu vraisemblable que les éleveurs intègrent, de manière spontanée et de leur propre chef, les efforts de maîtrise entrepris par leurs voisins dans leur propre processus de prise de décision.

c.- Scénario 3. Gestion collective : Subventionnement de la stratégie de maîtrise

Un gestionnaire collectif, agissant comme un planificateur social (ou un dictateur bienveillant), est ensuite introduit dans le modèle. Ce gestionnaire peut décider de subventionner la mesure de maîtrise, afin d'améliorer le bien-être des éleveurs représentés sur le territoire.

Il peut, par exemple, subventionner intégralement la mesure de maîtrise (i.e. en prenant intégralement en charge la dépense de maîtrise de la maladie).

Les résultats obtenus font alors apparaître, à l'instar de ce qui avait été obtenu dans le scénario 2, une possibilité d'éradiquer la maladie à l'échelle du territoire (Figure 14).

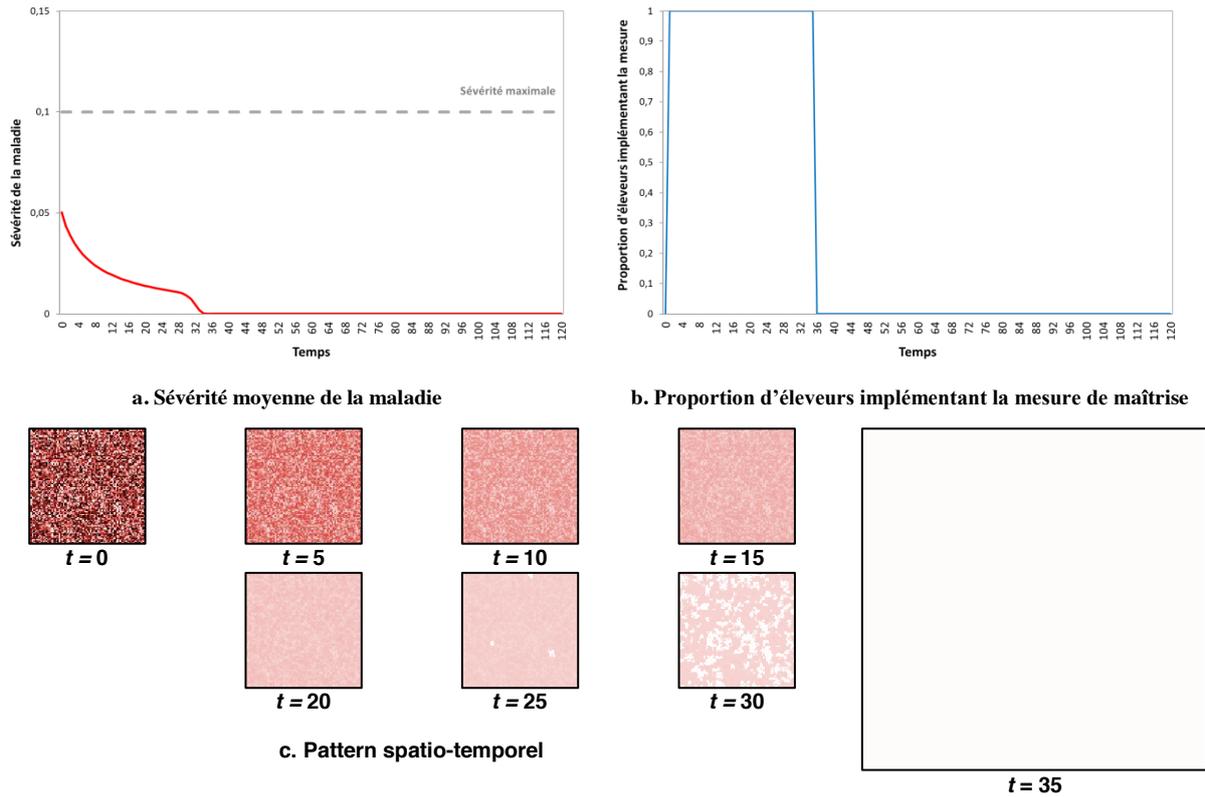


Figure 14. Scénario 3 : Subventionnement intégral de la mesure de maîtrise par le planificateur social

Ce subventionnement intégral de la mesure, s’il autorise l’éradication de la maladie à l’échelle du territoire, a néanmoins un coût potentiellement important pour le planificateur social.

Afin de minimiser le coût social de la maladie (et de limiter les ressources allouées par le planificateur social à la maîtrise de la maladie), des simulations ont été réalisées en considérant différents niveaux de subventionnement de la mesure de maîtrise par le planificateur social. Les résultats des simulations font apparaître que l’éradication de la maladie est obtenue pour tout niveau de subventionnement supérieur à 0,8 (Figure 15). Pour des niveaux plus faibles de subventionnement, la situation tend à se rapprocher de celle obtenue dans le scénario de référence (situation de ‘Laissez-faire’). En contribuant à abaisser la valeur du seuil d’intervention des élèves, le subventionnement de la mesure de maîtrise contribue à une diminution de la sévérité moyenne de la maladie à l’échelle du territoire. Ce niveau moyen de sévérité est d’autant plus faible que le montant de la subvention est élevé.

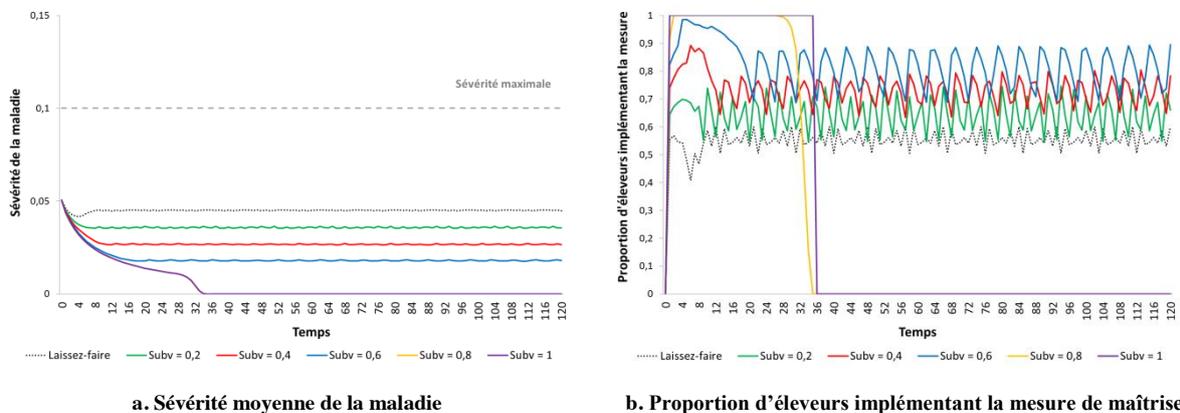


Figure 15. Scénario 3 : Subventionnement de la mesure de maîtrise par le planificateur social

En intégrant les ressources allouées par le planificateur social dans le coût social de la maladie, les résultats font apparaître que le coût social de la maladie est minimisé, pour un niveau de subventionnement de 0,8 (Tableau 3).

Afin de hiérarchiser les différents niveaux de subventionnement, un second indicateur peut être construit. Il s'agit du ratio bénéfice-coût. Cet indicateur vise à identifier le niveau de subventionnement présentant le meilleur retour sur investissement pour le planificateur social.

	Montant de la subvention									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Coût social	91,95	84,07	76,97	68,93	61,94	54,83	48,09	18,25	18,34	18,84
Ratio bénéfice-coût	6,78	6,22	5,63	0,45	4,91	4,59	4,27	16,31	14,42	11,92

Tableau 3. Scénario 3 : Subventionnement de la mesure de maîtrise par le planificateur social (les cases colorées en vert correspondent à des situations dans lesquelles l'éradication est atteinte)

Pour la construction de cet indicateur, le coût considéré est constitué des ressources engagées par le planificateur social. Le bénéfice est défini comme la réduction du manque à gagner induit par la maladie permis par la maîtrise de cette dernière. Il est obtenu en soustrayant du coût social de la maladie correspondant à la situation de référence ('Laissez-faire') le coût social obtenu pour les différents niveaux de subventionnement considérés. De la lecture du Tableau 3, il ressort que le ratio bénéfice-coût le plus élevé est obtenu pour un niveau de subventionnement de 0,8 : un euro investi par le planificateur social dans la maîtrise collective de la maladie permet de réduire le manque à gagner induit par la maladie de 16,31 (sur l'horizon de 120 périodes de temps considéré).

d.- Scénario 4. Subventionnement conditionnel de la mesure de maîtrise

Le scénario 4 s'intéresse à un système incitatif plus sophistiqué, dans lequel le planificateur social subventionne la mesure de maîtrise, mais conditionne ce subventionnement au nombre de voisins implémentant la mesure. En d'autres termes, l'éleveur ne bénéficie du montant de la subvention que si dans son voisinage, un nombre donné de voisins implémente la mesure de maîtrise. Ce système incitatif cherche à promouvoir des synergies locales en matière de gestion de la maladie. Plus les conditions fixées par le planificateur social sont restrictives (nombre élevé de voisins implémentant la mesure exigé pour le versement de la subvention, noté nb_mini_subv), plus le coût du système mis en place sera faible pour le planificateur social. Moins les conditions sont restrictives (nombre réduit de voisins implémentant la mesure exigé pour le versement de la subvention), plus les coûts du système incitatif sera élevé pour le planificateur social.

La Figure 16 illustre le type de résultats obtenus (patterns spatio-temporels diversifiés), en considérant un niveau de subventionnement de 0.8 et différents niveaux de conditionnement de la subvention.

Lorsque les conditions fixées par le planificateur social pour le versement de la subvention sont restrictives ($nb_mini_subv = 7$ ou 8), la situation sanitaire à l'échelle macroscopique tend initialement à s'améliorer, avant de produire, après un certain laps de temps, des patterns comparables à ceux obtenus dans le scénario de référence (situation de 'Laissez-faire').

Lorsque le planificateur relâche les conditions ($nb_mini_subv = 6$), la situation sanitaire s'améliore temporairement. On observe ensuite à l'échelle macroscopique des fluctuations en matière de sévérité de la maladie, liées à des processus de diffusion de la maladie par vagues.

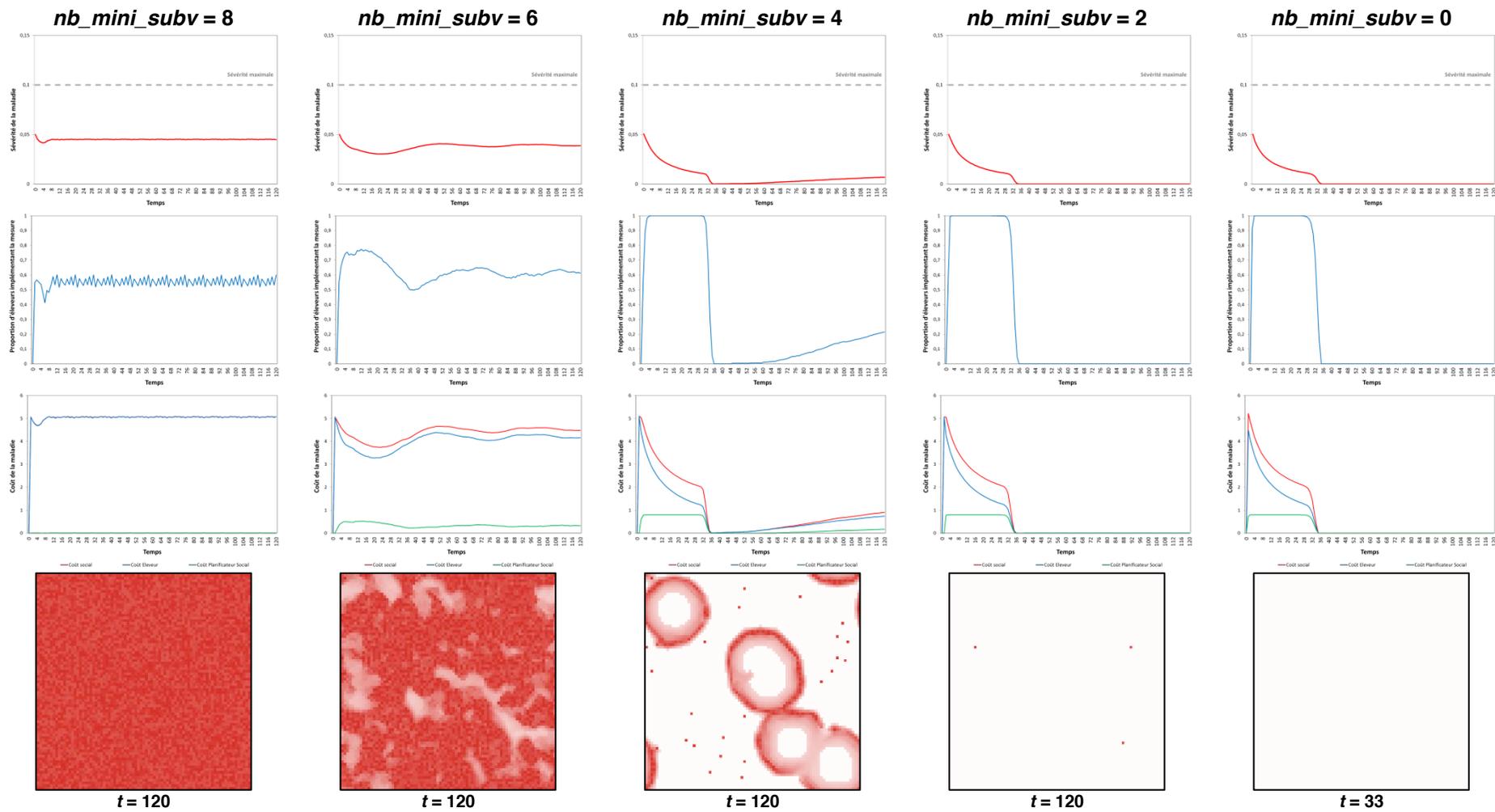


Figure 16. Scénario 4 : Subventionnement conditionnel de la mesure de maîtrise

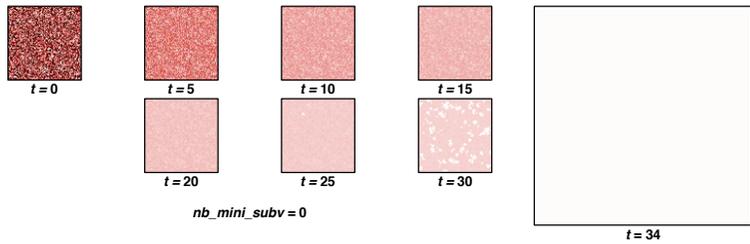
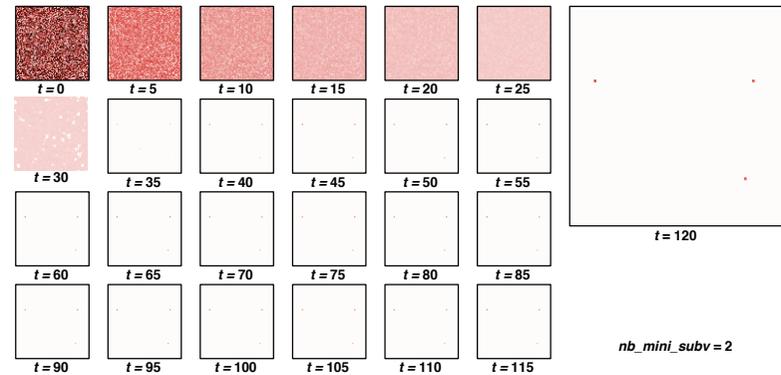
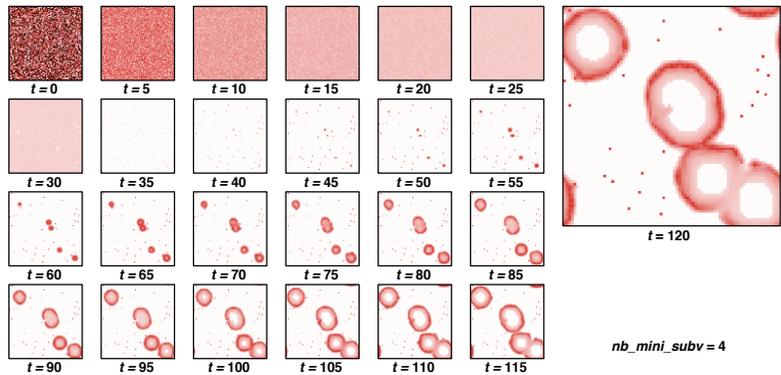
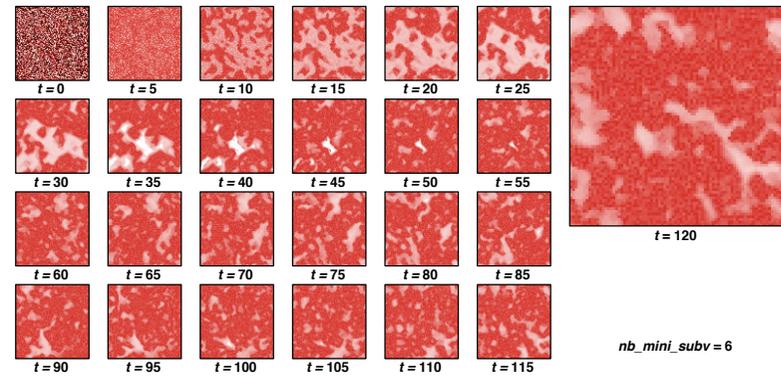
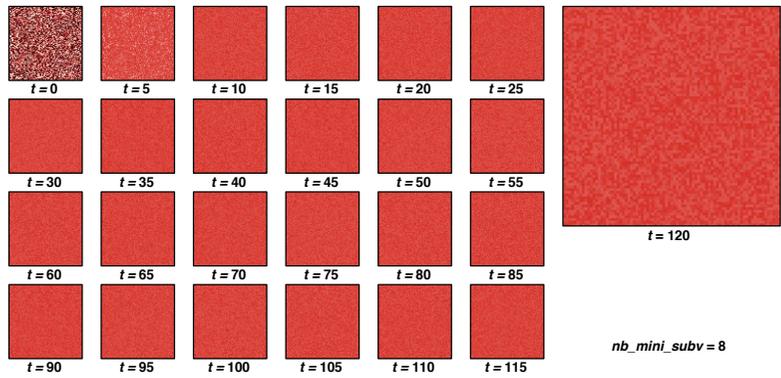


Figure 16. Scénario 4 : Subventionnement conditionnel de la mesure de maîtrise (suite)

Lorsque $nb_mini_subv = 2, 3, 4$ ou 5 , le subventionnement par le planificateur social permet d'améliorer nettement la situation sanitaire à l'échelle du territoire. Néanmoins, des foyers résiduels de maladie subsistent, permettant une reprise de circulation de la maladie à l'échelle du territoire pour $nb_mini_subv = 4$ ou 5 .

Pour des niveaux de conditionnement faiblement exigeants ($nb_mini_subv = 0$ ou 1), l'éradication de la maladie est obtenue après un certain laps de temps.

Comme précédemment (scénario 3), le modèle peut ensuite être employé pour hiérarchiser les résultats obtenus (minimisation du coût social de la maladie), en considérant différents niveaux de subventionnement et différents niveaux de conditionnement de ce subventionnement. Les résultats obtenus (Tableau 4) font apparaître que le coût social de la maladie est minimisé pour un subventionnement intégral de la mesure de maîtrise par le planificateur social à hauteur de $0,8$. Ce subventionnement intégral se traduit par une éradication de la maladie à l'échelle du territoire considéré.

		Montant de la subvention										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$nb_mini_subv =$	0	100	92,0	84,1	77,1	68,9	61,9	54,8	48,1	18,1	18,2	18,8
	1	100	92,0	84,1	77,0	69,0	62,1	55,0	48,4	18,8	18,9	19,3
	2	100	92,0	84,1	77,1	69,1	62,0	55,0	48,4	18,8	18,8	19,3
	3	100	92,1	84,2	77,2	69,1	62,1	55,1	48,4	19,4	19,1	19,3
	4	100	92,8	85,2	77,7	69,3	62,2	55,2	48,6	24,0	26,3	19,4
	5	100	96,7	92,2	87,9	82,4	76,5	70,6	64,4	32,4	30,2	20,2
	6	100	98,2	97,3	96,0	94,7	93,0	90,5	87,3	87,1	84,7	87,0
	7	100	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,7	99,7
	8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 4. Coût social de la maladie (Scénario 4 : Subventionnement conditionnel de la mesure de maîtrise)
(les cases colorées en vert correspondent à des situations dans lesquelles l'éradication est atteinte)

En se plaçant du point de vue du planificateur social (Tableau 5), les paramètres du système d'incitation présentant le meilleur ratio bénéfice-coût correspondent à un subventionnement de $0,8$, octroyé dès lors que deux éleveurs du voisinage au moins implémentent la mesure de maîtrise. Pour ce jeu de paramètres du système incitatif, l'éradication de la maladie n'est cependant pas obtenue (persistance de foyers résiduels de maladie à l'échelle du territoire considéré).

		Montant de la subvention									
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$nb_mini_subv =$	0	6,74	6,19	5,60	5,32	4,91	4,58	4,27	16,38	14,49	11,91
	1	6,85	6,26	5,66	5,34	4,93	4,61	4,28	16,42	14,56	12,21
	2	6,84	6,26	5,65	5,33	4,95	4,61	4,29	16,45	14,63	12,22
	3	6,77	6,21	5,62	5,34	4,94	4,60	4,29	16,11	14,53	12,26
	4	6,25	5,94	5,55	5,32	4,94	4,60	4,28	13,41	10,79	12,32
	5	3,57	4,14	3,88	3,81	3,81	3,56	3,53	10,08	9,76	11,76
	6	4,03	2,61	2,26	2,09	2,03	2,07	2,16	1,97	1,98	1,58
	7	2,09	1,23	0,81	0,55	0,55	0,42	0,38	0,30	0,32	0,29
	8	0,13	1,25	-0,17	-0,22	0,28	0,32	0,33	0,46	0,06	0,09

Tableau 5. Ratio bénéfice-coût (Scénario 4 : Subventionnement conditionnel de la mesure de maîtrise)
(les cases colorées en vert correspondent à des situations dans lesquelles l'éradication est atteinte)

4.- Conclusion

Dans la présente communication, un cadre d'analyse a été proposé afin d'évaluer différentes stratégies de maîtrise des maladies animales endémiques transmissibles à l'échelle d'une petite région agricole. A cette fin, un modèle multi-agent, reposant sur une formalisation simple des comportements des agents (éleveurs), a été développé puis simulé, en considérant différents scénarii (laissez-faire, interactions entre éleveurs, différentes modalités de subventionnement de la mesure de maîtrise par un planificateur social). Les résultats obtenus ont notamment permis de mettre en évidence la possibilité d'émergence de divers patterns spatio-temporels, en termes d'évolution de la sévérité de la maladie à l'échelle de la zone géographique considérée. Les travaux réalisés ont également permis d'évaluer l'efficacité puis de hiérarchiser différentes modalités de maîtrise collective de la maladie. Ce travail ne constitue cependant qu'une première étape, à portée illustrative. L'analyse se doit notamment d'être prolongée, par une exploration plus exhaustive de différents contextes épidémiologiques (diffusion lente, modérée ou rapide de la maladie à l'échelle du territoire considéré), ainsi que différents niveaux d'efficacité de la mesure de maîtrise (efficacité faible, moyenne, élevée).

Sur la base du travail réalisé, un certain nombre d'enrichissements sont également envisagés. Les extensions du modèle portent sur la modélisation du comportement des agents (relâchement des hypothèses de rationalité et d'information parfaite, prise en compte de phénomènes d'apprentissage, de l'attitude vis-à-vis du risque des éleveurs, ...), la modélisation des interactions entre agents (comportements stratégiques, mouvements d'animaux entre fermes susceptibles de contribuer à la diffusion de la maladie, ...), la modélisation du comportement du planificateur (en tenant en particulier compte du fait que les ressources à sa disposition sont limitées) ou encore la représentation de l'espace dans le modèle (situations sanitaires géographiquement contrastées, densité d'élevage variables, ...).

5.- Références bibliographiques

- **Epanchin-Niell R.S. et Wilen J.E. (2015).** Individual Cooperative Management of Invasive Species in Human-mediated Landscapes, *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 97(1), pp. 180-198
- **Epanchin-Niell R.S., Hufford M.B., Aslan C.E., Sexton J.P., Port J.D. et Waring T.M. (2010).** Controlling invasive species in complex social landscapes, *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 8(4), pp. 210-216
- **Epstein J.M. et Axtell R. (1996).** *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, MIT Press, 224 p.
- **Kuran T. (2008).** Thomas Schelling in Durlauf, S.N. et Blum, L.E. [Eds] *The New Palgrave Dictionary of Economics (2nd Edition)*, Palgrave Macmillan.
- **McInerney J.P., Howe K.S., Schepers J.A. (1992).** A framework for the economic analysis of disease in farm livestock, *Preventive Veterinary Medicine*, Vol. 13(2), pp. 137-154.
- **Page S.E. (2008).** Agent-based models in Durlauf, S.N. et Blum, L.E. [Eds] *The New Palgrave Dictionary of Economics (2nd Edition)*, Palgrave Macmillan.
- **Rault A. et Krebs S. (2013).** Farmers' willingness to vaccinate against endemic animal diseases: A theoretical approach, 14th EAAE Congress 'Agri-Food and Rural Innovations for Healthier Societies', Ljubljana (Slovénie), 26-29 août 2014
- **Schelling T.C. (1978).** *Micromotives and Macrobehavior*, W.W. Norton & Co, 252 p.
- **Squazzoni F. (2014).** A Social Science-Inspired Complexity Policy: Beyond the Mantra of Incentivization, *Complexity*, vol. 19(6), pp. 5-13

6.- Remerciements

Le présent travail a été réalisé dans le cadre du projet Investissement d'Avenir MIHMES. Le projet MIHMES bénéficie du soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-10-BINF-07 MIHMES), assorti d'un cofinancement de l'Union Européenne, au titre du Fond européen du développement régional (FEDER Pays-de-la- Loire)