
Des modèles théoriques aux modèles
opératifs, l'espace comme objet de
formalisme.

Introduction du chapitre

« [...] j'ai trahi mon but si j'ai paru vous engager à admirer d'abord les hommes. Ce qui est admirable d'abord, c'est le terrain qui les a fondés. »

SAINT-EXUPÉRY (1939, p.160)

Les chapitres 3 et 4 nous ont menés simultanément vers deux axes de la grille de lecture proposée par BANOS et SANDERS (2013), que nous avons repris sur la figure 2.15. Dans ce chapitre nous aborderons les deux derniers modèles que nous avons commencé à vous présenter dans le chapitre 2 à savoir *Acidity GIS* et CeLL.

Les modèles précédents se sont employés à répondre à des questions relativement éloignées des préoccupations quotidiennes des acteurs de terrain comme les viticulteurs ou les techniciens viticoles. Face à ce constat, en parallèle des constructions de simulations précédentes avec les acteurs, nous avons également conçu des modèles résolument plus *data-driven* à une échelle spatiale plus grande, favorisant ainsi leur remobilisation par les parties prenantes.

Ces choix méthodologiques nous ont placés, en tant que géographes, en jonction avec les sciences agronomiques (physiologie, protection de culture, etc) et de la climatologie. Ce type d'approche nécessite, en plus du travail habituel d'observation et d'entretien, de disposer/récolter des données quantitatives influençant les mécanismes qui seront modélisés et simulés. Dans le cadre de nos travaux, les rencontres scientifiques, la contrainte temps et de moyens techniques ont largement conditionné les problématiques de ces deux modèles.

Nous aborderons donc avec *Acidity GIS* les problématiques de changement climatique dans le cadre d'une viticulture de montagne ou de fortes pentes. Les questionnements liés à cette problématique sont à la confluence de deux facteurs déterminants. Le premier est notre implication dans l'ANR TERVICLIM depuis 2011, qui nous a permis de disposer de capteurs de température placés sur les deux territoires d'étude. De cette façon, nous avons eu accès à des données à une échelle fine aussi bien sur le plan spatial que temporel. Le second facteur est lié aux acteurs, et a émergé lors de différents entretiens sur les risques liés aux changements climatiques. Dans ce contexte de changement climatique, il s'est avéré que la menace la plus concrète perçue par les viticulteurs concernait un problème viral de la vigne désigné sous le nom générique de « maladies du bois¹ ». Or nous n'avons

1. Les 3 principales maladies du bois en France sont l'eutypiose, l'esca, et le black dead. C'est un gros sujet de préoccupation pour les viticulteurs, car elles ont pour effet de détruire les souches attaquées

pas suffisamment d'informations ni de connaissances techniques sur ces questions pour nous y aventurer. En outre, les coopératives se questionnaient à ce moment-là sur les implications du changement climatique et les opportunités offertes par l'altitude. Dans le Trentino des initiatives de négoce² avaient été engagées dans ce sens, sans pour autant interroger le secteur coopératif. Nous avons donc exploré les conséquences du changement climatique pour la viticulture de montagne et de fortes pentes, de même que les capacités d'adaptation qui lui sont liées.

Si le modèle *Acidity GIS* s'adresse encore à un niveau de gestion territoriale supérieur à celui sur lequel les viticulteurs ont pris, le modèle CeLL lui vise à répondre à leurs demandes de compréhension de problématiques concrètes et mobilisables à leur échelle. Cette requête s'est concrétisée ici par la conjonction de 3 facteurs qui ont abouti à la formalisation d'un modèle sur la diffusion du parasite *Lobesia botrana* (l'eudémis) à très grande échelle. Le premier de ces facteurs est encore une fois notre participation à l'ANR TERVICLIM, car l'eudémis est une espèce thermosensible multivoltine³. Le second facteur est l'existence, au Groupement de Développement Agricole (GDA) du cru Banyuls et des Albères, de données de comptage de vols de mâles piégés dans des pièges à phéromones. Ce comptage est effectué depuis 1999 sur des parcelles témoins. Enfin, le dernier facteur est le travail de portage d'un modèle statistique a-spatial développé par Amélia CAFFARRA⁴ revisitant les travaux de COSSU *et al.* (1999) dans une problématique spatialisée grâce au SMA et aux données viticoles de la Côte Vermeille.

Ce chapitre nous permettra de présenter ces deux modèles, nous donnant ainsi la possibilité de nous approcher encore plus finement des territoires à l'échelle d'un bassin versant pour *acidity GIS* et d'un îlot de parcelles pour CeLL.

(LARIGNON et BOIS 2007). D'après les techniciens des zones en question, sur la Côte Vermeille et dans le *val di Cembra*, c'est principalement l'esca qui est identifié sous le vocable de maladie du bois.

2. Une initiative prise par la *cantina Ferrari* qui produit du vin effervescent. <http://www.ferraritrento.it/> site consulté le 28 février 2015.

3. En zoologie, cela qualifie une espèce d'insecte donnant naissance à plusieurs générations par an. <http://fr.wiktionary.org/wiki/multivoltin> site consulté le 28 février 2015

4. Laboratoire d'Écophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux de l'INRA de supagro-Montpellier.

5.1 Le modèle acidityGIS : la coopérative comme levier d'adaptation au changement climatique pour la viticulture de montagne

— Le modèle *Acidity GIS* —

Échelle spatiale : modèle pensé à l'échelle du bassin versant de la Baillaury, sur la commune de Banyuls-sur-mer

Agents : sont mobilisés dans ce modèle, une grille de cellules, une coopérative et des viticulteurs coopérateurs

Question(s) :

- La coopérative est-elle le niveau d'agrégation sociale qui permet de s'adapter au changement climatique sur les territoires de pentes ?
- Quels sont les effets sur la structuration du territoire de la mise en place d'un paiement différencié sur la qualité de la vendange ?

Sur les territoires de montagne, la pente est vécue comme une contrainte forte. Aujourd'hui, dans le contexte de changement climatique, des solutions d'adaptation sont cherchées du côté de la génétique, de l'irrigation, ou d'innovation dans les pratiques culturelles. Mais la montagne ne pourrait-elle pas être perçue comme une partie de la solution concernant l'adaptation locale au changement ? Dans cette section nous explorerons donc les conséquences du changement climatique pour la viticulture de montagne et de fortes pentes en soulignant le rôle majeur que pourrait jouer l'outil de production qu'est la coopérative pour influencer les dynamiques de territoire, maintenir une qualité stable dans un contexte changeant, sans bouleverser les équilibres économiques.

Introduction

Les agro-systèmes sont des éco-systèmes complexes maintenus sous contrainte par l'Homme pour assurer une production. Or la production agricole en général et la viticulture en particulier, est largement tributaire des contraintes environnementales.

Depuis plus de 20 ans, le GIEC travaille sur l'évolution à long terme du changement climatique et sensibilise les populations aux dérives climatiques qui peuvent survenir. Le changement climatique serait donc une contrainte forte qui viendrait s'ajouter à celles pesant déjà sur la viticulture (G. V. JONES *et al.* 2005 ; NEMANI *et al.* 2001 ; WHITE *et al.* 2006).

Les enjeux deviennent donc de plus en plus pressants, et des controverses apparaissent quant au devenir de la viticulture (HANNAH *et al.* (2013) VS VAN LEEUWEN, SCHULTZ *et al.* (2013)). Si le changement climatique n'est pas contesté, ce sont les capacités des

viticulteurs à tirer profit de leur environnement et de pratiques culturelles qui sont encore aujourd’hui à explorer.

Un ensemble de travaux abordent ces questions sous des aspects aussi divers que : la génétique et la phénologie de la vigne (DUCHÊNE *et al.* 2012), les aspects sociaux (VIGUIÉ *et al.* 2014), les pratiques culturelles (HERRERO-LANGREO *et al.* 2013) ou encore sous l’angle climatologique et spatial (MORIONDO *et al.* 2013 ; QUÉNOL et BONNARDOT 2014 ; BRICHE *et al.* 2014). De notre côté, nous avons opté pour une approche basée sur les systèmes multi-agents.

Par ailleurs, historiquement, les vignobles de qualité ont plutôt été plantés sur les terres pauvres de coteaux impropres aux cultures vivrières (PITTE 2010). Or aujourd’hui, la montagne est souvent vécue par les agriculteurs, et peut-être davantage par les viticulteurs, comme un handicap naturel avec lequel il est nécessaire de composer. L’Appellation d’Origine Contrôlée (AOC) de Banyuls-Collioure, dans le département des Pyrénées orientales, peut être considérée comme l’un de ces espaces où « l’homme a été capable de former ces paysages si emblématiques à la manière des utopies agrariennes postmodernes » (BRIFFAUD et DAVASSE 2012). Ce paysage qui fait territoire, largement patrimonialisé (FRANÇOIS *et al.* 2006), utilisé comme vecteur de marketing (TEMPESTA *et al.* 2010 ; ALCARAZ 2001), est petit à petit délaissé.

Les quatre communes qui composent l’AOC du cru Banyuls-Collioure sont situées entre mer et montagne (figure 1.14(a)). L’altitude s’élève du niveau de la mer à 988 m (sur les contreforts du “Massif des Albères”) en une pente variant de 0 et 180%. Son climat peut être identifié comme méditerranéen (CARBONNEAU *et al.* 2007) ou Csa selon la classification de Köppen (PEEL *et al.* 2007). La structuration sociale donne une très large dominance au système coopératif et à une viticulture de petite taille⁵.

En 2012, la viticulture représentait encore 1 300ha sur les quatre communes (soit un peu moins de 25% des surfaces communales) cultivés par environ 680 viticulteurs. Ce modèle d’une viticulture jardinée est depuis plusieurs années remis en question, car les transmissions d’exploitations sont rares et les coûts de production sont trop élevés (c.f. chap. 1, p.23). Petit à petit, les zones hautes et pentues sont abandonnées. Le fait de positionner le modèle dans un contexte coopératif amène son lot de stimulations et de contraintes au territoire (c.f. partie 4.2 ou encore TOUZARD, J. F. DRAPERI *et al.* (2003)). Parallèlement, les questions d’adaptation au changement climatique se font de plus en plus pressantes⁶. Alors que sont évoquées l’irrigation et la génétique pour amortir les modifications sur le produit lié au changement climatique, les territoires de montagne pourraient être en mesure de transformer leur handicap structural en atout pour le futur

5. La surface moyenne par exploitant en 2012 étant de 1.9ha alors que la surface minimum pour l’installation (SMI) sur la zone est de 2.5ha.

6. C.f le compte rendu du séminaire LACCAVE du 18 juin 2013 qui s’est tenu au syndicat viticole au Mas Reig à Banyuls.

par l'utilisation de l'altitude pour conserver un équilibre dans la maturité des vendanges. Quel serait donc le devenir de ces territoires si demain la montagne n'était plus vécue comme une contrainte, mais comme un territoire refuge pour supporter le changement climatique ?

Nous allons explorer ce questionnement par l'intermédiaire de simulations informatiques distribuées en nous intéressant aux stratégies d'auto-organisation mises en place par les agents pour répondre aux besoins de la coopérative en terme de qualité. Nous avons donc créé un monde de simulation, construit à partir : de données SIG, de relevés de terrain et de valeurs économiques relatives au territoire.

Nous nous inscrivons dans un individualisme méthodologique (AMBLARD 2010; BOMMEL 2009; BOUDON 1991) qui s'intéresse aux comportements collectifs (propriété émergente de la structuration du paysage) comme une forme complexe résultante de comportements individuels (comportement des viticulteurs) et cela, au travers d'un modèle phénoménologique (VARENNE 2011).

5.1.1 Température et maturité de la vendange

Grâce au programme TERVICLIM nous avons, depuis 2011, installé sur l'AOC un réseau de 11 capteurs de température⁷ répartis sur les quatre communes de l'appellation (c.f. points sur la figure 5.2). Ces capteurs ont été installés sur des parcelles de Grenache noir conduit en gobelet. Ils nous permettent de récolter des données climatiques à l'échelle fine, que nous pouvons confronter avec des observations agronomiques effectuées sur le territoire (phénologie, concentration en sucre, degré d'alcool potentiel, *etc.*).

Une analyse de maturité⁸ est effectuée depuis la première année d'installation des capteurs. Avec ce modèle, nous avons cherché à établir un lien entre la température de l'année écoulée et l'acidité totale de la vendange. D'après BUTTROSE *et al.* (1971), LEEUWEN *et al.* (2004) et SWEETMAN *et al.* (2014), l'acidité totale de la vendange (en $g \times L^{-1}$ de H_2SO_4) est largement liée au millésime.

Grâce aux trois années de données dont nous disposons et à la littérature (BUTTROSE *et al.* 1971; SWEETMAN *et al.* 2014), nous avons pu déterminer qu'il existe une corrélation entre l'acidité totale au niveau de la parcelle et la moyenne des températures journalières au dessus de 10 °C entre le 15 janvier et le 15 août (fig; 5.1). Cette corrélation indique que pour une augmentation de 1 °C, l'acidité diminue de $0.7 g \times L^{-1}$ d'acide sulfurique.

Comme cette relation n'est pas très forte (p-value = 0.076), nous pouvons imaginer que cette évolution peut varier entre 0.5 et $1.2 g \times L^{-1}$ d'acide sulfurique par degré Celsius. Pour ce modèle, nous avons utilisé une acidité totale de 0.7, mais nous avons également

7. Ces capteurs sont des *data logger* TinyTag® qui enregistrent la température toutes les 10 minutes.

8. L'analyse de maturité est effectuée en utilisant la méthodologie de l'institut Français de la Vigne et du vin (IFV).

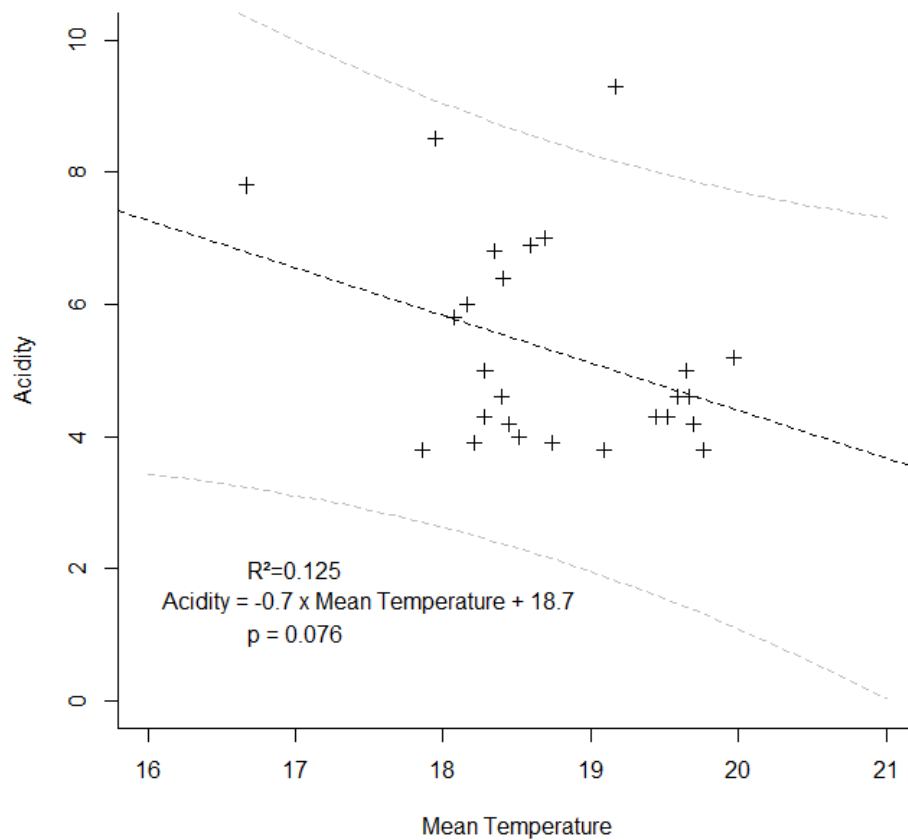


FIGURE 5.1 – Influence de la moyenne des températures journalières au dessus de 10 ° C entre le 15 janvier et le 15 août sur l’acidité totale de la vendange au 15 août. Chaque point correspond à une parcelle expérimentale du réseau de capteurs Terviclim pour une des années 2011, 2012 ou 2013.

testé son comportement avec $1 g \times L^{-1}$, et nous pouvons dire que les conclusions n'en sont pas impactées.

5.1.2 Matériels et méthodes

Le cadre du changement climatique se prête à la modélisation multi-agents dès lors que nous souhaitons explorer de manière empirique et itérative les réactions du monde mêlant environnement et interaction humaine comme c'est le cas pour les agro-systèmes (MOSS *et al.* 2001 ; LEHMANN, BRINER *et al.* 2013 ; LEHMANN, FINGER *et al.* 2013 ; NEETHLING *et al.* 2013).

Ce travail, bien qu'ancré territorialement, essaye d'apporter une réflexion globale sur la manière dont peut réagir et s'adapter un territoire viticole de montagne face aux nouveaux enjeux mis en lumière par la prise en compte du changement climatique dans les dynamiques territoriales.

Le modèle présenté dans cette partie a été développé sur la plateforme de modélisation Netlogo (WILENSKY 1999). Nous avons effectué l'analyse de sensibilité sur le cluster CALI⁹ grâce à OpenMOLE 0.9¹⁰ (REUILLON, LECLAIRE *et al.* 2013). Le traitement des données issues de l'analyse de sensibilité a été réalisé avec le logiciel de statistique R (TEAM 2014).

5.1.2.1 Développement du modèle

Objectif

Ce modèle vise à explorer la réponse d'un territoire (BRUNET et THÉRY 1993) à différentes politiques de rétribution des viticulteurs par la coopérative. À partir de relevés de terrain (relevés de température et analyse de maturité sur les 11 parcelles, c.f. figure 5.2), et d'entretiens avec les acteurs, nous avons formalisé un modèle multi-agents qui s'intéresse à la réponse des agents viticulteurs à la variation des exigences de la coopérative en fonction du climat.

Ce dernier mobilise des agents viticulteurs, tous coopérateurs, et une coopérative. Cette dernière doit faire face à des variations de qualité liées (dans ce modèle) à l'acidité totale de la vendange. Dans ce modèle, la température s'élève d'itération en itération, et l'acidité totale de la vendange dans les mêmes proportions¹¹.

Les observations du modèle se font à l'échelle du territoire, mais l'ensemble des mécanismes mis en œuvre ont lieu entre la coopérative et les viticulteurs, et entre viticulteurs

9. Calcul en Limousin de l'Université de Limoges, financé par la région Limousin, les instituts XLIM, IPAM, GEIST, et l'Université de Limoges.

10. <http://www.openmole.org>, site consulté le 10 juin 2013.

11. L'acidité de la vendange est très fortement corrélée à la température (c.f. part 5.1.1).

en compétition pour l'espace. Leur objectif est de maintenir une acidité suffisante de leurs vendanges en fonction de la politique d'incitation définie par la coopérative.

Entités, variables d'état et échelle de travail

Les entités : dans ce modèle, nous avons intégré trois types d'entité : les parcelles qui sont des cellules de la grille (c'est l'unité spatiale de base), les viticulteurs et la coopérative.

Les variables d'état des entités : chaque parcelle (représentée par un *patch* dans Netlogo) se caractérise par : sa température, son acidité, la nature de sa couverture actuelle, son altitude, sa pente, son intérêt¹², son propriétaire, les gains à la parcelle, et les coûts de production de cette parcelle.

Les viticulteurs ont tous les mêmes attributs : leur capital, la moyenne de l'acidité sur leurs parcelles, la main-d'œuvre nécessaire pour cultiver toutes les surfaces dont ils disposent. À tout instant, ils sont capables de connaître le nombre et la position de leurs parcelles, mais également lesquelles sont enfrichées.

Le dernier agent d'importance dans cette modélisation est la coopérative. En fonction d'un sous-modèle comportemental que nous développerons en 5.1.2.3, elle va mettre en place une grille de paiement différencié en fonction de l'acidité qui lui est livrée.

L'échelle temporelle : chaque itération du modèle représente une année, chaque tour nous ramenant à la situation d'acidité au 15 août. Cette date correspond aux valeurs d'acidité relevées sur les onze parcelles témoins et extrapolées à l'échelle du territoire (fig. 5.2). Ce sont ces données spatialisées que nous avons ensuite intégrées dans le modèle.

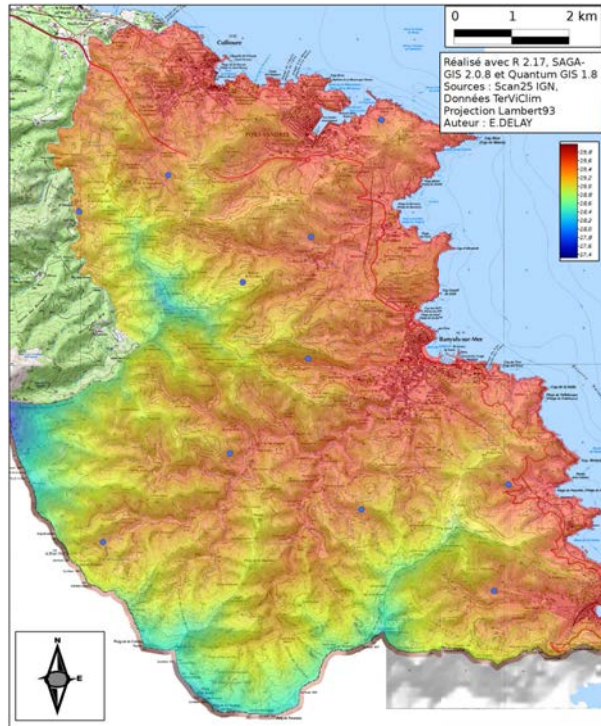
Cette échelle temporelle nous permet d'explorer les dynamiques spatiales qui sont liées aux dynamiques foncières en faisant abstraction des itinéraires de culture des viticulteurs. Nous effectuons 40 simulations et simulons 100 ans pour tester la stabilité et la sensibilité du modèle aux variations de paramétrisation, mais nous nous intéresserons plus particulièrement aux 50 premières années du modèle.

L'échelle spatiale : Nous situons ce travail sur l'AOC Banyuls – Collioures (Pyrénées-Orientales, France) sur une portion du territoire de 39 km² recouvrant une grande partie du bassin versant de la Baillaury sur la commune de Banyuls. La résolution de Netlogo est de 80x68 patches pour recouvrir parfaitement la projection de notre zone de travail.

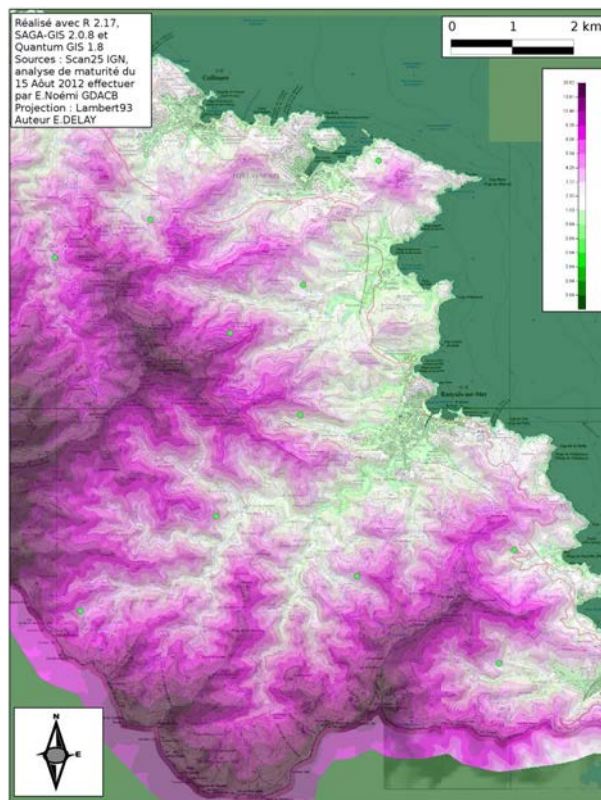
Processus et ordonnancement

Ce modèle est construit pour explorer le comportement d'un territoire viticole (ici spécifiquement l'AOC Banyuls-Collioure) soumis à une élévation de la température (dans le cadre du changement climatique). Il met donc en scène les mécanismes interactionnels entre le territoire (support physique de production vitivinicole) et le viticulteur. Le modèle

12. L'intérêt est une valeur composite permettant de synthétiser plusieurs autres valeurs (c.f. la sous-section 5.1.2.3 traitant des sous-modèles).



(a)



(b)

FIGURE 5.2 – Carte issue d'un traitement par régression linéaire sur les données de terrain. La figure (a) est le résultat de la spatialisation des températures le 15 août 2012 à partir des relevés sur les 11 parcelles. La figure 5.2(b) est le résultat de la spatialisation de l'acidité totale (en $g \times L^{-1}$) de la vendange issue de prélèvements effectués le 15 août 2012.

permet de suivre et d'explorer la réponse territoriale (des viticulteurs et des répercussions de leurs actions sur la structuration de l'espace), en fonction de différentes mesures de compensation (encouragement/dissuasion) instaurées par la coopérative.

Notre modèle est subdivisé en huit sous-modèles (détaillés en 5.1.2.3). Ils sont schématisés sur la figure 5.3 et se succèdent et s'organisent de la manière suivante :

- pour les parcelles (les numéros 1, 2 et 3 de la figure 5.3)
 - mise à jour de la température, avec une élévation de 0.2°C par itération, ce qui a pour conséquence de réduire l'acidité totale de la vendange ;
 - mise à jour des *bonus* et *malus* en fonction de l'évolution climatique. Ce *bonus/malus* est calculé par la coopérative pour chaque parcelle, en fonction de l'acidité locale, et de la stratégie de rémunération définie par la coopérative.
- pour les viticulteurs (le numéro 3 à 7 de la figure 5.3)
 - mise à jour de la main-d'œuvre nécessaire pour l'année. Si les viticulteurs peuvent étendre les terres qu'ils cultivent, ils ne peuvent le faire sans payer la main d'œuvre associée ;
 - mise à jour de l'acidité moyenne sur les parcelles. Le viticulteur évalue à chaque itération l'acidité moyenne sur toutes les parcelles dont il dispose. Cette valeur lui servira à prendre des décisions d'achat ;
 - mise à jour du capital. Le viticulteur reçoit les bénéfices de sa campagne de culture ;
 - abandon des parcelles ;
 - achat d'une parcelle en fonction du capital. Le choix de cette parcelle se fait également en fonction des valeurs d'acidité de la parcelle et de celles dont dispose déjà le viticulteur.

5.1.2.2 Concepts d'élaboration

Contexte scientifique

En viti-viniculture, le travail en cave peut être largement réduit si la vendange a mûri dans de bonnes conditions. Si les conditions de maturation sont généralement connues des viticulteurs et des techniciens, dans un contexte de changement climatique, les équilibres sont bouleversés. Nous avons modélisé sur ce territoire, entièrement composé de viticulteurs coopérateurs, plusieurs stratégies de rémunération de la coopérative liées au maintien de l'acidité totale de la vendange qui lui est livrée (c.f. partie sous modèle 5.1.2.3), et nous avons proposé des pistes de réflexion qui permettent d'envisager le développement territorial futur.

Tout au long de la simulation, l'élévation de la température annuelle va induire une diminution de l'acidité des baies lors de la maturation des raisins. La coopérative pourra

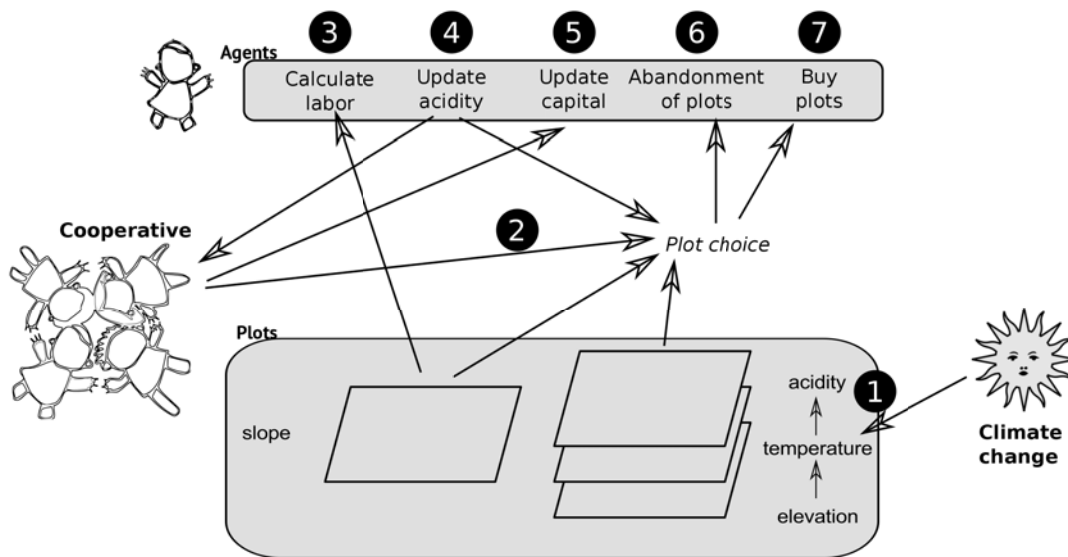


FIGURE 5.3 – Schéma général de l'ordonnancement des processus dans le modèle

mettre en place diverses politiques de cave basées sur une logique « non interventionniste » (où elle voit diminuer l'acidité totale de la vendange qui lui est apportée) jusqu'à « interventionniste » en favorisant les acidités extrêmes ou celles proches de l'acidité attendue en cave (c.f. partie sous-modèle et fig. 5.5).

En prenant en compte les différents paramètres des parcelles disponibles selon la stratégie définie par la coopérative, et en intégrant l'évolution conjointe de la température et de l'acidité totale pour chaque parcelle, le viticulteur choisira préférentiellement des parcelles d'altitude ou bien celles de fond de vallée, ou encore un mélange des deux.

Nous nous intéressons dans ce modèle aux mécanismes de structuration de l'éco-socio-système (GOFFIN 1998). Nous attachons une attention toute particulière aux mécanismes d'organisation de l'espace qui se mettent en place entre viticulteurs, basés sur la compétition pour les terres les plus attractives (voir 5.1.2.3 pour les détails du calcul de l'intérêt), et un abandon plus ou moins rapide des parcelles en fonction de l'intensité de la prime dispensée par la coopérative.

En particulier, nous observerons l'utilisation des espaces plus élevés pour échapper aux processus de maturation inéquilibrée dûs aux fortes chaleurs et fortes radiations de la zone de l'AOC. Le modèle nous permettra d'explorer différents *scenarii* d'évolution de la température, d'évolution de la prime et ainsi repérer voire anticiper l'impact de ces variables sur la structure du vignoble.

Processus de décision

Chaque viticulteur va tenter de pérenniser son activité et d'optimiser ses réponses au système en fonction de l'évolution de son environnement. Son environnement physique varie à cause du changement climatique, ce qui se traduit par une élévation de la température moyenne annuelle et une perte d'acidité totale de la vendange. Face à cela, la coopérative poursuit un objectif qui peut s'avérer contradictoire avec les pratiques des viticulteurs en essayant de maintenir une acidité totale stable dans la vendange rentrée.

La population viticole est incapable individuellement d'orienter la construction du paysage. La coopérative n'a pas d'accès direct à cette possibilité, mais ses stratégies de rémunération des viticulteurs ont des effets directs sur leur décision de mise en culture ou d'abandon de l'espace. C'est donc la combinaison de la stratégie adoptée par la coopérative et des actions des viticulteurs sur le territoire, qui va structurer le paysage.

Réflexes aux conditions extérieures

Ce modèle se déroule en contexte de changement climatique. Les agents viticulteurs en perçoivent les effets directement sur leur production mais ils ne sont pas engagés spontanément dans une démarche d'adaptation. Par contre, leur objectif est d'optimiser leur capital. Par ailleurs, la coopérative applique diverses politiques de valorisation de la production de ses coopérateurs. Elle peut donc mettre en place un mode de redistribution des bénéfices en fonction de la qualité de la vendange, et ainsi orienter les viticulteurs et le territoire vers le changement et l'adaptation.

Interactions

Suivant la politique choisie par la cave, la structuration du territoire et les logiques d'acteurs seront différentes. Nous pourrions observer un abandon des hauteurs, ou au contraire une course à l'altitude selon les paramétrages. Ces dynamiques reposent sur une compétition pour l'espace entre viticulteurs, et une optimisation des échanges entre ces derniers et leur coopérative en faveur d'une vendange de meilleur qualité.

Nous voulons mettre en évidence les parts de virtualisation et d'inhibitions (MORIN 2013) des forces humaines et environnementales sur le territoire qui conduisent aux phases d'extension et régression du vignoble.

Hétérogénéité

Toute l'hétérogénéité du modèle est liée à l'espace (comme pour le modèle LAME c.f. 4.1). Nos viticulteurs sont initialisés avec les mêmes variables si ce n'est la position géographique de leur siège d'exploitation et la disposition de leurs parcelles initiales. Si leur position géographique est totalement aléatoire, la position de leur parcelle ne l'est

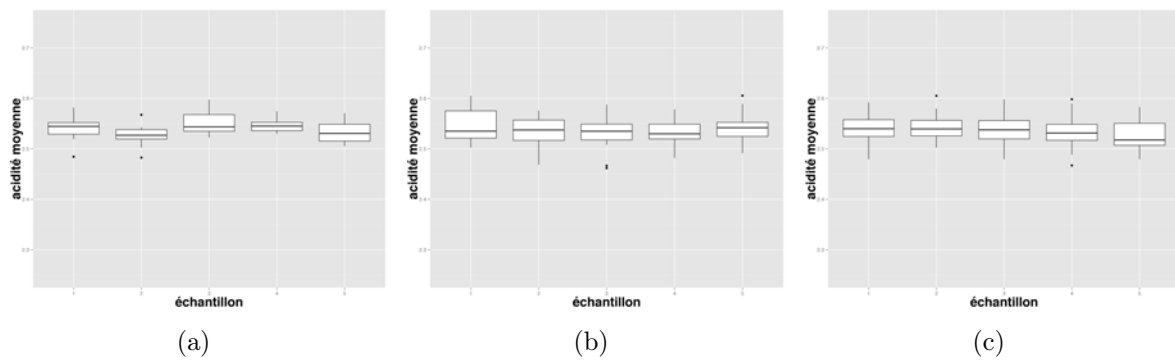


FIGURE 5.4 – Évaluation de la stochasticité des résultats du modèle en fonction du nombre de réplifications effectué. En (a) avec 10 réplifications, (b) avec 20 réplifications, (c) avec 30 réplifications

que partiellement. Elles sont situées dans un périmètre limité autour des agents, sur des surfaces qui sont aujourd'hui viticoles (lié à des données SIG).

Stochastique

Nous avons testé la stochasticité des résultats produits par le modèle pour être en mesure d'évaluer le nombre de réplifications à effectuer (c.f. fig. 5.4). Pour cela nous avons effectué 1000 réplifications d'un même jeu de paramètres, et effectué un tirage aléatoire des échantillons pour en constituer 10 groupes. Nous observons la variabilité de résultats sur 10, 20 30, 40 etc. échantillons tirés aléatoirement sans remise. On observe que pour 10 réplifications la stochasticité des échantillons risque de fausser les résultats (c.f. fig. 5.4(a)), mais tend à s'effacer avec 20 et 30 réplifications (c.f. fig. 5.4(c)).

Observation

Les données sont analysées pour chaque simulation (30 000 répétitions au total pour en analyser la sensibilité) et pour 100 ans du modèle. Parmi les résultats, nous nous intéressons plus particulièrement aux 50 premières années de la simulation durant lesquelles nous observerons l'évolution du nombre moyen de parcelles mises en culture, et à la proportion de parcelles en friche comme indicateurs des stratégies individuelles poussées par les mesures compensatoires de la coopérative.

Notre intérêt se portera également sur les valeurs moyennes d'acidité des parcelles (patches) viticoles comme indicateur de réussite de la politique mise en place par la coopérative, et sur les coûts que représentent ces politiques en observant les disparités de son capital en fonction des stratégies.

Enfin, nous avons développé un indice de fragmentation du vignoble, qui permettra de suivre les dynamiques du paysage perceptibles par les observateurs. Cet indice de fragmentation calcule le nombre de clusters de parcelles viticoles généré par le modèle. Ce

nombre sera confronté à une répartition aléatoire des clusters dans un monde aux dimensions équivalentes. Ceci nous donne en sortie un indice compris entre 0 et 1, qui tendra vers 0 quand la fragmentation aléatoire sera supérieure à la fragmentation observée (donc il se met en place une logique d'agrégation spatiale), et vers 1 quand les valeurs de clusterisation observées tendront vers les valeurs de clusterisation aléatoire théoriques.

5.1.2.3 Détails

Détails d'implémentation

Le modèle a été implémenté sous netlogo 5.0.5. L'analyse de sensibilité a été effectuée avec OpenMole sur le cluster CALI¹³.

Initialisation

Le modèle s'initialise sur la base de données issues d'un système d'information géographique pour tout ce qui concerne les variables environnementales. L'altitude, la pente, la température, l'acidité totale sont autant de valeurs spatialisées. Les données économiques sont, elles aussi, issues du territoire "à dire d'expert"¹⁴. Nous avons fait le choix, dans cette modélisation, de ne pas positionner l'emprise viticole exacte pour chaque viticulteur, mais de considérer l'emprise de la viticulture sur le bassin versant, et de répartir de manière aléatoire les viticulteurs à l'intérieur. En effet, nous n'avons pas travaillé sur la structuration sociale et spatiale intra-population qui aurait ajouté une couche de complexité. Il s'agit ici d'explorer la réponse que peut apporter la filière viticole aux différentes variations à l'échelle du territoire.

Lors de l'initialisation de chaque simulation, les données SIG sont chargées dans les patches en tant que variables locales. La ville de Banyuls est positionnée sur la carte et nous générons de manière aléatoire une population initiale de 50 viticulteurs. Chaque viticulteur se voit doter de 10 parcelles dans un rayon de 5 parcelles autour de lui. La simulation commence véritablement dès l'instant où les viticulteurs ont pris possession de la surface viticole actuelle (chargée, elle aussi, à partir de données SIG).

La plupart des valeurs fixes sont des valeurs ayant trait à l'économie de l'AOC. Elles sont synthétisées dans le tableau 5.1

Variables de forçage

Il n'y a pas d'entrée externe au système une fois la simulation commencée.

Sous-modèles

13. CALI (CALcul en LIMousin) est un serveur de calcul, financé par la Région Limousin, les laboratoires XLIM, SPCTS et GEIST, et par l'Université de Limoges.

14. Les données ont été recueillies auprès du Groupement de Développement Agricole du cru Banyuls et des Albères et de l'ODG.

Description des variables	valeur
Capital initial : est le capital qui permet au viticulteur d'effectuer ses premières campagnes de culture	6000
Le revenu par parcelle : il est fixe , quelle que soit la parcelle. Fixé pour la modélisation entre 5850 et 7800 suivant le type de vin fléché sur la parcelle (Banyuls ou Collioure)	5900
Le prix d'achat d'une parcelle jamais exploitée prend en compte tous les aménagements. Il est fixé ici pour toutes les parcelles	3000
L'acidité attendue par la coopérative	3

Tableau 5.1 – Variables d'initialisation du modèle

Au niveau de la "parcelle"

Mise à jour de la température : elle évolue de manière linéaire à chaque itération. Le coefficient directeur de la courbe peut être ajusté par l'utilisateur. Dans nos analyses de sensibilité, nous avons exploré le système avec augmentation de 0.02 degré Celsius par an. Celui-ci est initialisé avec les valeurs calculées par régression linéaire sur les données issues des capteurs de température installés dans le cadre de l'ANR TERVICLIM¹⁵.

Mise à jour de l'acidité : elle évolue également linéairement, mais de manière négative par rapport aux températures. Dans le modèle, elle est définie comme

$$acidity_t = acidity_{t-1} - evt \times 0.7 \quad (5.1)$$

où *evt* est le coefficient directeur de la droite de température, lequel est multiplié par 0.7 pour prendre en compte la corrélation avec la température. Comme nous l'avons déjà évoqué, la correction du coefficient de température sur les données que nous avons recueillies devrait être de 0.9, mais vu le peu d'épaisseur de nos données, il est plus opportun d'utiliser les valeurs d'une étude menée entre 1996 et 2006 sur Saint-Émilion (LEEuwEN *et al.* 2004)

Mise à jour du montant de la compensation par la coopérative : le comportement de la coopérative est commandé par deux fonctions résumées dans les quatre équations suivantes :

Dans le cadre d'une stratégie ouverte :

Si l'acidité locale de la parcelle est supérieure ou égale à l'acidité attendue :

$$a_c = (acidity - s)e^\mu \times \frac{bonus}{(s - max(acidity))e^\mu} \quad (5.2)$$

15. <http://terviciim.in2p3.fr/> consulté le 9 septembre 2013.

Sinon

$$a_c = (acidity - s)e^\mu \times \frac{bonus}{(s - \min(acidity))e^\mu} \quad (5.3)$$

Dans le cadre d'une stratégie bornée :

La coopérative adopte un comportement plus complexe, où l'acidité attendue est bornée par une limite haute et une limite base. Dans ce contexte, l'équation 5.3 garde son domaine de validité. Mais si l'acidité de la parcelle est supérieure à ce qu'attend la coopérative :

Si l'acidité est supérieure à la moyenne de s et $s2$:

$$a_c = (acidity - s)e^\mu \times \frac{bonus}{\left(\frac{s2-s}{2}\right)e^\mu} \quad (5.4)$$

Sinon, deux autres cas de figure :

Si l'acidité est strictement supérieure à $s2$

$$a_c = (acidity - s2)e^\mu \times \frac{bonus}{\left(\frac{s2-s}{2}\right)e^\mu} \quad (5.5)$$

sinon

$$a_c = (acidity - s2)e^\mu \times \frac{bonus}{s2 - \min(acidity)e^\mu} \quad (5.6)$$

où :

- a_c est la valeur de la *bonus/malus* à la parcelle ;
- s est le seuil du minimum d'acidité fixé par la coopérative, et dans un contexte borné, $s2$ est la limite maximale fixée par la coopérative ;
- $acidity$ l'acidité effective de la parcelle ;
- μ le coefficient de comportement de la coopérative ;
- $bonus$ est la valeur du *bonus/malus* proposée par la coopérative ;
- $\min(acidity)$ et $\max(acidity)$ sont les acidités totales théoriques au 15 août, obtenues par régression linéaire sur les valeurs de température.

La variation de μ va permettre de faire varier les orientations que la coopérative souhaite donner aux types de vendanges qui lui sont livrées. Comme nous pouvons le voir sur le figure 5.5, pour une simple variation de μ , le comportement de la coopérative va radicalement changer.

Pour un μ de :

- 0 le comportement est binaire. Si l'acidité est supérieure au seuil, le *bonus* est maximum, sinon le *malus* est lui aussi maximum ;
- 0.5 ce sont les valeurs proches des seuils qui vont être favorisées. En effet, par cette politique, les viticulteurs ne sont pas encouragés à conquérir les zones hautes, car la rétribution est proportionnellement plus importante pour les valeurs proches du seuil

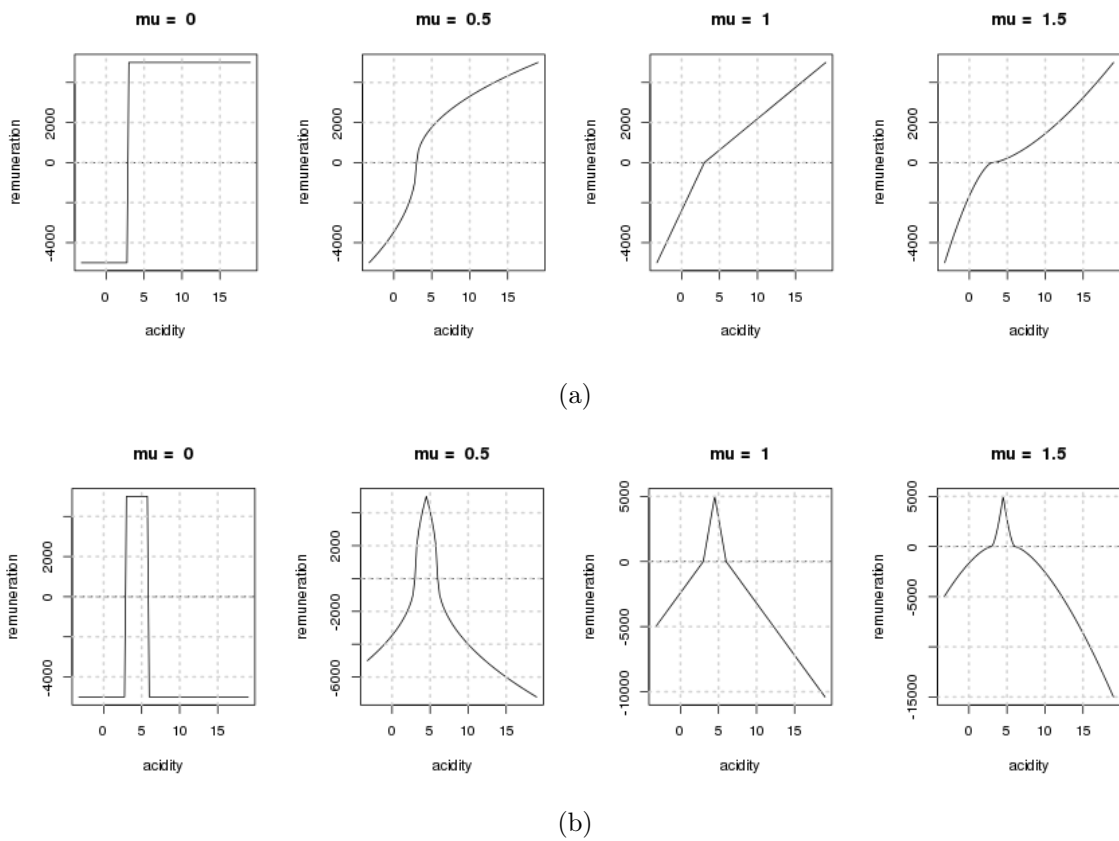


FIGURE 5.5 – Graphique de formalisation mathématique du comportement de la cave coopérative. Les graphes de la figure (a) reflètent le comportement de rémunération dans un contexte ouvert, tandis que les graphes de la figure (b) montrent le comportement de rémunération dans un contexte borné.

-
- que pour les extrêmes. De la même manière, une fois en dessous du seuil d'acidité, les acidités extrêmes sont proportionnellement moins taxées que les valeurs proches ;
- 1 la rétribution se fait de manière presque linéaire ;
 - 1.5 cette fois ce sont les valeurs extrêmes d'acidité qui sont proportionnellement favorisées. Un viticulteur gagnera plus à avoir des acidités supérieures et éloignées du seuil qu'à se contenter de répondre à la demande de la cave.

Toutes les valeurs de μ sont utilisables, ce qui permet théoriquement d'explorer tous les types de comportement face à l'acidité possible. Toutefois, pour ces simulations, nous nous contenterons des valeurs que nous venons d'évoquer.

Au niveau d'un "viticulteur"

Mise à jour de la main d'œuvre : la comptabilisation de la main-d'œuvre nécessaire à l'entretien du vignoble nous est apparue nécessaire. En effet, dans la mesure où, à l'initialisation, nous ne reconstruisons pas la structuration sociale des viticulteurs (en initialisant seulement 50 viticulteurs ayant tous le même nombre de parcelles), pouvoir évaluer la population mobilisée par la viticulture s'avère important, car elle permet de comprendre l'impact local de la viticulture. Nous avons défini la main d'œuvre comme :

$$Mo = \frac{n_p}{Ct} = \frac{np \times pente}{100} \quad (5.7)$$

où :

- n_p est le nombre de parcelles du viticulteur ;
- Ct la capacité de travail exprimée en unité surfacique. Elle évalue la surface qu'un viticulteur est capable de cultiver par an en fonction de la pente moyenne de son exploitation ;
- Mo la main d'œuvre nécessaire pour entretenir l'exploitation.

La figure 5.6 présente le résultat du calcul de Ct . Quand la pente est en dessous de 5% un viticulteur seul est capable de cultiver 10 ha, tandis que si la pente est de 45% il ne sera en mesure de cultiver que 2ha.

Mise à jour de l'acidité moyenne sur l'exploitation : à chaque itération le viticulteur va tenir une comptabilité de l'acidité moyenne effective sur son exploitation. Cette valeur sera l'un des critères de choix lors de l'achat/vente de parcelles.

Mise à jour du capitale : le capital de chaque viticulteur est mis à jour à chaque itération, en utilisant les coûts de production et les gains de l'ensemble de ses parcelles. Les coûts de production à l'échelle de la parcelle (apc) sont calculés de la même manière que pour

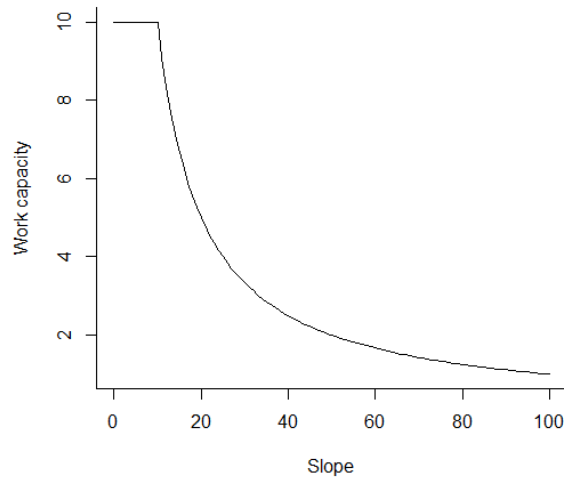


FIGURE 5.6 – Capacité de travail d'un Homme en ha en fonction de la pente en %

le modèle LAME. C'est à dire :

$$apc = (pente \times \beta) + (distance \times \gamma) + 2500 \quad (5.8)$$

où β et γ sont fixés grâce aux paramétrages de LAME (c.f. 4.1). Les gains (api) sont calculés de la manière suivante :

$$api = 5900 + a_c \quad (5.9)$$

Où 5900 correspond au prix de rémunération de la vendange par la coopérative, et a_c au *bonus* issu de la politique de cave proposée par la coopérative (c.f. équations 5.2 à 5.6). Les viticulteurs mettent à jour leur capital en calculant :

$$capital_t = capital_{t-1} + \sum_j api_j - \sum_j apc_j - (Mo \times 20000) \quad (5.10)$$

Où j représente les différentes parcelles, Mo la main d'œuvre (c.f. équ 5.7), et 20000 correspond au salaire annuel d'un employé.

Mise en friche d'une parcelle : Dans ce modèle, la mise en friche d'une parcelle est la seule solution pour qu'un viticulteur arrête de payer les coûts de production sur l'une de ses parcelles. Il y a deux possibilités pour qu'un viticulteur ait recours à cette pratique :

- il possède des parcelles qui n'ont plus « d'intérêt », il va alors regarder s'il y a des parcelles improductives (ce sont des parcelles dont les coûts de productions annuels sont supérieurs aux gains annuels) et va décider de la/les mettre en friche ;

-
- s’il se retrouve en difficulté financière (c’est-à-dire qu’il observe une diminution de son capital). Il va alors choisir d’arrêter de cultiver les parcelles qui lui rapportent le moins (qui ont le rapport coût de production-gain le plus faible).

Achat d’une parcelle : la condition importante pour l’achat d’une nouvelle parcelle est l’analyse de l’acidité moyenne des parcelles du viticulteur. Si son acidité moyenne est supérieure à 3 (seuil fixé par la stratégie de cave), il ne tiendra pas compte de l’acidité de la nouvelle parcelle lors de son achat. Dans le cas contraire, il ajoutera dans ses critères de recherche des parcelles dont l’acidité est supérieure à 3. Une fois passée cette première condition, le viticulteur décide d’acquérir une nouvelle parcelle quand son capital est supérieur aux coûts de production annuels et qu’il peut assumer les coûts supplémentaires de production d’une nouvelle parcelle sur les cinq années qui suivent. Les parcelles ne peuvent être achetées que dans un rayon de deux parcelles autour des parcelles déjà cultivées par ce viticulteur. Enfin, une préférence sera donnée à la parcelle dont les coûts de production sont les moins élevés.

5.1.2.4 Simulation

Nous avons effectué une analyse de sensibilité du système viticole en faisant varier le *bonus/malus* de 0 à 5000 par incrémentation de 100, ainsi que la valeur de μ , le coefficient de comportement de la coopérative, entre 0 et 1.5 incrémentés de 0.5.

Pour chaque paramétrisation, nous avons effectué 40 simulations avec un maximum de 100 années simulées (sachant que la simulation commence au moment où le vignoble a atteint son emprise actuelle). En sortie du modèle, nous nous intéressons à la date simulée, la main d’œuvre nécessaire au territoire, la pente et l’altitude moyenne des parcelles cultivées, l’acidité totale moyenne sur les parcelles, le nombre de parcelles cultivées et le nombre de parcelles abandonnées. L’ensemble des données issues des 800 simulations a été traité avec le logiciel R (TEAM 2014).

5.1.3 Résultats

5.1.3.1 Comportement à court terme (50 ans)

L’analyse des résultats du tableau 5.2 comme ceux de la figure 5.7 nous montre une augmentation de l’acidité moyenne entre les situations sans incitation de la part de la coopérative (première colonne du tableau 5.2), et celles où la coopérative met en place une incitation (dans les cinq colonnes suivantes).

Sur la figure 5.7, nous remarquons que la médiane des valeurs théoriques *d’acidité totale* à laquelle le système aboutit en 50 ans est de $3.30 \text{ g} \times \text{L}^{-1}$ de H_2SO_4 . Sur les graphiques suivants, nous constatons que, quelle que soit la stratégie μ mise en place par la cave,

	0	1000	2000	3000	4000	5000
Contexte ouvert, acidité moyenne	3.31	3.46	3.68	3.87	4.40	4.51
Contexte ouvert, variance moyenne	3.77	4.04	4.63	5.17	5.45	5.84
Contexte borné acidité moyenne	3.31	3.37	3.52	3.65	4.01	4.03
Contexte borné, variance moyenne	3.77	3.70	4.02	4.22	3.71	3.54

Tableau 5.2 – Moyenne sur 40 simulations de l'acidité moyenne et la variance moyenne, suivant les valeurs de *bonus* après 50 itérations

l'acidité moyenne des parcelles s'en trouve augmentée et reste au-dessus des objectifs de la cave.

Si l'on s'intéresse ensuite à l'évolution de l'acidité au sein des mêmes jeux de paramétrage, nous voyons de manière générale dans un contexte ouvert que l'acidité décroît quand la stratégie passe de 0 à 1.5, ce qui souligne la part incitative de la stratégie de coopérative. Dans cette configuration (graphiques « open stratégie » sur la figure 5.7) nous identifions donc deux mouvements contradictoires : l'augmentation des valeurs de *bonus* qui pousse la moyenne des acidités vers le haut, et la variation des stratégies μ de coopérative qui tend à ramener l'acidité vers les valeurs attendues par la coopérative (3 $g * L^{-1}$ de H_2SO_4).

Le système borné aux deux extrémités (graphiques « closed stratégie » de la figure 5.7) permet de limiter des effets d'« envolée » et de conserver des acidités plus proches des valeurs attendues par la coopérative. En effet, les viticulteurs qui cultivent des parcelles plus en altitude (donc avec une acidité plus élevée) sont traités avec la même politique que ceux qui sont en-dessous du seuil.

Pour terminer sur ces aspects d'acidité, nous pouvons nous intéresser à la variance de l'acidité moyenne dans le système. Que ce soit sur le tableau 5.2, ou sur la figure 5.7, nous réalisons l'effet effectif de la stratégie bornée sur la dispersion des résultats. Le fait de réduire la variance confère aux parcelles une plus grande homogénéité de maturité à l'échelle du territoire, ce qui est particulièrement intéressant du point de vue de la coopérative pour réduire la fenêtre temporelle de la vendange.

Si nous considérons maintenant l'évolution du nombre de parcelles viticoles en fonction de la stratégie μ de la coopérative et d'une politique ouverte ou bornée, nous observons, comme sur la figure 5.7, l'effet de la valeur de *bonus* sur l'augmentation des surfaces viticoles.

Dans un contexte de politique de rétribution ouverte, la stratégie μ entraîne le même comportement de diminution des valeurs de surfaces que dans le cas de l'acidité sur la figure précédente (fig. 5.7). De manière presque mécanique, la stratégie $\mu = 0$ permet de stimuler la croissance du vignoble. Mais la définition d'un *bonus* supérieur à 3000 génère

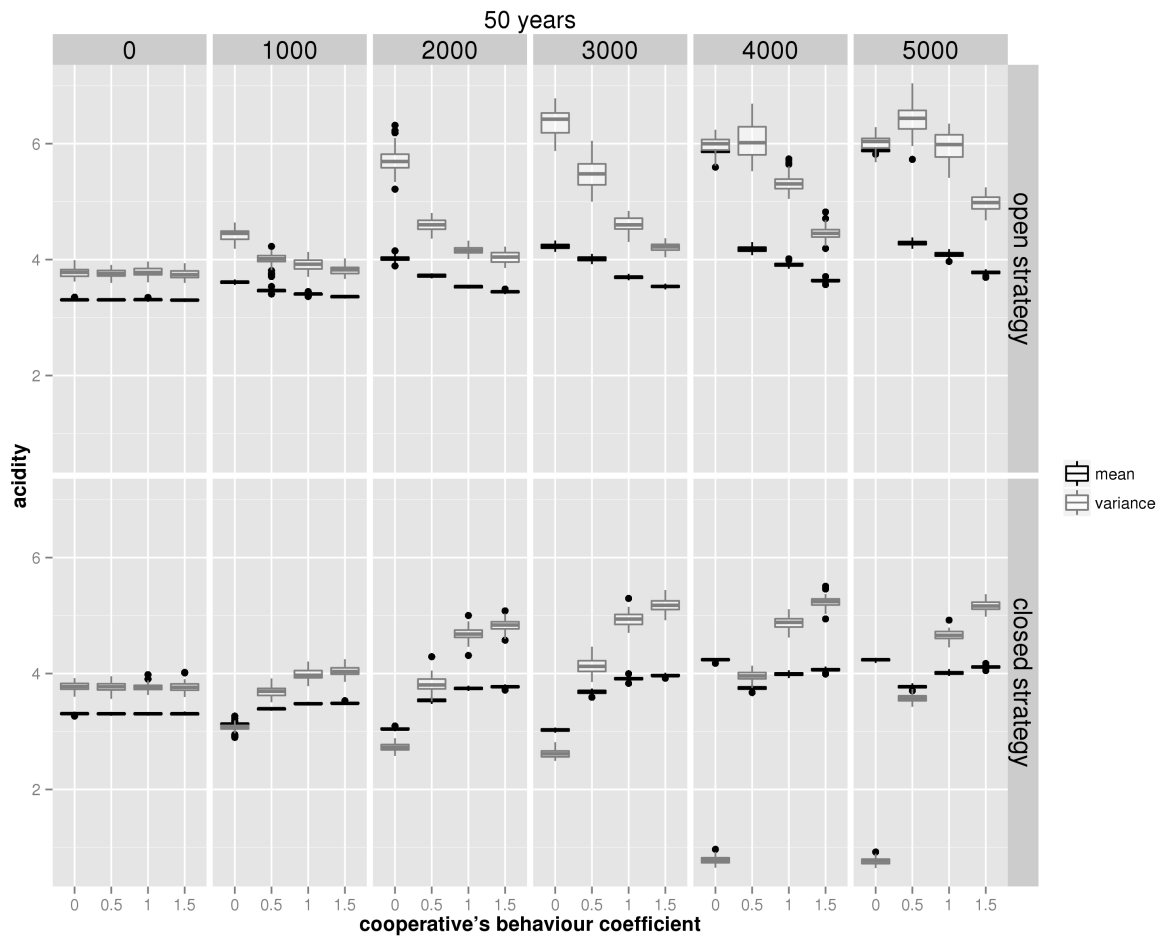


FIGURE 5.7 – Évolution de l'acidité sur 40 simulations en fonction de μ . La première colonne de "boxplot" représente l'acidité moyenne sur les parcelles si aucune politique n'est mise en place. Les autres graphiques représentent les valeurs d'acidité en ordonnée en fonction des valeurs de μ en abscisse. Chaque graphe pour une valeur de *bonus/malus* définie de 1000 à 5000.

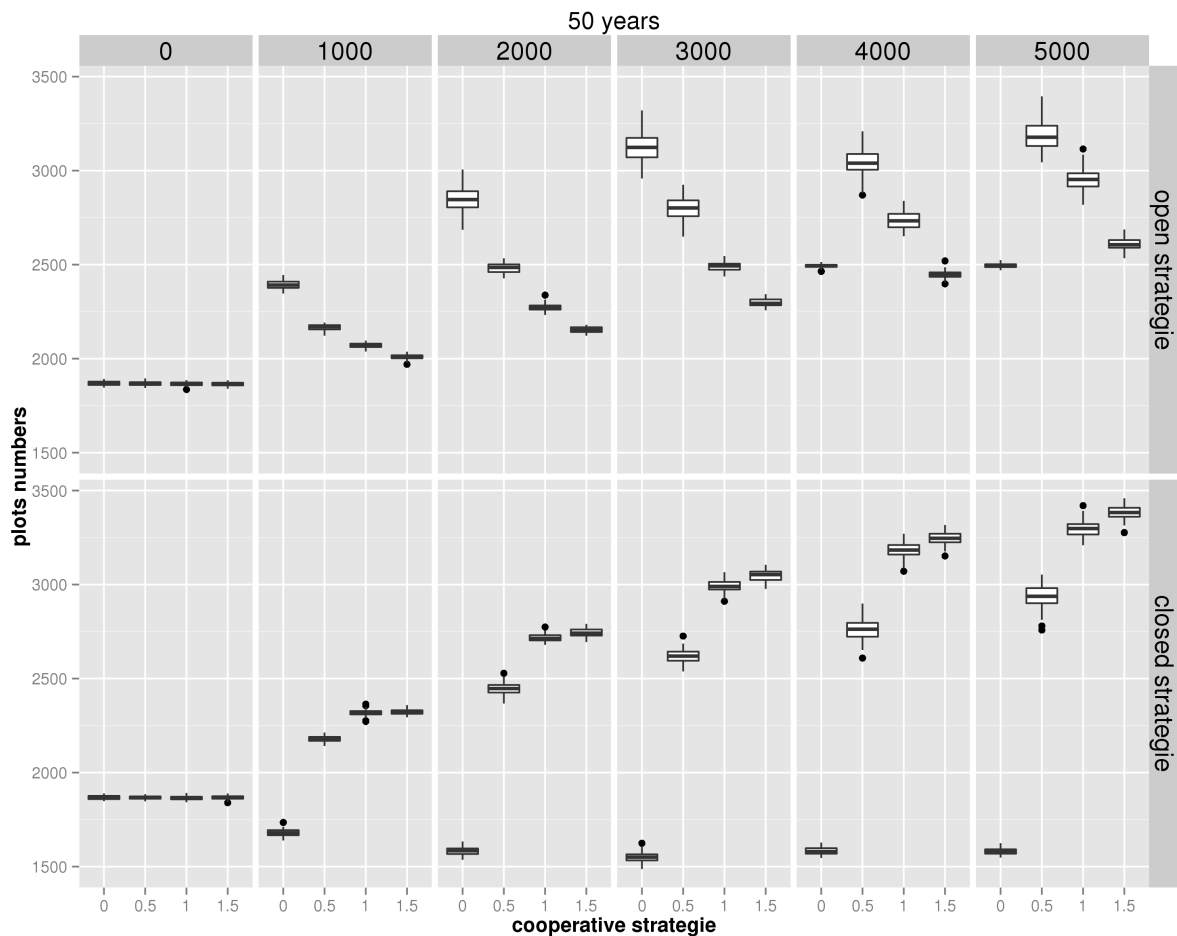


FIGURE 5.8 – Évolution du nombre de parcelles viticoles sur 40 simulations en fonction de μ . La première colonne de "boxplot" représente le nombre de parcelles si aucune politique n'est mise en place. Les autres graphiques représentent les nombres de parcelles en ordonnée en fonction des valeurs de μ en abscisse. Chaque graphe pour une valeur de *bonus/malus* définie de 1000 à 5000.

un effet de seuil. En effet la stratégie μ ne proposant pas de transition, quand le *malus* (en cas de non-respect des attentes de la coopérative) devient supérieur aux gains pour les viticulteurs, cela réduit considérablement leur volonté d'extension.

Dans un contexte de politique d'acidité bornée, nous observons, là encore, l'effet stimulateur des valeurs de *bonus*. Toutefois, nous pouvons noter la faible variation qu'entraînent les stratégies μ 1 et 1.5 sur l'augmentation des surfaces. Le fait de borner au-dessus des extrémités les valeurs de rétributions et d'encourager les valeurs d'acidités hautes permet de stimuler clairement les surfaces cultivées.

En s'intéressant à l'emprise de la friche sur le paysage (figure 5.9), nous constatons grâce au jeu de paramètres de simulations témoins (première colonne de la figure 5.9) que

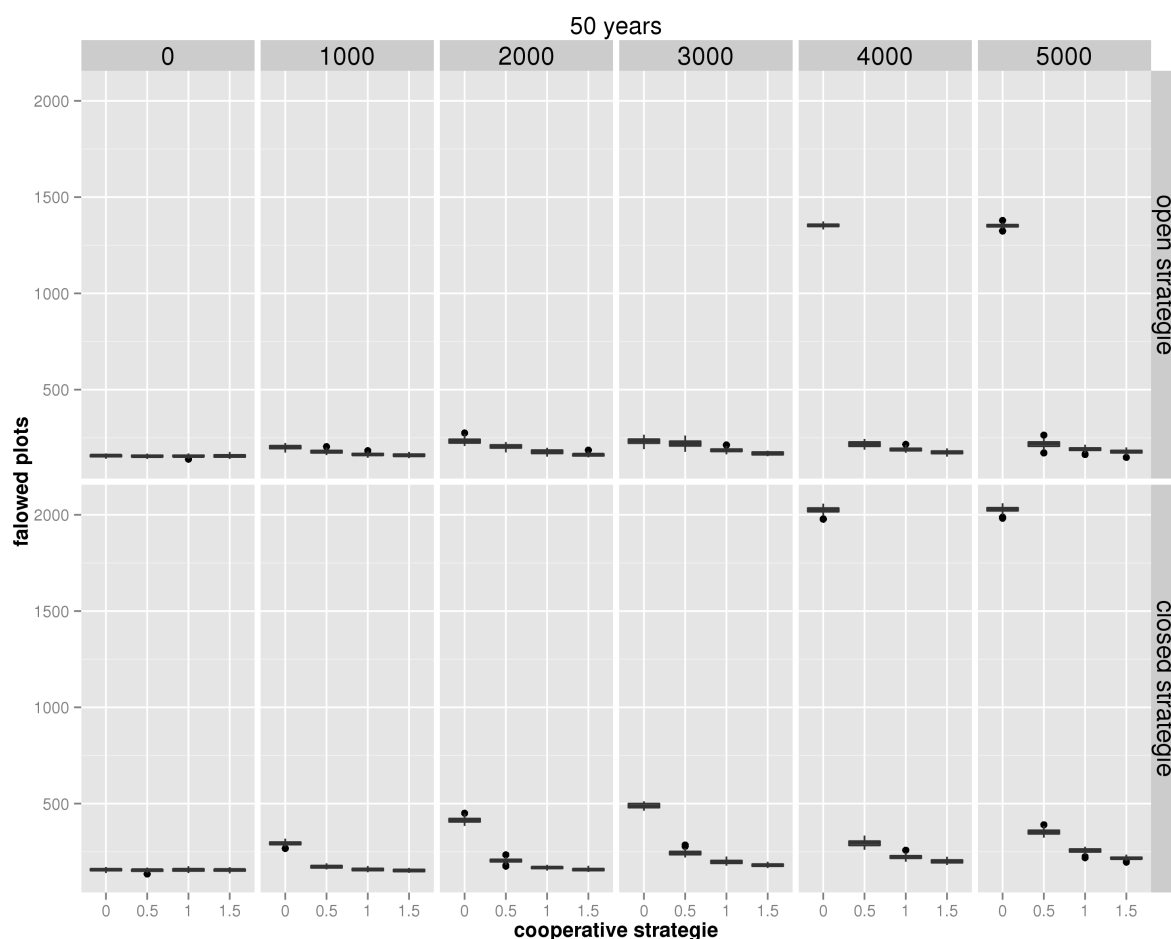


FIGURE 5.9 – Évolution du nombre de parcelles en friche sur 40 simulations en fonction de μ . La première colonne de "boxplot" représente le nombre de parcelles si aucune politique n'est mise en place. Les autres graphiques représentent les nombres de parcelles en ordonnée en fonction des valeurs de μ en abscisse. Chaque graphe pour une valeur de *bonus/malus* définie de 1000 à 5000.

les friches sont un phénomène existant, quel que soit le mode de gouvernance territoriale (y compris en cas d'absence de gouvernance).

Dans le cadre d'une politique ouverte, on observe une diminution de la friche sous l'effet conjoint des valeurs de *bonus* et de la stratégie μ . La valeur de seuil à partir des valeurs de *bonus* supérieures à 3000 est ici bien visible et entraîne pour $\mu = 0$ une très nette augmentation des friches viticoles. Ce comportement de la friche nous fera alors préférer les autres stratégies. Sur le graphique 2 de la figure 5.9 nous observons un comportement particulier pour la stratégie $\mu = 1$ (rétribution linéaire). Pour un *bonus/malus* de 1000, cette dernière génère le plus haut taux de friche (6%), mais ce taux diminue quand le montant du *bonus/malus* augmente.

Si nous nous attachons enfin à l'évolution spatiale du couvert viticole, nous allons

pouvoir prendre en compte l'indice de fragmentation décrit précédemment (fig. 5.10). Le premier résultat observable est la mise en évidence d'une logique dans le choix des parcelles, car la médiane des différentes conditions de simulation ne dépasse jamais 0.6. Le *bonus*, ici encore, joue un rôle de catalyseur, en ayant tendance à augmenter les valeurs de résultats pour chacune des deux politiques mises en jeu.

Dans le cadre d'une politique ouverte, on observe toujours l'effet de seuil pour $\mu = 0$ avec un *bonus* supérieur à 3000 : un nombre de parcelles conséquent est abandonné (c.f. fig 5.9), mais elles sont aussi très agrégées ce qui délimite clairement un front. De manière quasi inverse, ce sont pour des valeurs de μ 1 et 1.5 que la fragmentation est conservée assez basse, car les conditions d'abandon ne sont pas tranchées (c.f. 5.5).

Il est intéressant de noter que dans le cas de la mise en place de politique bornée, les résultats sont inversés, car les parcelles les plus hautes ne sont plus attractives. L'objectif du viticulteur est donc de se maintenir à une altitude proche de la valeur attendue par la coopérative. Ces comportements sont exacerbés par les valeurs de μ de 0 et 0.5.

5.1.3.2 Comportement à plus long terme (100 ans)

L'observation à l'aune du siècle n'a pas beaucoup de sens au regard des capacités d'anticipation proposées par les experts du GIEC, mais dans une démarche de pédagogie prospective, nous nous sommes néanmoins livrés à l'exercice. En effet, nous sommes face à un système dynamique. Des comportements qui semblent intéressants à « court terme » pourraient amener le territoire dans des situations plus complexes, et difficilement soutenables en l'état.

Il nous apparaît également intéressant de nous interroger sur certains comportements émergents sur un temps plus long, afin d'en comprendre la nature et les implications. Pour cela, nous nous attarderons sur deux indicateurs qui ont eu tendance à évoluer de manière intéressante : l'acidité des parcelles cultivées, et la clusterisation du paysage.

Nous observons sur la figure 5.11 que le maintien d'une politique bornée ou non entraîne des profils de comportement radicalement différents. Du point de vue de l'acidité (fig. 5.11(a)), le montant du *bonus* produit toujours le même effet éleveur, mais la politique de redistribution bornée permet de contre-balancer l'effet du *bonus* en stabilisant l'acidité. Si nous regardons la variance de l'acidité entre la politique de rétribution ouverte et bornée, nous constatons que le fait de contraindre les acidités par deux bornes permet une variance réduite. Ce qui veut dire que la période de maturité sera atteinte de manière relativement proche dans l'ensemble du vignoble réduisant la fenêtre temporelle d'apport de la vendange.

En examinant la figure 5.11(b) qui reprend les valeurs de clusterisation du vignoble,

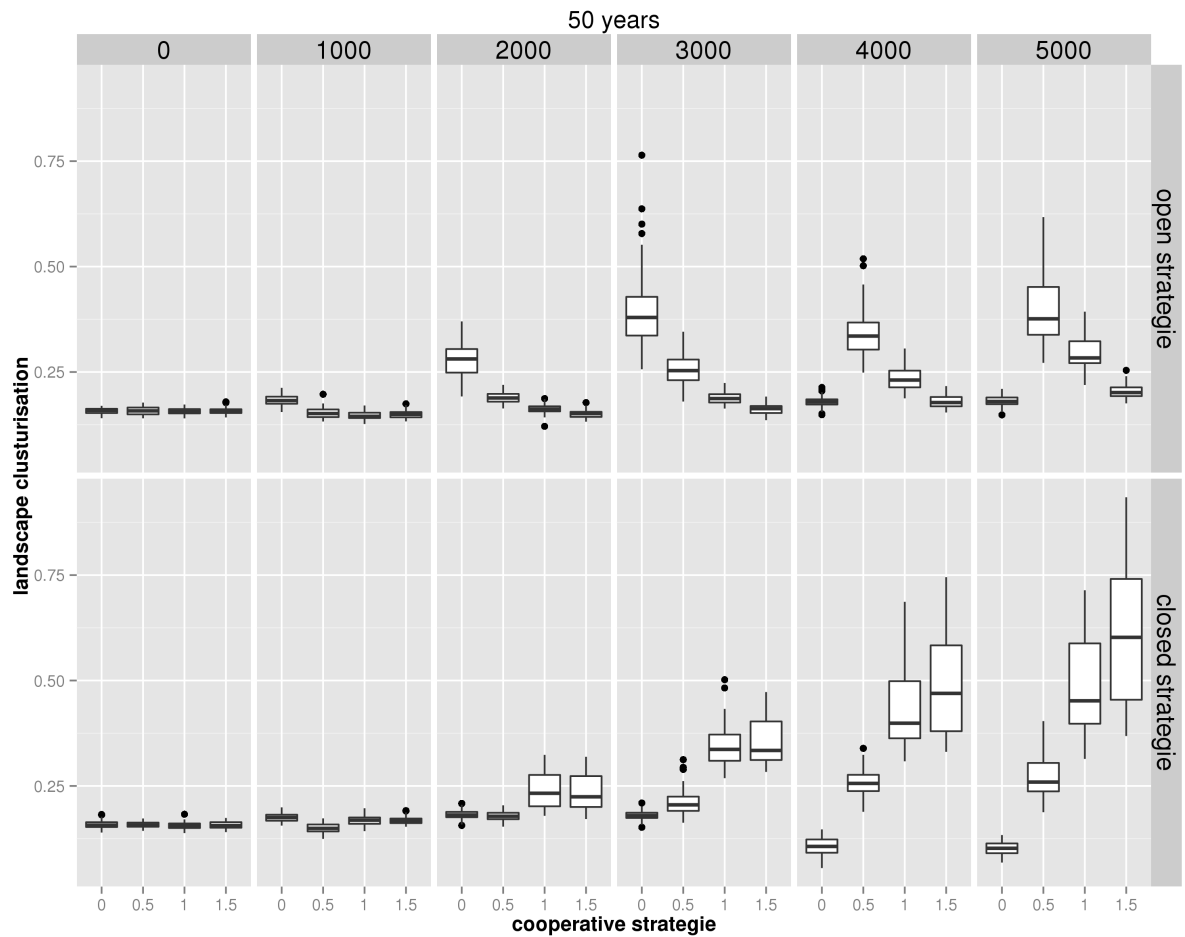
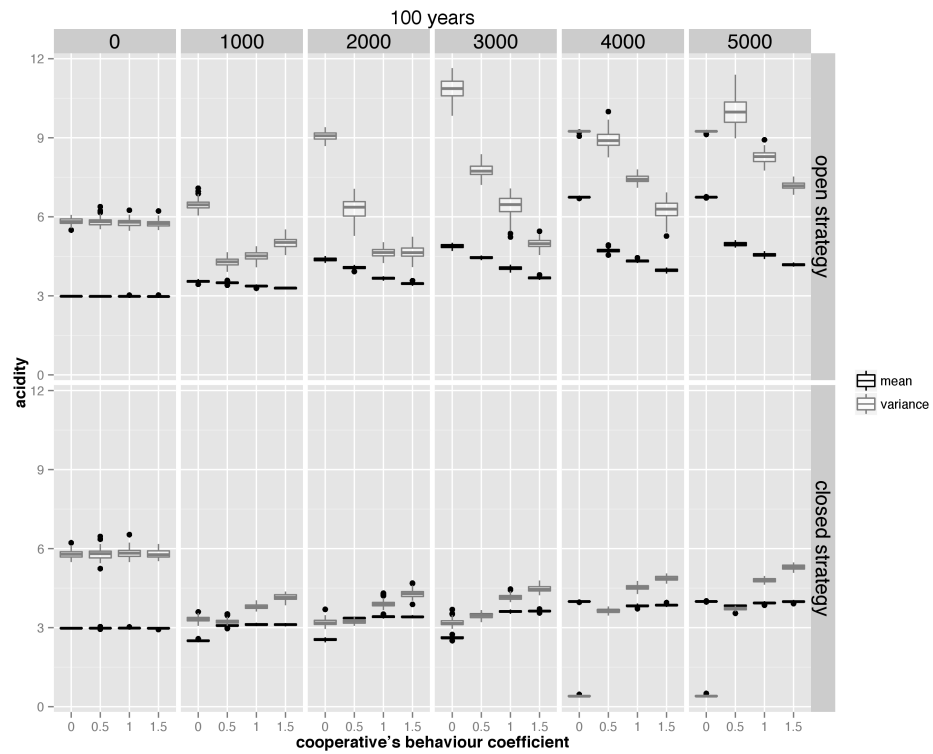
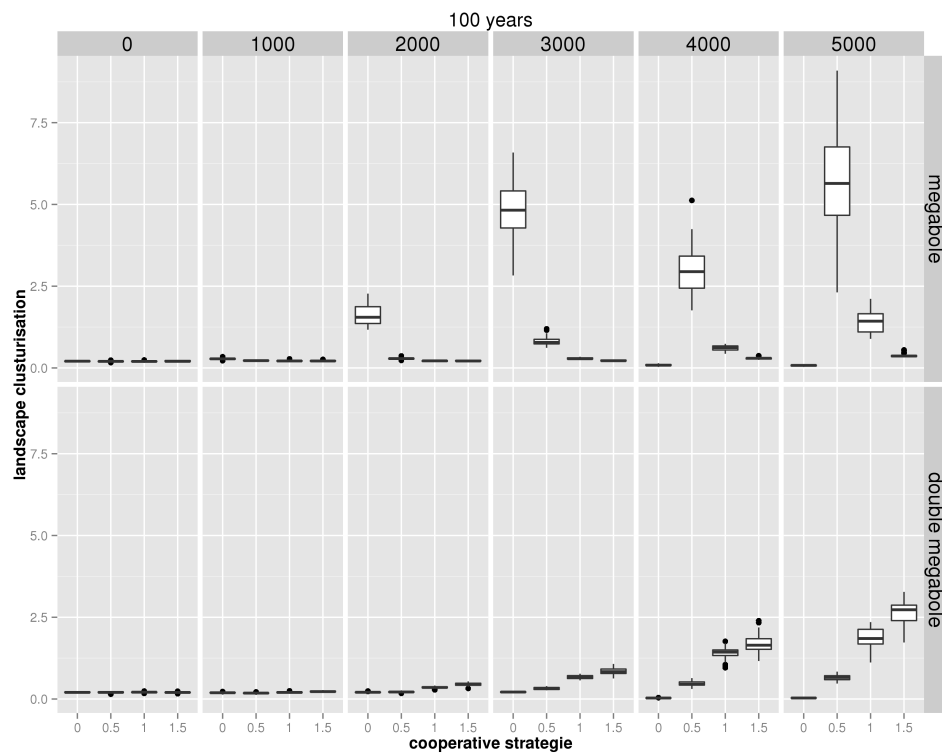


FIGURE 5.10 – Évolution de la fragmentation du vignoble sur 40 simulations en fonction de μ . La première colonne de "boxplot" représente le nombre de parcelles si aucune politique n'est mise en place. Les autres graphiques représentent le nombre de parcelles en ordonnée en fonction des valeurs de μ en abscisse. Chaque graphe pour une valeur de *bonus/malus* définie de 1000 à 5000..



(a)



(b)

FIGURE 5.11 – Résultat pour 40 simulations de chaque jeu de paramètres sur le temps long (100 ans). Valeur de l'évolution de l'acidité fig. (a), et de la fragmentation du vignoble fig. (b).

nous pouvons voir, là encore, les effets d'une politique ouverte ou bornée. En effet, l'introduction des deux limites pour l'acidité à échéance 50 ans 5.10 nous laissait imaginer une fragmentation plus forte (surtout dans les valeurs hautes de *bonus*). Il apparaît ici qu'à une échelle de temps plus longue, la politique bornée de la coopérative produit des structures moins frumentaires.

5.1.4 Discussions

5.1.4.1 Comportement à court terme (50 ans)

Chaque test de paramétrage est mis en parallèle avec la situation du territoire. Le premier paramétrage simule le comportement du territoire, si aucune indication n'est donnée aux viticulteurs quant aux attentes des œnologues et du service coopérateur de la coopérative, des organismes de gestion des AOC, des consommateurs, etc. Dans ce cas de figure qui pourrait représenter les années d'or du cru (1980), le viticulteur se retrouve livré à lui-même tout en ayant la "garantie" que son produit (le raisin) lui sera payé. Grâce à nos entretiens, nous savons que les viticulteurs ont tendance à maximiser leurs gains en cherchant à exploiter des parcelles moins pentues et plus proches du village. Ce type de comportement aboutit en 50 ans à des acidités totales moyennes qui restent dans la gamme acceptée par la coopérative (c.f. premier graphique de la figure 5.7), cela sans véritablement mettre en place une politique de territoire, mais les conséquences pourraient devenir plus facheuses à long terme. Pour éviter cela, la mise en place de politiques prospectives se réfléchit en amont (c.f. chap. 6).

Les parcelles abandonnées au bout de 50 ans sont les plus éloignées de la zone d'habitation, car le poids de la distance est trop important pour les viticulteurs qui préfèrent des parcelles moins pentues. Ce début de phénomène peut être qualifié, au regard de l'évolution historique des vignobles français, comme une inversion de terroir (HINNEWINKEL 2010) due à une recherche de simplification du travail et des tentatives de mécanisation. Phénomène qui, dans le cas de Banyuls, ne peut s'étendre par manque de terres propices à la mécanisation.

À partir du moment où la coopérative met en place un paiement différencié sous forme d'un *bonus/malus* sur l'acidité totale de la vendange liée aux parcelles, les comportements spatiaux des viticulteurs pour le choix des parcelles changent. Ce phénomène est accentué par la valeur du *bonus/malus*. En effet, ayant toujours pour objectif de maximiser leurs gains, l'ouverture d'un *bonus/malus* redistribue l'intérêt que portent les viticulteurs aux différentes parcelles.

En contexte ouvert (« open stratégie » sur les différents graphes), le nombre de parcelles augmente grâce aux primes attribuées aux viticulteurs (c.f. fig. 5.8), mais un plus grand nombre (par rapport aux conditions sans coopérative) est également abandonné (c.f. fig.

5.9). Cet abandon plus important a pour effet de fragmenter le paysage (c.f. fig. 5.10).

Pour une stratégie $\mu = 0$ (comportement binaire de la part de la coopérative), la prime (jusqu'à 3000 euros par parcelle) favorise une expansion très rapide du vignoble, avec, dans chacun de ces cas, très peu d'enfrichement (moins de 2% c.f. figure 5.9). À partir de 3000 euros de prime, la couverture viticole diminue (en 50 ans), et le nombre de friches augmente. Cela met en évidence un effet de seuil où le *malus* devient supérieur aux gains, ce qui compromet leur viabilité économique et entraîne une vague d'abandon, et ce quelle que soit la politique de redistribution de la coopérative.

Si l'on s'intéresse maintenant à la stratégie $\mu=0.5$ (qui favorise les acidités proches de celles demandées par la cave (c.f. figure 5.5)), nous constatons, là aussi, que plus la prime augmente plus les surfaces viticoles sont étendues au bout de 50 ans (figure 5.8). Toutefois, dans les valeurs paramétrées ici, nous n'atteignons jamais le taux de recouvrement autorisé dans le cas précédent, et nous conservons un taux d'enfrichement très stable (c.f. figure 5.9).

Enfin, pour les valeurs de μ comprises entre 1 et 1.5, nous notons que l'acidité moyenne totale sur les parcelles cultivées ne varie pas beaucoup suivant les valeurs de *bonus/malus*. Pour un μ de 1 (rétribution linéaire c.f. figure 5.5), les surfaces cultivées en vigne augmentent de manière continue avec l'augmentation du *bonus/malus* perçu par les agriculteurs. Le nombre de parcelles en friche diminue de la même manière avec l'augmentation de la prime, ce qui traduit le fait que l'acidité moyenne des parcelles cultivées (c.f. figure 5.7) soit supérieure à la valeur seuil demandée par la cave sur cette échelle de temps. Dans ces conditions, au vu du calcul linéaire proposé pour le paiement différencié, les parcelles qui ne répondent plus au critère d'acidité ne sont pas abandonnées pour autant. Comme précédemment, dans la mesure où les gains restent « acceptables » pour le viticulteur, ce dernier paiera un *malus* tant qu'il reste inférieur aux bénéfices.

Dans toutes ces situations de μ la variance de l'acidité (fig. 5.7) est acceptable tant que le *bonus* ne dépasse pas 2000 euros. Au-delà, des comportements aberrants de plantation de plus en plus hauts entraînant une fragmentation paysagère sont encouragés.

Il est intéressant de noter que le nombre de parcelles viticoles (dans les conditions de paramétrage du graphique 2 de la figure 5.8 pour un μ de 1.5) est plus élevé que dans les conditions de primes suivantes, tout en restant moins élevé que dans le cas de la simulation témoin (graphique 1). Dans les graphiques de la figure 5.9, nous observons exactement le même type de dynamique de manière inversée en ce qui concerne le pourcentage de parcelles en friche, ce qui se traduit ici par une surface agricole très stable et peu extensible. En effet, les parcelles qui ne sont pas viticoles par manque d'intérêt sont mises en friche, et l'extension territoriale est complètement tributaire du montant du *bonus* proposé par la cave. Les primes très hautes vont contraindre très fortement l'intérêt que pourra porter le viticulteur à une parcelle, et vont donc donner une orientation forte au territoire. Tandis

que, pour un *bonus/malus* bas, le viticulteur bénéficie de plus de flexibilité sur les parcelles qu'il souhaite mettre en culture tout en subissant, malgré tout, une contrainte.

En contexte borné, les stratégies μ comprises entre 1 et 1.5 sont gagnantes. Elles permettent de maintenir une acidité dans la fourchette attendue (fig. 5.7), tout en stimulant le nombre de parcelles cultivées (c.f. fig. 5.8) au-delà de ce qu'il est possible de faire dans un contexte ouvert et en limitent le nombre de friches au plus bas (fig. 5.9). Elles ont toutefois l'inconvénient de fragmenter beaucoup plus le paysage (fig. 5.10) et d'occasionner une variance de l'acidité moyenne plus forte sur le vignoble (fig. 5.7). L'observateur sera donc devant un paysage à dominante viticole, mais constitué d'une mosaïque de parcelles en vigne et en maquis. La cave devra, quant à elle, considérer sa période de vendange sur une fenêtre temporelle relativement étendue (de manière générale plus étendue qu'en situation de politique de redistribution ouverte).

5.1.4.2 Comportement à plus long terme (100 ans)

Comme nous l'évoquions déjà dans la partie 5.1.3.2, nous avons poussé l'exploration des résultats sur des échelles de temps plus long afin d'en comprendre les mécanismes (VARENNE 2011 ; THOM 2009). Les résultats ne peuvent en aucun cas être opérationnels. En effet, l'absence de capacité d'adaptation que nous allouons aux viticulteurs ou à la coopérative nécessiterait de complexifier les interactions.

Nous pouvons néanmoins explorer les implications du maintien d'une politique de cave sur le temps long pour pousser à son paroxysme les logiques de politiques territoriales qui peuvent être menées et maintenues sur un territoire. Ici, nous considérons le paysage comme la résultante des interactions et contraintes individuelles où chaque agent, à son niveau, est producteur de discontinuité (HINNEWINKEL 2010, p.176), de rupture d'unité, mais où la dynamique collective va structurer les grandes formes paysagères.

Si, à échéance 50 ans, deux stratégies se dégagent : dans un contexte politique ouvert, la plus propice au développement viticole est la stratégie binaire, avec $\mu = 0$ (au moins jusqu'à un *bonus* de 3000 euros. c.f. fig. 5.8). Dans un contexte de rétribution bornée, les cas de configurations mettant en scène un μ entre 1 et 1.5 permettent d'atteindre des surfaces viticoles supérieures, dans une configuration d'acidité meilleure (acidité moyenne et variance maîtrisée).

Il se trouve que sur le temps long la politique de rétribution bornée pourrait être préférée avec des valeurs de μ à 0.5 favorisant les acidités en proche des bornes. En effet, les résultats de la figure 5.11(a) montrent que les viticulteurs sont capables de fournir de la vendange avec une maturité dans la gamme attendue et sur une fenêtre temporelle très courte (peu de variances). Les surfaces viticoles ne sont pas aussi étendues que dans les stratégies avec un μ supérieur, ou avec le même μ dans un contexte ouvert, mais un

compromis semble avoir été trouvé, ce qui est corroboré par la très grande clusterisation des parcelles observée sur la figure 5.11(b).

Quand, pour une stratégie $\mu=1.5$ dans un contexte ouvert, les valeurs extrêmes d'acidité supérieures au seuil sont favorisées, il serait attendu que les viticulteurs "remontent la pente"¹⁶ pour trouver des parcelles extrêmement acides et ainsi maximiser leurs gains. Or, cette spirale positive n'arrive pas à s'initier par manque de capitaux. Pour optimiser les gains, il faudrait déplacer les exploitations sur les sommets de versant. Or, pendant un certain temps, il reste suffisamment acceptable de cultiver des parcelles proches du lieu d'habitation et de payer un *malus* faible. Néanmoins, quand arrive le moment où l'acidité basse entraîne un *malus* élevé, la parcelle est abandonnée, et le viticulteur n'a pas nécessairement les moyens d'acheter une parcelle plus élevée. Nous illustrons par là l'exemple même d'un système où le manque d'anticipation conduit à la ruine.

Le contexte borné permet aux viticulteurs de freiner les comportements extrêmes. La zone d'intérêt étant restreinte, et les « règles du jeu » étant suffisamment connues de tous, les comportements menant à la ruine sont moins présents.

5.1.4.3 Discussion générale

De manière plus générale, nous constatons que, quelles que soient les stratégies, celles-ci ont un effet direct sur le maintien d'une acidité totale de la vendange livrée à la cave. Nous pouvons donc imaginer que l'entité parcelle sur laquelle joue la coopérative est une résolution pertinente dans l'optique d'une gestion globale de la vendange en cave.

Cependant, se concentrer sur cet unique critère n'est pas suffisant. Le fait de privilégier l'extension du vignoble va engendrer une certaine fragmentation à court terme et amplifier la variance de l'acidité. Tandis que se concentrer sur le maintien de l'acidité et la réduction de la variance limite l'extension du vignoble (donc les revenus des viticulteurs).

Une fois ces considérations prises en compte, il semble malgré tout intéressant de préférer une politique de redistribution des gains sur le vignoble basée sur deux bornes dans le but de jouer sur l'anticipation et la stabilisation des dynamiques spatiales.

D'un point de vue opérationnel, nous proposons ici de nous attarder, avec une résolution à 50 ans, sur trois *scenarii* :

1. Si l'**objectif** est orienté vers la **production** : entre 1000 et 3000 euros par hectare de *bonus*, nous serons tentés de privilégier un μ de 0 dans le cadre d'une politique de redistribution ouverte. Cette « stratégie binaire » est efficace pour dynamiser l'extension viticole. Le résultat est déjà très intéressant avec un *bonus/malus* de 1000 qui permet d'augmenter les surfaces viticoles et de limiter le phénomène d'enfrichement (sur 50 ans) jusqu'à une valeur de *bonus* de 3000. Au-delà nous sommes

16. "La viticulture remonte la pente" était le titre du congrès du CERVIM qui s'est tenu à Lyon en 2012.

face à un effet de seuil. L'acidité reste relativement basse, mais sa variance bondit, obligeant la cave à proposer une fenêtre de vendange très large.

Cette même stratégie, mise en place dans le cadre d'une politique bornée, réduit l'acidité autour de $3 \text{ g} \times \text{L}^{-1}$ d'acide sulfurique et maintient également la variance très basse, mais contraint drastiquement le vignoble ;

2. **La solution intermédiaire** consiste à borner la politique de redistribution et à jouer sur des stratégies μ entre 1 et 1.5. Le territoire se place alors dans un contexte de grosse production avec des acidités légèrement plus hautes que celles attendues ; mais, par une limitation de la variance, la fenêtre de vendange est réduite, ce qui favorise une fragmentation du paysage ;
3. Si l'objectif est de **garder une dynamique** des paysages viticoles **maitrisée**, la *stratégie douce* avec un $\mu=0.5$ dans un contexte borné est sans doute plus appropriée. C'est une stratégie qui gagne sur le temps long (sur la figure 5.11(a)) en maintenant l'acidité et la variance de l'acidité dans les valeurs actuelles. Le couvert végétal se développe, mais reste moins dynamique que dans les stratégies 1 et 1.5 tout en n'handicapant pas son développement comme c'est le cas pour un μ de 0 dans ce contexte de redistribution. Enfin la fragmentation reste limitée ce qui permet de conserver la structure paysagère connue.

Conclusion

Ce travail apporte des éclaircissements à plusieurs niveaux. D'une part, de part sa dimension très localisée et appliquée au territoire de l'AOC Banyuls - Collioure, nous sommes en mesure de proposer des résultats opérationnels mobilisables en partie par les acteurs du territoire. La montagne peut être perçue comme l'une des voies possibles d'adaptation au changement climatique, car les températures moins élevées en « altitude » permettraient de conserver des dates de vendange traditionnelles. Les prises de décision et d'orientation ne se feront pas sans une prise de conscience au niveau des coopératives de leur intérêt dans la gestion du territoire. Or, la mise en place d'une politique de rémunération est un processus difficile (TOUZARD, J. F. DRAPERI *et al.* 2003) qui implique une démarche d'innovation et une conception claire des conséquences d'une orientation (CHIFFOLEAU 1998 ; TOUZARD, CHIFFOLEAU *et al.* 2008). Dans cette configuration, la coopérative est un acteur majeur du territoire puisqu'elle dispose théoriquement de leviers d'action particulièrement efficaces. Ces politiques sont également le résultat de consensus entre acteurs locaux, lesquels ne poursuivent pas nécessairement les mêmes buts même s'ils partagent le même outil de production (coopérative, AOC, etc.).

Grâce à l'exploration de ce modèle, nous pouvons mettre en évidence d'une part les contradictions qui émergent à notre niveau entre les contraintes sociales, individuelles, et

les volontés de sauvegarde paysagère. La coopérative se doit en effet de trouver un juste équilibre entre sa survie (conservation de son capital), la survie de ses coopérateurs (proposer une juste rémunération), et le maintien du paysage viticole sur lequel est bâtie une grande partie de son marketing, de celui de la région et de l'offre touristique (CONSTANS 2010 ; ALCARAZ 2001).

Ce paysage viticole, largement plurifactoriel (contraintes économiques, contraintes sociales, contraintes orographiques, contraintes physiologiques et climatiques...), commence à révéler quelques facettes de sa complexité. Entre paysage construit, paysage perçu et paysage vécu, nous avons mis en évidence les implications et la perméabilité des actions entre les différentes structures collectives et individuelles.

Or, la redistribution des intérêts des parcelles modifie le territoire perçu par les acteurs ce qui peut produire des tensions, car les nouvelles configurations peuvent être en contradiction avec les stratégies développées individuellement par les acteurs. La simulation nous permet, dans ce cas là, de nous mettre en capacité d'observer et comprendre de nouvelles formes paysagères issues de ces conflits pour pouvoir ensuite les explorer d'un point de vue géographique.

Dans cette section, nous nous sommes positionnés encore une fois à l'échelle meso, pour fournir des outils de compréhension relativement généraux aux acteurs/gestionnaires du territoire. Pour les viticulteurs qui pourraient être davantage préoccupés par des considérations à grande échelle, les résultats sont encore trop peu spécifiques. Nous allons donc effectuer un dernier saut spatial pour réfléchir à une problématique de gestion parasitaire à l'échelle de la parcelle pour les viticulteurs.

5.2 Le modèle CeLL : Confusion Landscape Lobesias ; entre paysage et dynamique de population

Le modèle *CeLL*

Échelle spatiale : modèle pensé à l'échelle de quelques parcelles

Agents : sont mobilisés dans ce modèle, une grille de cellules, des agents *L. botrana*, et des pièges (diffuseurs de phéromones)

Question(s) :

- La confusion sexuelle a-t-elle un impact sur les populations d'eudémis simulées ?
- L'espace est-il un facteur influençant la dynamique de population du parasite ?
- Quelles sont les stratégies de lutte intégrée optimale pour lutter contre ce microlépidoptère ?
- Quelles sont les conséquences d'un passager clandestin dans la lutte intégrée ?

Les travaux autour de la question des parasites et de la modélisation des disséminations sont nombreux, abordant les dynamiques spatiales et temporelles à des résolutions très diverses. Dans cette section, nous nous inscrivons dans une démarche de réflexion résolument à l'échelle fine, dans un contexte viticole, en nous intéressant à *Lobesia botrana*, communément appelée eudémis. Nous proposons ici une approche de modélisation co-construite entre monde scientifique et monde technique. Ce travail a la double ambition i) de s'intégrer dans la démarche de théorisation entre les expériences de laboratoire et les expériences en plein champ en tant qu'étape de formalisation, ii) de proposer des clefs de compréhension mobilisables par les viticulteurs pour améliorer les stratégies de lutte intégrée par la connaissance des mécanismes en jeu.

Introduction

Lobesia botrana, communément appelée eudémis, est un microlépidoptère hétérocère, ravageur du vignoble européen dont les larves engendrent des dégâts directs en se nourrissant des organes reproducteurs de la plante, ou en favorisant les infections au niveau des baies de raisin par des pathogènes saprophytes.

Les premiers ravages de cette espèce sont décrits dans le courant du XIX^e siècle ou au début du XX^e siècle selon les régions (GALET 1982 ; BRIAND 2009). Aujourd'hui, elle se retrouve surtout sur les pourtours méditerranéens, au Proche-Orient et en Asie Mineure. L'eudémis avec la cochylys (*Eupoecilia ambiguella*) sont considérées comme les principaux ravageurs de la vigne cultivée depuis la crise du phylloxera (ROEHRICH *et al.* 2000). Nous

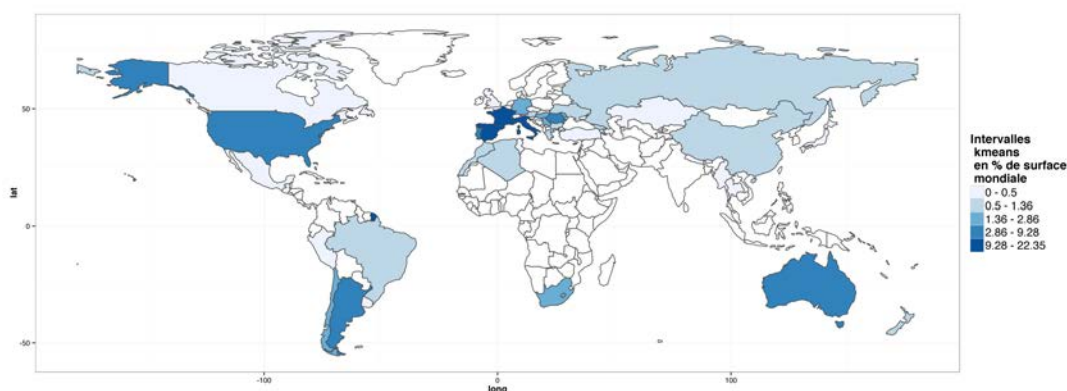


FIGURE 5.12 – La répartition des surfaces viticoles mondiales en 2010. Nous situons les pays producteurs et la proportion de la production mondiale (sources : Université d'Adélaïde)

comprenons bien la place qu'elle occupe dans la littérature quand nous constatons que plus de la moitié des vignobles mondiaux se situent dans cette zone (fig. 5.12¹⁷).

L. botrana est un ravageur polyphage qui accomplit son cycle sur un grand nombre de plantes hôtes. 40 espèces différentes (BALACHOWSKY et MESNIL 1935 ; TASIN *et al.* 2006) ont été répertoriées parmi lesquelles : *Vitis sp.*, *Cornus sp.*, *Lonicera sp.*, *Viburnum sp.*, *Ribes sp.*. Cette diversité de plantes hôtes rend la lutte contre ce ravageur particulièrement difficile à comprendre et à mobiliser.

Comme la plupart des espèces de l'ordre des *Lepidoptera*, l'accouplement des *L. botrana* est précédée d'une « parade » durant laquelle la femelle libère des phéromones ce qui déclenche sur les mâles un comportement de recherche de cette dernière (BRIAND 2009 ; SCHMITZ 1992). Le développement de *L. botrana* est largement lié aux températures, c'est pourquoi un certain nombre de travaux propose des modèles mathématiques permettant de « prédire » les dates des vols d'adultes (BOVEY 1966 ; J. A. LOGAN *et al.* 1976).

Si les dégâts peuvent être observés sur les jeunes pousses ou les organes de reproduction, c'est au moment de la véraison (au moment de la ponte de la troisième génération chez les eudémis) que les dégâts sont le plus dommageables pour les viticulteurs. En effet, une fois écloses, les larves vont percer la pédicelle pour se nourrir de la pulpe, ce qui ouvre la porte aux maladies cryptogamiques (oïdium, mildiou, etc).

17. La carte a été réalisé à partir de l'inventaire ampélographique mondial proposé par l'Université d'Adélaïde. Les données sont accessible à l'adresse suivante : <http://www.adelaide.edu.au/wine-econ/databases/winegrapes/>, site consulté le 19 avril 2015.

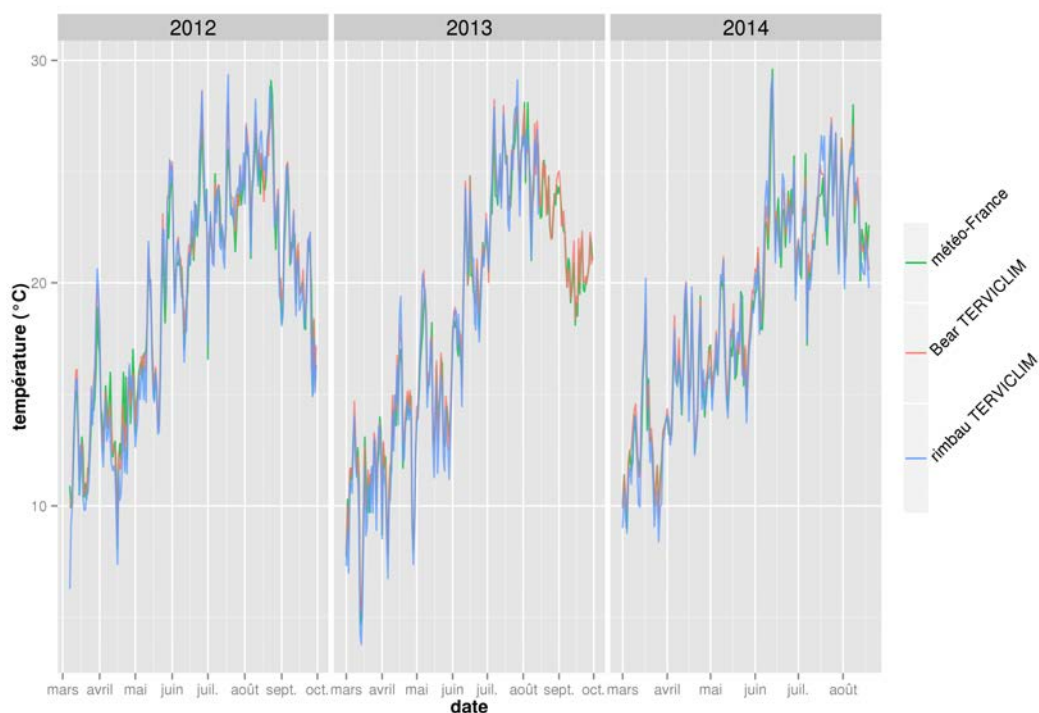


FIGURE 5.13 – Comparaison entre les données de température des capteurs TERVICLIM journalisées, et les moyennes des températures quotidiennes sur 24 mesures de Météo France

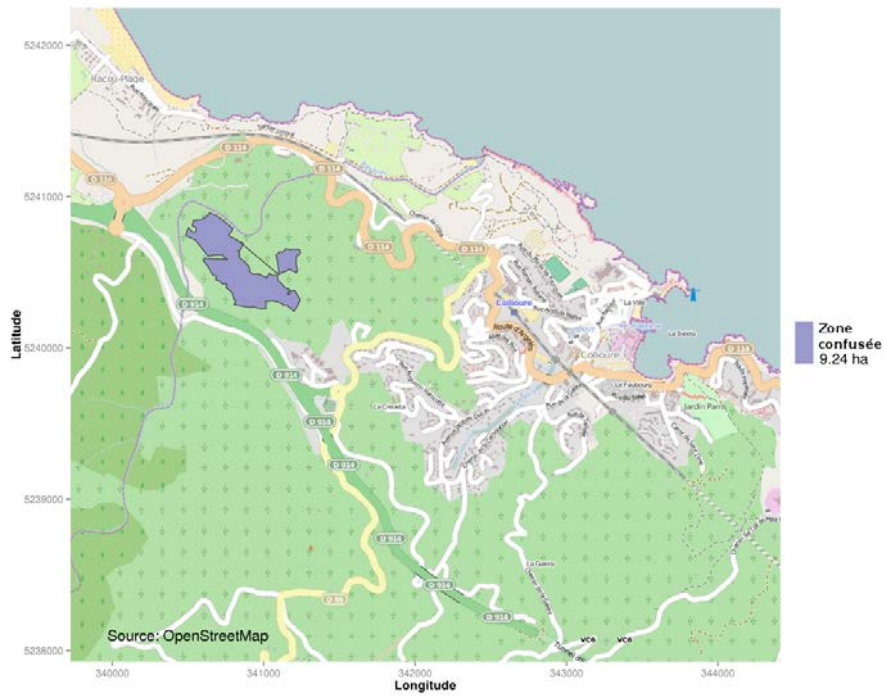
5.2.1 Le contexte particulier de la Côte Vermeille

Depuis 1999, le Groupement de Développement Agricole (GDA) du cru Banyuls et des Albères effectue un suivi de l'infestation par *L. botrana* sur des parcelles témoins, et, depuis 2013, effectue des expérimentations de lutte par confusion sexuelle sur des îlots de culture identifiés comme « problématiques ».

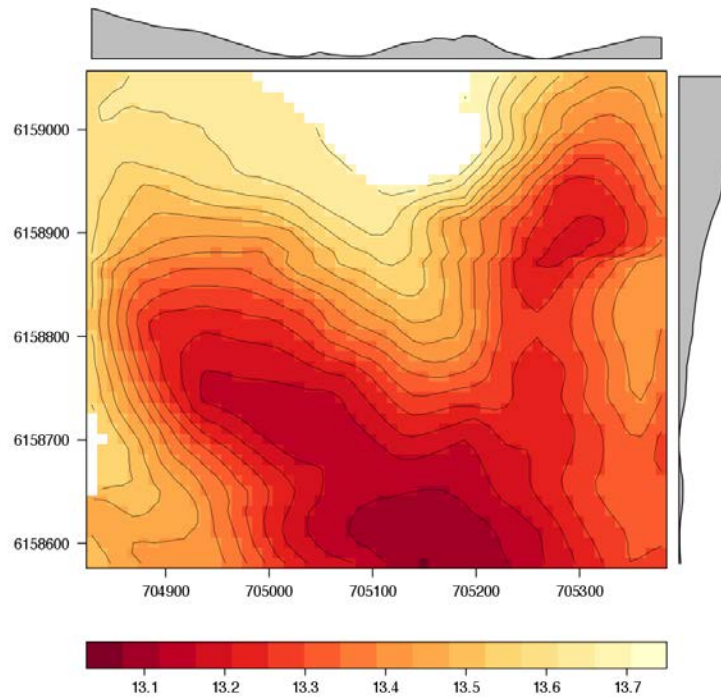
Par ailleurs depuis 2012, grâce à l'ANR TERVICLIM, le cru est doté d'un ensemble de capteurs de température effectuant des relevés toutes les 10 minutes (fig. 5.13). Ces données nous permettent, pour certaines journées (où les corrélations entre la température et l'orographie sont fortes), de proposer des cartes spatialisées de températures (c.f. fig. 5.2(a) pour le 15 août 2012 ou fig. 5.2(b) pour le 16 mars 2012).

Nous disposons donc, depuis 2012, de données de température journalisées et de comptages d'individus piégés (c.f. fig 5.15) ce qui ouvre la voie à l'étude détaillée des dynamiques de diffusion de *L. botrana*.

Les données de terrain nous permettent de constater une très grande variation dans les dynamiques de population sur notre parcelle témoin. Si 2011 (c.f. fig. 5.15) ressemble à une année typique avec, de manière assez bien identifiée, les trois générations de papillons (les pics étant autour de mi-mai, mi-juin et mi-août), 2012 et 2013 sont deux cas différents



(a)



(b)

FIGURE 5.14 – Carte de la zone d'étude. (a) localisation à petite échelle de la zone des parcelles confusées sur fond de carte OpenStreetMap (commune de Collioure), (b) variations de température moyenne annuelle sur la zone étudiée. Les graphiques dans les marges de la fig (b) sont les moyennes des températures en X et en Y.

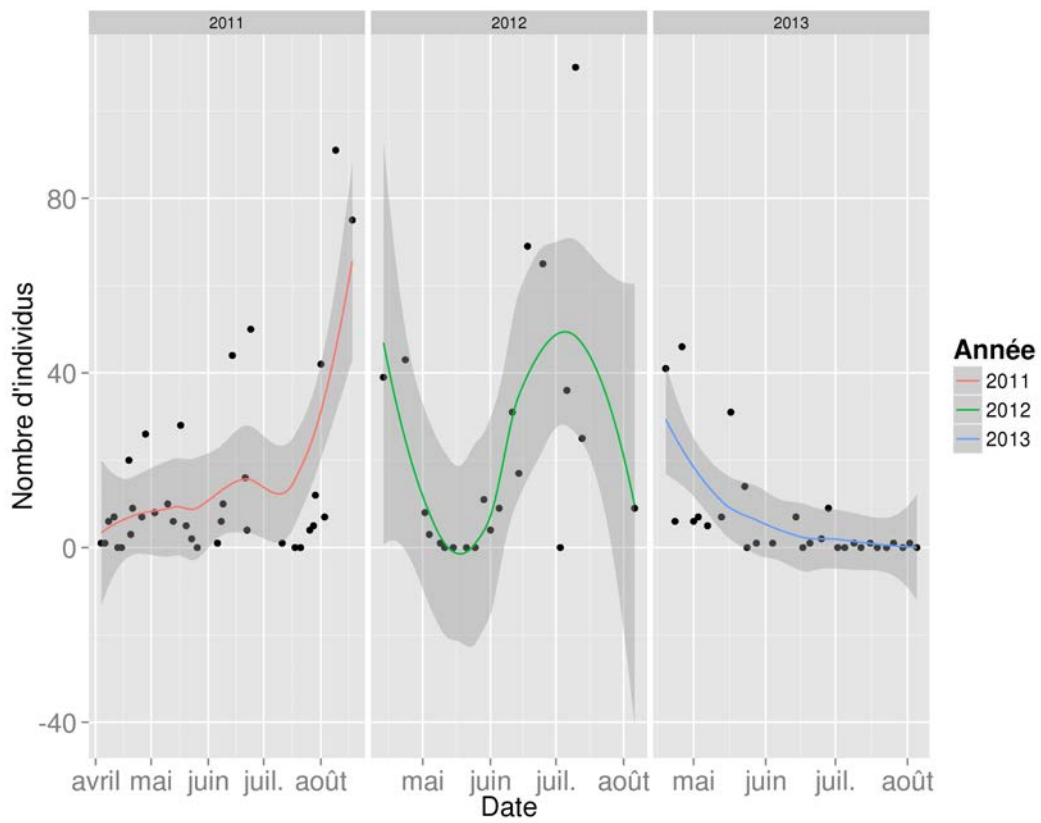


FIGURE 5.15 – Comptages des individus de *L. botrana* mâles sur la parcelle de "la Tourette" pour la période 2011 à 2013

d'« écoulement » de la population. De manière générale, nous observons sur l'AOC les vols de première génération aux environs du mois de mai (représentés sur la fig 5.15 pour 2011); cependant de grandes variations apparaissent entre les années et les régions en fonction des conditions climatiques.

Ce type de variations interannuelles nous interpelle. C'est à la recherche, la délimitation et la calibration des mécanismes qui entrent en jeu dans ces dynamiques de population que nous nous sommes intéressés.

5.2.2 Matériels et Méthodes : ODD

Le traitement des données issues de l'analyse de sensibilité a été réalisé avec le logiciel de statistique R (TEAM 2014). La formalisation de la description du modèle se conforme au protocole de description ODD (Overview, Design concept, Details)(GRIMM, U. BERGER, BASTIANSEN *et al.* 2006; GRIMM, U. BERGER, DEANGELIS *et al.* 2010; RAILSBACK et GRIMM 2011) en prenant en compte l'extension de l'ODD+D (+D pour Decision making)(B. MÜLLER *et al.* 2013).

5.2.2.1 Développement du modèle

Objectifs

Les études autour de *L. botrana* se sont multipliées depuis les années 80. Si leurs sujets et leurs formes sont diverses, il nous a semblé intéressant de continuer à explorer les sujets par l'intermédiaire des systèmes multi-agents pour tenter d'apporter un éclairage sur les processus et les ordonnancements qui entrent significativement en jeu dans les interactions entre le vignoble, l'espace, la plante, les parasites et les viticulteurs.

Ce modèle propose d'explorer :

- la place de l'espace dans la modélisation de l'infestation,
- une optimisation des techniques de lutte par phéromones,
- la place du contexte social et des passagers clandestins dans la lutte intégrée.

Entités, variables, et échelles

Dans CELL, nous avons implémenté trois types d'agents (fig. 5.16). Les agents eudémis (*L. botrana*) et la classe *patch* vont former l'environnement sous forme d'une grille de cellules. C'est l'unité spatiale de référence qui représente $2m^2$. Leur agrégation va constituer les parcelles viticoles (*vineyard_plot*) et le paysage (*landscape*). Enfin, dans certaines simulations, nous explorerons les méthodes de lutte par phéromones. Nous avons donc introduit le troisième type d'agents, les agents *trap*, lesquels vont diffuser des phéromones.

L. botrana est un lépidoptère qui va passer par quatre phases au cours de son existence (œuf, larve, chrysalide, adulte). Ces phases sont passées à l'agent dans *phase* et

phaseNumber. Chaque agent aura un âge en phase adulte et un sexe qui différenciera les comportements. La série d'attributs notée a, b, c, t dans la figure 5.16 va permettre aux agents de se développer en fonction de leur environnement (c.f. sous modèles 5.2.2.3). Chaque agent connaîtra la *génération* à laquelle il appartient, et pour les femelles le nombre d'accouplements effectués (*nb-mating*). Ces dernières sont, par ailleurs, dotées d'un « drapeau » qui les empêche de s'accoupler quand elles sont en gestation (*reproductionFlag*) et d'un compteur de temps de gestation (*gestationTime*).

Les agents de classe *patch* sont des cellules carrées qui constituent la grille environnementale des agents. Ils ont comme attribut le fait d'être ou non viticoles, et le cépage qui est planté sur la parcelle (*variety*). Si le patch est confusé (*confuse*), il comportera le moment où arrivent la fleur de la vigne (*flower_time*), l'accumulation thermique (*thermalAcum*), le volume de phéromones issus des agents eudémis (*Ppheromone*), et le volume de phéromones qui sont dégagés par les agents *trap* (*Ppheromone-trap*). L'attribut *mixed-pheromone* va contenir le niveau de phéromone le plus important (issu des pièges ou des lépidoptères). Enfin *occupe* est un booléen qui permet de savoir si le patch est occupé par des agents *L.botrana*.

L'espace de modélisation se focalise sur une zone sur laquelle des comptages sont effectués depuis 1999 par le GDA¹⁸ du cru Banyuls et des Albères. Cette zone de 9 hectares en bordure occidentale de la Côte Vermeille (fig. 5.14(a)) fait partie, depuis 2013, du réseau d'expérimentation sur la confusion sexuelle menée par le GDA. L'espace sur lequel nous travaillons dans le modèle mesure 5 km² et contient la zone de confusion ainsi que les parcelles non confusées.

Depuis 2012, un capteur de température du réseau de l'ANR-JC TERVICLIM¹⁹ est installé sur la zone permettant d'avoir des relevés de température précis (infra-journaliers) sur la zone d'étude.

Dans ce modèle, nous cherchons à connaître les conséquences des mouvements des lépidoptères sur les possibilités d'accouplement. Nous avons décidé que chaque itération du modèle représentera une journée.

Processus et Ordonnancement

Les types de processus qui s'activent dans ce modèle concernent les patches, les agents *L.botrana*, et les diffuseurs de phéromones. Nous nous intéressons ici à l'enchaînement des processus. La description des sous-modèles sera traitée dans la partie 5.2.2.3.

- Processus liés aux patches
 - La température (n° 1 sur la fig. 5.17). Elle est mise à jour grâce aux relevés de terrain effectués avec le capteur de l'ANR-JC TERVICLIM présent sur la zone.

18. Groupement de Développement Agricole.

19. <http://terviclim.in2p3.fr/>, site consulté le 07 octobre 2014.

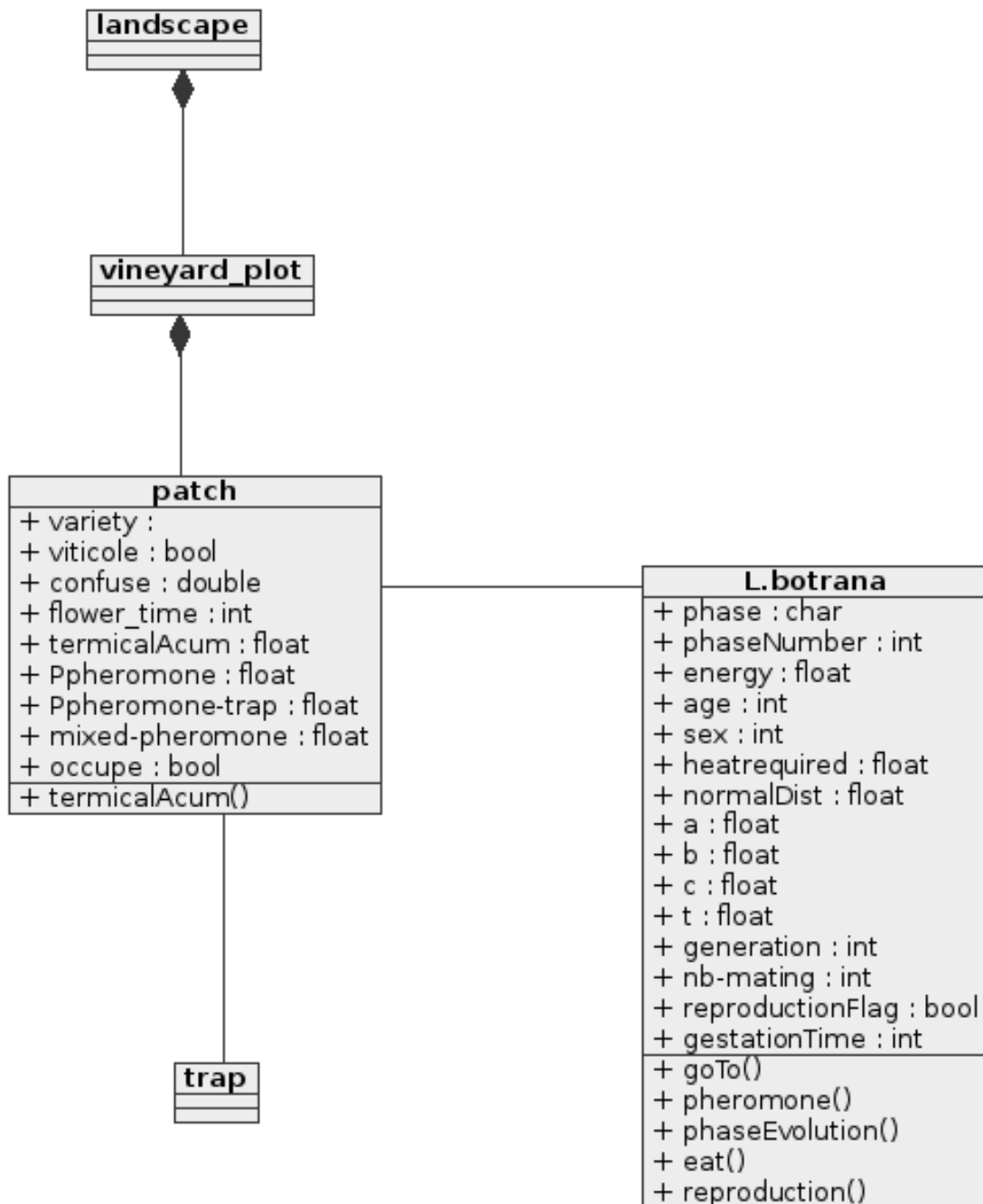


FIGURE 5.16 – Diagramme UML de classe pour le modèle CELL

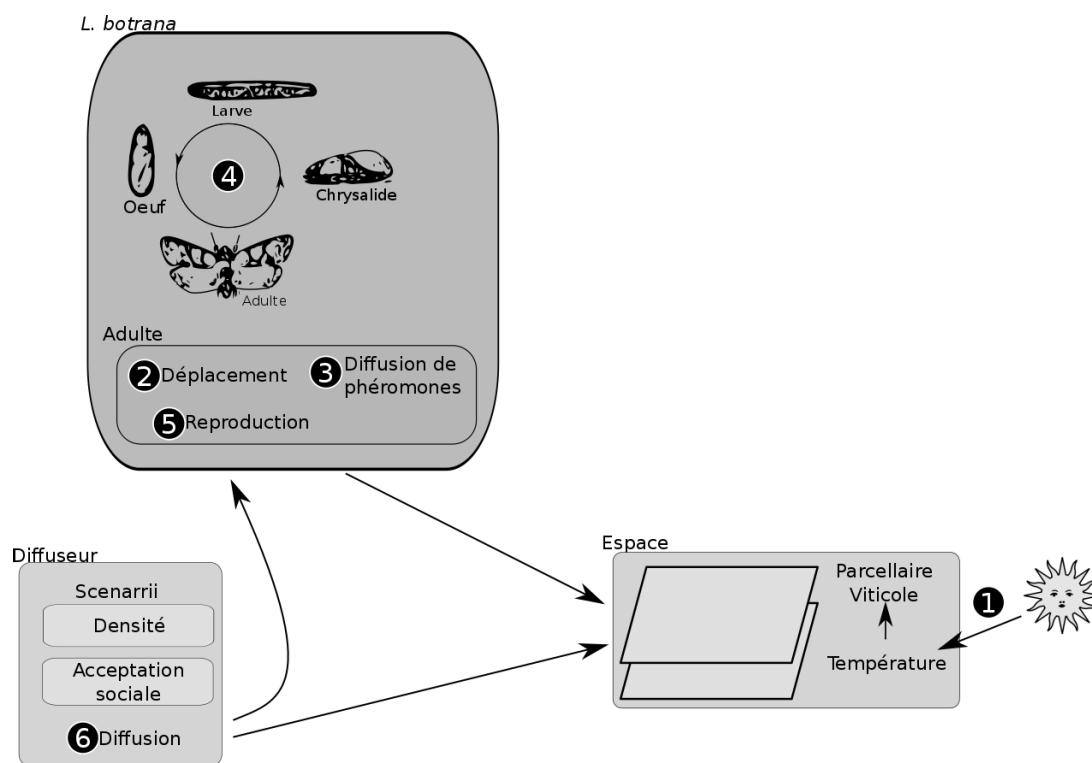


FIGURE 5.17 – Ordonnancement des processus du modèle CELL

- Processus liés aux agents lobesias
 - Le déplacement : si les agents sont en phase adulte, ils vont pouvoir se déplacer de 8 m, avec des objectifs différents si l’agent est un mâle ou une femelle (n° 2 sur la figure 5.17) ;
 - Les phéromones : les agents adultes femelles vont diffuser des phéromones sur les cellules rencontrées (n° 3 fig. 5.17) ;
 - La phase d’évolution : mise à jour des variables si les agents ont changé de phase ;
 - La développement physique : évolution entre les différents stades physiologiques des lobesias (numéro 4 sur la fig. 5.17) ;
 - *eat* : est le dégât lié aux larves sur les végétaux ;
 - La reproduction : fécondation et dépôt des œufs si les conditions sont réunies (n° 5 sur la fig. 5.17).
- Processus liés aux diffuseurs de phéromones
 - La diffusion des phéromones des pièges de proche en proche (n° 6).

5.2.2.2 Concepts d’élaboration

Contexte scientifique

Parmi l’abondante littérature sur la modélisation, une large proportion est dédiée à l’étude de l’impact des différentes variables sur l’évolution des populations (AMO-SALAS

et al. 2011; J. D. LOGAN *et al.* 2006; DAMOS et SAVOPOULOU-SOULTANI 2010; HE et AINSEBA 2014; AINSEBA *et al.* 2011). On constate que les processus de diffusion ou d'évolution dans l'espace n'interviennent que dans une plus petite proportion, et la plupart du temps à petite échelle sur des territoires de plusieurs centaines de kilomètres carrés (SÁENZ-DE-CABEZÓN *et al.* 2011; CAFFARRA *et al.* 2012).

Dans le monde des systèmes multi-agents, le cas de *L. botrana* n'est pas abordé spécifiquement, mais il existe des travaux cherchant à explorer des processus de diffusion de ravageurs (REBAUDO et DANGLES 2013), des espèces envahissantes (CACHO *et al.* 2010) ou des maladies (BANOS, CORSON *et al.* 2014).

Nous proposons donc, par l'intermédiaire de la modélisation à base d'agents, d'explorer les dynamiques de population en intégrant l'espace à une échelle fine. L'implémentation à l'échelle des individus des divers mécanismes a-spatialisés dans un modèle « agents » nous permet d'intégrer *de facto* l'espace, et de délimiter ainsi, par la formalisation, les limites des connaissances que nous avons pu implémenter dans le modèle.

Processus de décision

Parmi les six processus qui sont à l'œuvre dans la formalisation des agents lobesias, on pourra distinguer : i) ceux issus de la littérature, ii) de ceux résolus par une approche empirique de modélisation.

Parmi les premières, les phases d'évolution et de développement physique à l'échelle des populations (AINSEBA *et al.* 2011; DAMOS et SAVOPOULOU-SOULTANI 2010) ou des individus sont assez bien décrites. Nous nous sommes appuyés sur les caractéristiques thermosensibles des individus décrits par J. A. LOGAN *et al.* (1976) J. D. LOGAN *et al.* (2006), pour définir les étapes successives par lesquelles passent les agents et les conditions de *shifting*²⁰ entre les phases de développement.

La reproduction, souvent associée à l'étude de l'attractivité des phéromones, est également sujette à bon nombre de recherches (ARX *et al.* 2011; L. M. TORRES-VILA *et al.* 1995). Il nous est apparu complexe de formaliser ces descriptions pour les intégrer dans le modèle, car elles sont souvent réalisées en laboratoire, et impliquent un grand nombre d'interactions complémentaires qui rendent leur formalisation difficile en l'état. Néanmoins, nous avons retenu le délai de fécondation de la femelle proposé par L. TORRES-VILA *et al.* (2002), et nous nous sommes inspirés des modulations du vol observé par HURTREL et THIÉRY (1999).

En ce qui concerne le second type, nous avons privilégié l'approche empirique par simulation en supplément de la littérature, quand celle-ci ne nous permettait pas de formaliser et de calibrer clairement les mécanismes en jeu.

Ainsi les mécanismes de déplacement sont étudiés (HURTREL et THIÉRY 1999; AMO-

20. Le passage d'un stade de développement à l'autre.

Proportion de la population	Valeurs de h
0-5%	351
5-25%	374
25-50%	401
50-75%	442
75-95%	518
95-100%	600

Tableau 5.3 – Gamme des températures cumulées par les *L. botrana* suivant leur répartition dans la population (c.f. fig. 5.18)

SALAS *et al.* 2011; ARX *et al.* 2011), mais la distance absolue pouvant être parcourue par un papillon en une journée reste ouverte.

Les questions autour des plantes hôtes sont également très importantes dans le cadre de la lutte contre un ravageur (MASANTE-ROCA *et al.* 2007; TASIN *et al.* 2006), mais nous positionnons notre champ d’investigation dans une recherche autour de la lutte intégrée, ce qui n’implique pas l’éradication de lobesia, mais plutôt une optimisation entre les contraintes socio-économiques et les dynamiques de population de ravageurs.

Les expérimentations menées en plein champ apportent également des informations notamment sur la réponse des populations aux techniques de lutte et aux itinéraires de culture (VASSILIOU 2009; STOCKEL *et al.* 1994; DEGEN *et al.* 2005).

Par ailleurs le modèle a été calibré grâce à des données expérimentales issues des piéges effectués par E. NOÉMIE pour le GDA du cru Banyuls et des Albères. Les comptages sont effectués dans les pièges à phéromones, par des relevés effectués à une fréquence variable en fonction de la pression opérée dans le vignoble, et ceci entre avril et août depuis 1999. Nous avons utilisé ces données de 2012 à 2014 (c.f. fig. 5.15), pour pouvoir les croiser avec les données de température issues des capteurs TERVICLIM et de météo-France sur la zone (c.f. fig. 5.13).

Réflexe aux conditions extérieures

Les agents lobesia en phase adulte se déplacent sur le territoire viticole. Si les femelles se déplacent de manière aléatoire, elles libèrent de phéromones qui vont permettre aux lobesias mâles de les suivre pour essayer de se reproduire. La distance à laquelle les mâles sont capables de percevoir les phéromones fait partie des tests que nous avons réalisés dans ce modèle.

Hétérogénéité

Les populations de *L. botrana* sont générées avec une hétérogénéité initiale qui va jouer

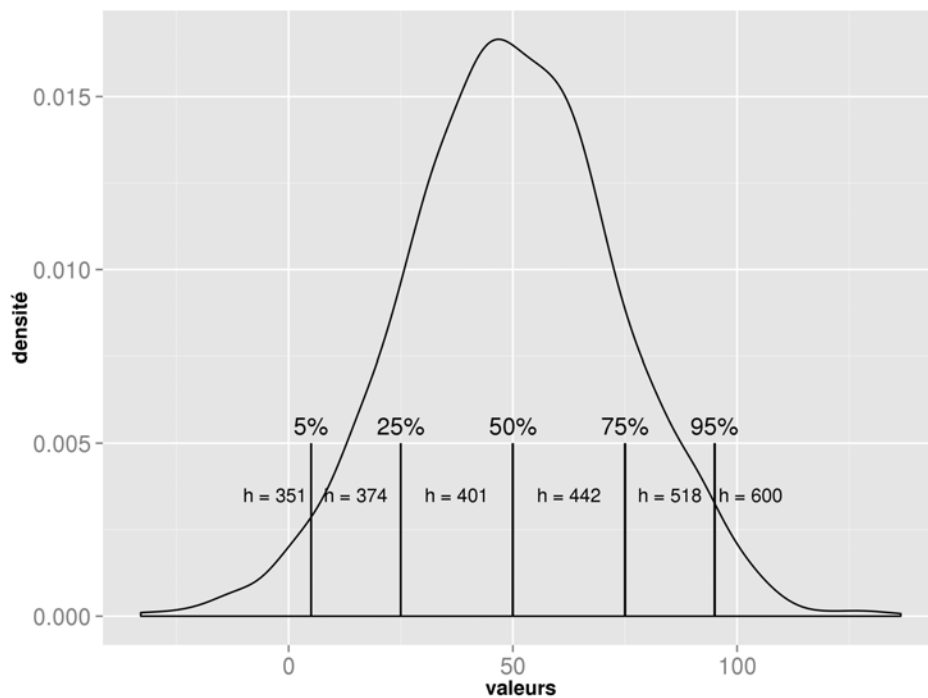


FIGURE 5.18 – Hétérogénéité de la population de lobesia : répartition du caractère h de thermophile entre les individus

sur les besoins individuels en chaleur nécessaires pour leur développement (h sur la figure 5.18 et dont les valeurs sont reprises dans le tableau 5.3). Ceci va générer des populations plus ou moins actives / hâtives dans la saison. Cette hétérogénéité suit une distribution normale et elle est segmentée comme sur la figure 5.18.

Stochastique

Nous avons intégré une certaine stochastique dans l'angle que peuvent prendre les lobesia adultes femelles dans leur déplacement, mais également dans la probabilité d'accouplement entre lobesia quand un individu adulte mâle rencontre un individu adulte femelle.

Observations

Nous nous intéressons ici à quatorze indicateurs de sorties : le nombre total de lobesia, le nombre de lobesia de chaque phase d'évolution (œufs, larves, cristallises, adultes), le nombre de générations (qui est incrémenté pour chaque individu suivant la génération de la mère), l'infestation des patches (qui compte le nombre de patches sur lesquels on retrouve un agent), la fécondité moyenne des femelles (le nombre d'accouplements moyens des femelles), le nombre de lobesia mâle et le nombre de lobesia femelle en phase adulte, la date de l'itération, et les sommes des écarts au carré entre les résultats de la simulation et

les relevés de terrain pour le temps et pour le nombre d'individus piégés dans les parcelles témoins.

Ce travail a été réalisé en trois étapes successives :

- Définition de la taille des échantillons des réplifications ;
- Calibration du modèle par *inverse pattern* (GRIMM, REVILLA *et al.* 2005) ;
- Exploration des résultats du modèle par des moyens de lutte intégrée.

Pour effectuer ces analyses, nous avons cherché à définir le nombre de réplifications nécessaires pour obtenir une certaine stabilité des résultats. Nous avons donc joué une simulation 10000 fois de suite. En constituant 10 groupes dans une démarche itérative, nous ajoutons 1 simulation à chaque groupe jusqu'à atteindre une stabilité des résultats (c.f. fig. 5.19) sur les paramètres observés. Ce premier travail nous a permis de définir un besoin de 30 simulations par paramétrage pour obtenir une stabilité des résultats (c.f. fig. 5.19(c)). Une fois le modèle paramétré, nous étudierons l'évolution des populations de *L. botrana* dans différentes configurations :

- Sans contrainte ;
- Dans des situations de lutte intégrée par phéromones :
 1. Dispersion aléatoire des diffuseurs de phéromones,
 2. Dispersion organisée des diffuseurs de phéromones à l'échelle de la parcelle,
 3. Dispersion organisée des diffuseurs de phéromones à l'échelle de la zone de lutte,
 4. Surface minimum pour obtenir une protection individuelle.

L'exploration de la surface minimum de lutte intégrée pour obtenir une bonne couverture posera également en filigrane la question de l'impact sur les voisins de passage clandestins ; c'est-à-dire d'une viticulture qui refuse d'émarger à la pratique collective et qui va, par là-même, profiter des pratiques des autres.

5.2.2.3 Détails

Initialisation

Un certain nombre de variables que nous utilisons dans la modélisation n'ont pas de valeur de calibration disponible dans la littérature. Même s'il existe des méthodes de résolution par « algorithme génétique »²¹, puisque notre modèle présente une très grande variabilité, nous avons dû opter pour une approche plus « classique » inspirée des travaux de GRIMM, REVILLA *et al.* (*ibid.*) qui consiste à définir la limite de l'aire de paramétrage en approchant au maximum des données de terrain.

Pour cela, nos données de terrain sont constituées des séries temporelles de comptage de

21. Par exemple, basé sur une sélection *steady-state* bi paramétrique (REUILLON, SCHMITT *et al.* 2014 ; SCHMITT *et al.* 2014).

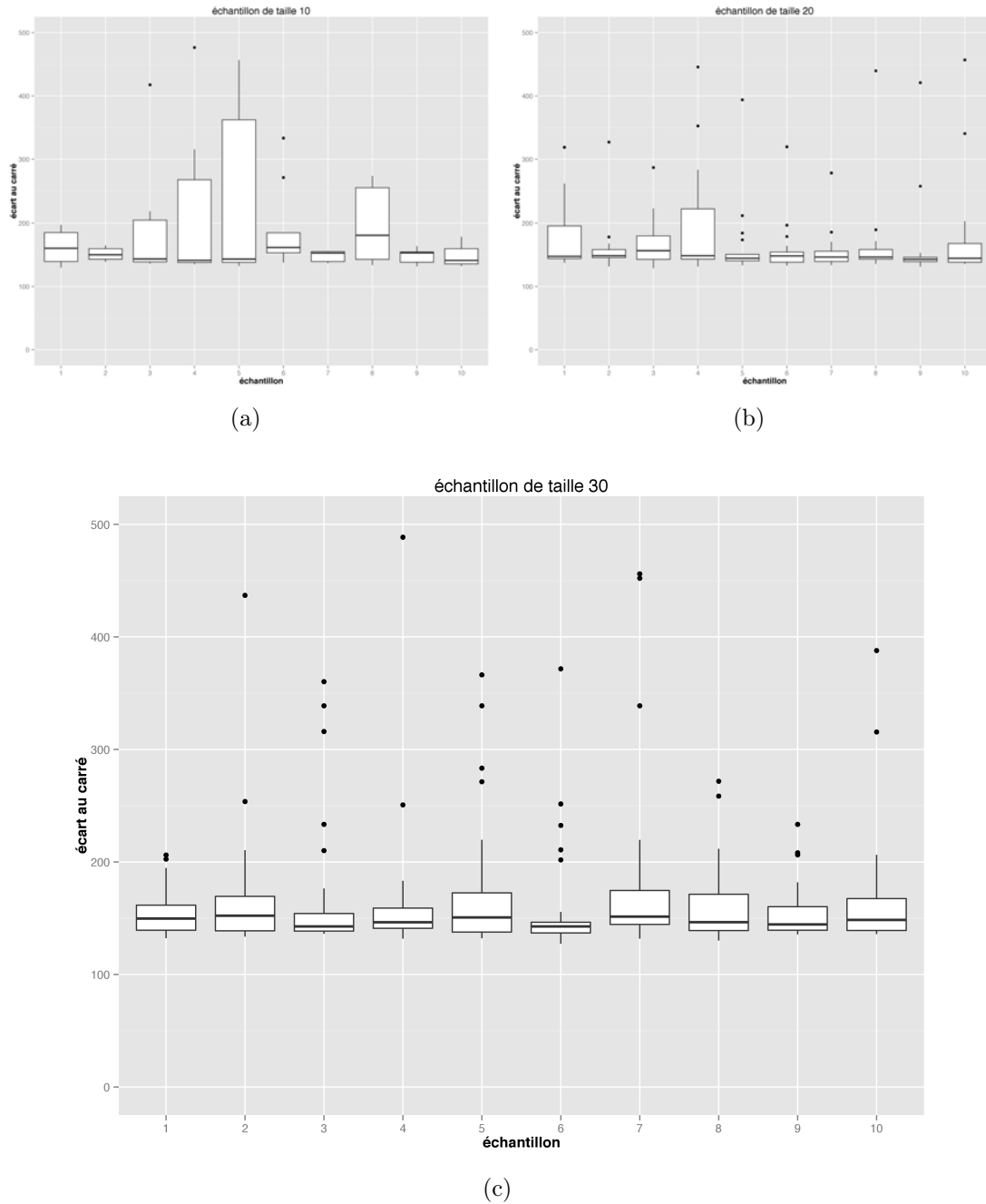


FIGURE 5.19 – Évolution des résultats de simulation par échantillon de 10 (a), 20 (b) et 30 (c) individus tirés aléatoirement parmi 10 000 simulations d'un même paramètre. Nous voyons bien qu'à partir de 30 simulations, nous atteignons une certaine stabilité du modèle

L. botrana effectuées par E. NOÉMIE²² (c.f. fig. 5.15). Nous avons approché ces données réelles en s'intéressant à la « distance » entre ces dernières et les résultats des simulations par la méthode des moindres carrés²³. Cela revient à résoudre l'équation 5.11 :

$$\chi^2(m) = \sum_i^n (y_i - m_i)^2 \quad (5.11)$$

où y_i est la mesure réelle et m_i la mesure simulée. L'objectif est de minimiser la différence de ce carré. Cette approche d'optimisation va permettre de réduire la « zone de validité » du modèle²⁴ à des gammes de paramétrages plus fines. La figure 5.20 nous permet, ainsi, de voir le comportement des populations au regard des deux paramètres d'optimisation (temps et nombre d'individus piégés). Nous avons initialisé le modèle avec 50 individus (25 mâles et 25 femelles).

Nous testons, dans un premier temps, l'effet de la densité spatiale (les graphiques en colonnes de 452 à 1810m²) et le paramètre du nombre d'œufs moyen (les graphiques en lignes de 20 à 30) qui minimisent les écarts à la moyenne sur le nombre d'individus (c.f. fig. 5.20(a)). Dans un second temps, nous nous attachons aux mêmes variables et à leurs effets sur la distance à la fin de simulation (c.f. fig 5.20(b)).

Ce premier niveau de lecture (sur la figure 5.20 et le tableau 5.4) nous permet de définir la taille de la zone initiale d'infection (SR sur le tab. 5.4). En effet, nous obtenons un comportement qui évolue tendanciellement dans le même sens vers des valeurs minorées quand la surface de dissémination initiale est de 1018m². Le choix du nombre d'œufs moyen par ponte est plus compliqué à estimer, car il semble lié à la distance de covisibilité des *L. botrana* (en ordonnée sur chaque graphe). Deux valeurs semblent au-dessus de la moyenne : 20 et 24 œufs²⁵. Le tableau 5.4 nous permet d'arbitrer entre ces deux valeurs. En effet, parmi les cinq jeux de paramètres qui permettent de minorer les valeurs LSQri et TS, les simulations du Rang 2 (20 œufs et une surface d'infestation de 1018m²) semblent remplir toutes les conditions. Le tableau 5.5 reprend les valeurs qui sont fournies au modèle à l'initialisation.

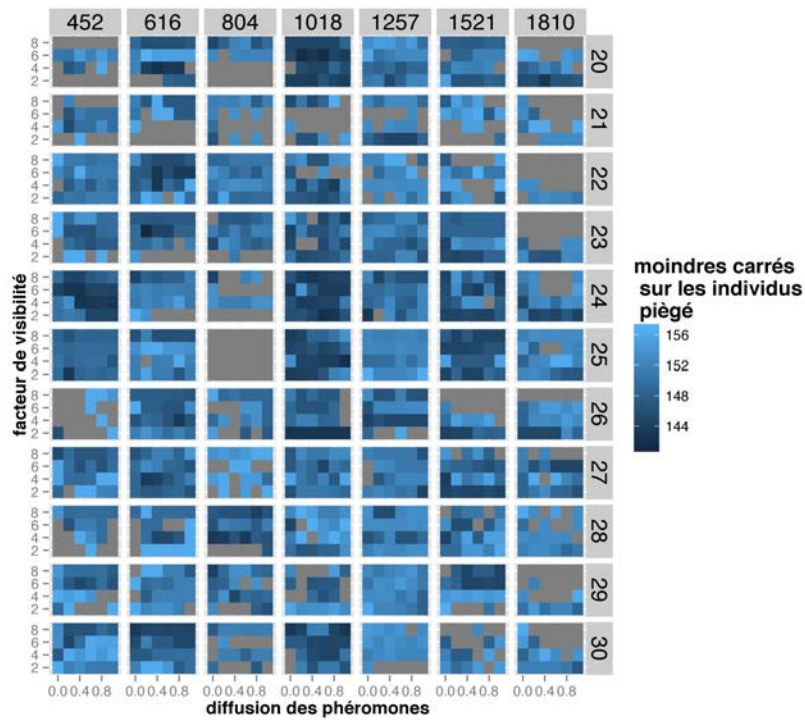
L. botrana est une espèce thermosensible. Son développement est largement lié aux températures locales, et varie entre les individus (nous en parlons dans la partie hétérogénéité et sur la figure 5.18). Nous chargeons donc à l'initialisation une couche d'informations contenant les températures spatialisées sur la zone (c.f. fig. 5.17) issues d'un SIG. Nous

22. GDA du cru Banyuls et des Albères.

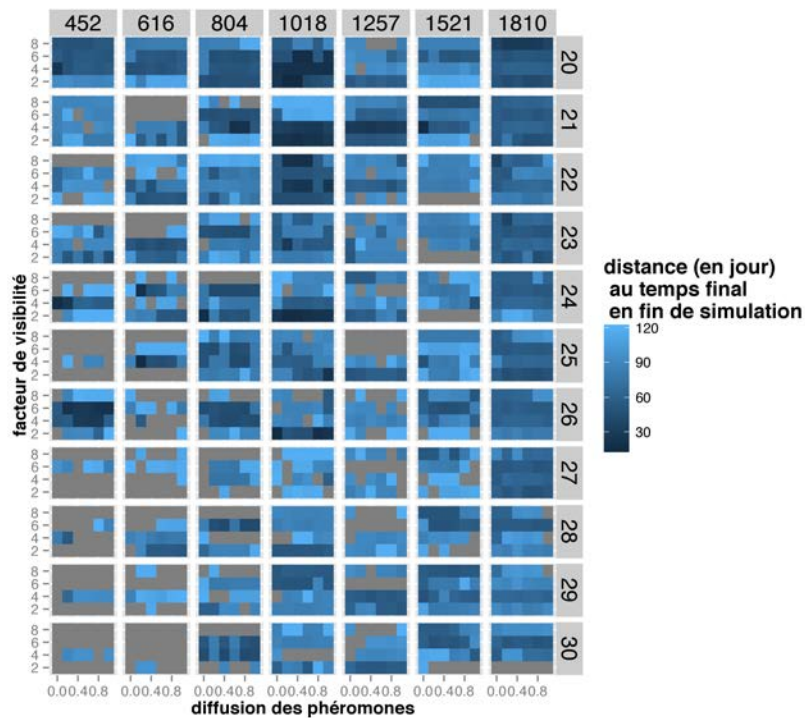
23. Permet de comparer des données expérimentales, généralement entachées d'erreurs de mesures, à un modèle mathématique censé décrire ces données. Source : wikipedia http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_des_moindres_carr%C3%A9s, site consulté le 29 octobre 2014.

24. Sur le principe de la « théorie des catastrophes » de THOM (1989).

25. Ces valeurs sont inférieures aux valeurs proposées dans la littérature, c.f. L. TORRES-VILA *et al.* (2002).



(a)



(b)

FIGURE 5.20 – Les comportements de la médiane des carrés aux écarts à la moyenne (a), et de la moyenne de la distance à la fin de la simulation (b). Les graphes en colonne représentent l'étendue de la zone d'infestation à l'initialisation, et les lignes correspondent au nombre d'œufs que peuvent pondre les femelles.

Rang	CD	NO	SR	DV	LSQr i	TS
1	0.20	23	616.00	6.00	141.07	149.85
2	0.60	20	1018.00	6.00	141.43	17.50
3	0.20	20	1018.00	6.00	141.43	47.46
4	1.00	25	1018.00	4.00	141.64	85.59
5	0.40	20	616.00	4.00	142.07	52.08

Tableau 5.4 – Cinq premiers paramètres permettant de minorer nos indicateurs. CD coefficient de diffusion des phéromones, NO nombre oeufs, SR surface d’infestation initiale, DV distance de visibilité, LSQr i la moyenne des écarts au carré entre le nombre d’individus piégés réel et le nombre d’individus piégés dans le modèle, TS Distance médiane à la date de fin de simulation

Description des variables	valeurs
Nombre initial de <i>L. botrana</i>	50
Distance reproduction	1 m
Phéromone laissée	100%
Réduction phéromone	2 %
Durée de vie	16 j
Surface initiale	1018m ²
Nombre d’œufs	20-24
Surface de couverture	314m ²
Nombre d’œufs	20
Angle max de rotation	180 °

Tableau 5.5 – Valeurs d’initialisation du modèle CeLL

intégrons également dans le modèle les parcelles viticoles sous forme de données SIG, ce qui nous permettra de discriminer les zones d'attraction pour *L. botrana* (le vignoble) et les zones neutres, où les femelles auront potentiellement moins tendance à pondre (non viticole). Nous n'avons pas tenu compte de potentielles espèces hôtes pour notre insecte (TASIN *et al.* 2006).

La disposition des diffuseurs de phéromones dans les *scenarii* correspondants se fait à l'initialisation de différentes façons :

1. La dispersion aléatoire est proposée sans tenir compte des zones de recouvrement des diffuseurs ;
2. La dispersion organisée à la parcelle propose de distribuer les diffuseurs de phéromones de manière organisée, mais à l'échelle des parcelles. Cela signifie qu'en bordure de parcelles les diffuseurs peuvent se chevaucher ;
3. La dispersion organisée à la zone propose la lutte organisée à l'échelle de la zone de lutte, ce qui permet d'optimiser le chevauchement des aires de diffusion de phéromones, mais nécessite une organisation concertée / centralisée de la lutte ;
4. La surface minimale de lutte propose des parcelles ou des portions de parcelles prises aléatoirement qui ne sont pas traitées par phéromones. Les parcelles installées en lutte intégrée le sont dans un contexte de dispersion organisée à la zone.

Variables de forçage

Le modèle est forcé avec les données de température journalisées issues du capteur TERVICLIM sur les années 2012 et 2013 (c.f. fig. 5.13).

Sous-modèles

Processus liés aux agents *L. botrana* :

Déplacement : il n'est possible que pour les individus adultes (stade papillon). Les agents, quels qu'ils soient, vont pouvoir se déplacer à 8 reprises pendant leur phase de déplacement, et leur comportement sera différent suivant le sexe :

- Pour les femelles : le déplacement est relativement aléatoire. Elles se déplacent dans une direction aléatoire entre 0° et 180° en face d'elles, puis se déplacent d'un pas et déposent leurs phéromones, pour ensuite recommencer l'opération. De cette manière, elles vont être capables de parcourir 8 pas (16 mètres) de manière linéaire, ou plus probablement en zigzag.
- Pour les mâles : ils vont s'orienter (faire face) vers la zone qui contient le plus de phéromones dans l'air circulaire de leurs champs de vision et se déplacent d'un pas, pour recommencer l'opération. Ils auront ainsi tendance à remonter la/les pistes de phéromones.

Stades	a	b	c
Œuf	0,297370	0,183374	0,187975
Lave	0,225958	0,195681	0,197009
Chrysalide	0,429051	0,211920	0,212915

Tableau 5.6 – Coefficient de l'équation 5.12 pour les différents stades de développement de *L. botrana*

Diffusion des phéromones : les agents femelles vont déposer dans l'espace une quantité de phéromone fixée arbitrairement à 100. Cette valeur est ensuite gérée par les cellules de la grille, qui vont transmettre à chaque itération la valeur reçue atténuée de 20%.

Développement : pour le calcul du développement individuel des insectes et le passage par les différentes phases (œuf \Rightarrow larve \Rightarrow chrysalide \Rightarrow adulte), nous avons utilisé le modèle développé par J. A. LOGAN *et al.* (1976)²⁶.

$$v(T) = a(e^{b(T-T_{inf})} - e^{b(T_{sup}-T_{inf})-c(T_{sup}-T)}) \quad (5.12)$$

Où :

- vT représente la vitesse de développement de l'individu en fonction de la température de l'air T . Dans ce modèle, nous introduisons l'approximation du taux de développement moyen journalisé comme étant liée à la vitesse de développement ;
- a , b , et c sont des coefficients qui ont été calculés à partir d'expériences en laboratoire sur l'évolution et le développement de *L. botrana* à température constante (RAPAGNANI *et al.* 1989). Ils sont repris dans le tableau 5.6 ;
- T_{sup} et T_{inf} sont les seuils thermiques de développement qui ont aussi été déterminés expérimentalement et qui sont respectivement 35 ° C et 10 ° C.

À chaque itération la valeur de $v(T)$ va augmenter pour chaque individu. Ainsi quand l'accumulation thermique enregistrée par l'agent est supérieure ou égale au l'accumulation thermique attendue par celui-ci et quand $v(T)$ sera supérieur ou égal à 1, l'agent pourra changer de stade et donc acquérir de nouvelles caractéristiques pour a , b et c .

Dégât : si les premières générations de cet insecte ne sont pas impactantes pour la plante, c'est généralement la troisième génération qui pose problème. En effet celle-ci va déposer ses œufs dans les baies et occasionner des dégâts.

Reproduction : Cette procédure s'adresse à la femelle adulte. Si celle-ci est capable de se reproduire (qu'elle n'a pas déjà été fécondée), elle va observer s'il y a un agent lobesia de sexe opposé en phase adulte. Si c'est le cas, elle aura une probabilité de se reproduire,

26. Ce modèle est repris par l'observatoire *SardegnaArpa* du *Dipartimento specialistico regional idrometeorologico* de Sardaigne <http://www.sar.sardegna.it/pubblicazioni/notetecniche/nota3/pag019.asp> site consulté le 18 janvier 2015.

et cette probabilité va décroître avec le nombre d'accouplements (a_c) qu'elle aura déjà effectués. Pour calculer cette probabilité, un chiffre entre 1 et 100 est tiré au hasard, nous le nommerons m_a . Si l'équation 5.13 est vérifiée, l'accouplement a lieu. La femelle ne peut alors plus s'accoupler pendant 3 itérations, le temps de déposer ses œufs.

$$m_a \leq \frac{100}{a_c + 1} \quad (5.13)$$

Les œufs sont créés par la femelle *L. botrana* qui leur transmet ses caractéristiques (sensibilisés à la chaleur). Le sexe est déterminé aléatoirement. Elle choisit dans son entourage (une distance de vol de $8m^2$) une zone avec le minimum d'autres individus pour limiter la concurrence pour la ressource et donc donner plus de chance de survie à sa progéniture.

Processus liés aux diffuseurs de phéromones (pièges) :

Diffusion des phéromones : que ce soit pour les diffuseurs de phéromone ou les insectes, la diffusion fonctionne de la même manière. Une quantité de phéromones est déposée à l'endroit où se situe le diffuseur ou le papillon femelle. La valeur laissée sur la cellule de la grille sera répartie entre les 8 cellules voisines à raison de $\frac{1}{8}$ de la quantité de phéromones laissée par la cellule voisine.

Processus liés à l'environnement :

Évolution de la température : La température est journalisée et forcée dans le modèle à chaque itération (jour par jour) grâce aux données TERVICILM.

5.2.3 Résultats

5.2.3.1 La lutte intégrée : efficience en condition simulée

Intéressons-nous tout d'abord aux résultats des simulations effectuées sans que soit installés les diffuseurs de phéromones. Ces résultats sont intéressants car ils nous permettent de définir l'état témoin duquel nous essaierons de nous éloigner. Nous pourrons, dès lors, comparer ces résultats à ceux produits par les *scenarii* qui nous intéressent (c.f. « observation »). Le tableau 5.7 reprend ses résultats. Nous attirons ici l'attention du lecteur sur le nombre d'œufs dans le système. En effet, les simulations s'arrêtent début août, au moment où la 2^e génération de papillons disparaît et où la 3^e génération commence. Ainsi le nombre d'œufs permet d'évaluer l'envolée à laquelle devra faire face la zone infestée.

En guise de point de repère, nous avons également fait fonctionner le modèle sans tenir compte du zonage, en disposant donc des pièges de manière homogène sur tout le territoire. L'information qui nous est alors accessible revient à évaluer l'impact de l'espace anisotrope sur les populations d'agents. On retrouve ces résultats dans le tableau 5.8. Nous pourrons retenir que :

—

variable	moyenne	médiane
Nombre de <i>L. botrana</i>	12155	1412
Fécondation	0.73	0.91
Nombre d'œufs	5791	0
Surface touchée	276m ²	500 m ²

Tableau 5.7 – Résultats des simulations d'évolutions des *L. botrana* sans piège. Le nombre de *L. botrana* reprend le nombre d'individus, tous stades de développement confondus. Fécondation permet d'évaluer la moyenne et la médiane du nombre moyen de fécondations que porte une femelle. Le nombre d'œufs est le nombre moyen et médian. Les surfaces touchées représentent la surface viticole atteinte par au moins un parasite

	4	12	20
moy lobesia	10749.06	15475.64	10610.55
med lobesia	1257.00	1766.50	809.00
moy Fec	0.89	0.83	0.68
med Fec	0.94	0.93	0.87
moy egg	2302.14	4006.38	2067.71
med egg	0.00	20.00	0.00
moy Infest	60.90	69.45	55.60
med Infest	48.00	54.00	35.00

Tableau 5.8 – Résultat de l'analyse de sensibilité effectuée dans un environnement homogène en piège. Les moyennes (moy) et les médianes (med) de chaque variable d'intérêt. En colonne nous retrouvons pour chaque variable d'intérêt sa valeur en fonction de la distance entre les diffuseurs de phéromones.

En comparant les tableaux 5.7 et 5.8 nous constatons que les valeurs médianes de chaque variable sont généralement moins élevées que les moyennes. De même, la distance entre les diffuseurs de phéromones semble jouer un rôle dans les résultats de simulation. La configuration où les pièges sont espacés de 20 mètres permettrait une meilleure gestion des populations d'eudémis, et ce quel que soit le stade (le nombre de lobesia et le nombre d'œufs sont réduits dans les deux cas).

Forts de ces deux repères, nous introduisons maintenant des données SIG (fig. 5.14). En travaillant sur les données issues du *scenario* où la lutte est pratiquée à l'échelle de toute la zone de manière homogène, nous souhaitons mettre en évidence les effets d'une lutte sur la diffusion du parasite (fig. 5.21). En comparant ces données à celles issues des tableaux 5.7 et 5.8, nous faisons le même constat que précédemment, les diffuseurs ont un effet sur la population d'insectes.

Avant d'entrer dans la description des résultats, nous avons réalisé quelques tests de corrélations par analyse de Variance (ANOVA). Nous trouvons la synthèse des résultats

variable	catégorie	P-value	Sign
Nombre de <i>L. botrana</i>	DP	1.803e-06	***
Fécondation	DP	5.585e-11	***
Nombre d'œufs	DP	3.583e-08	***
Surface touchée	DP	4.814e-05	***

Tableau 5.9 – Tableau synthétique des résultats de l'ANOVA pratiqués sur les résultats de simulation pour tester la corrélation entre la configuration spatiale des pièges installés à l'échelle du bassin versant (noté DP pour Distance entre les Pièges) et les différentes variables d'intérêt. Les étoiles (*) représentent la significativité de la p-value : '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

dans le tableau 5.9. Pour les quatre variables qui vont nous intéresser, l'hypothèse H_0 est rejetée. Il semble donc exister une corrélation forte entre l'espacement des diffuseurs de phéromones et les quatre variables.

En entrant dans les détails des résultats de simulation en condition spatialement explicite, la figure 5.21(a) nous permet de visualiser l'effet de la densité des diffuseurs de phéromones sur le nombre de parasites (tous stades confondus). Nous constatons que le nombre d'individus diminue largement (d'un facteur 10) entre la situation sans piège (tab. 5.7) et celle où des pièges sont installés. En comparant les capteurs disposés de manière homogène sur tout l'espace (tab. 5.8), apparaît une réduction considérable du nombre médian d'agents lobesia quand l'espace est hétérogène. Dans la situation où les pièges sont espacés de 20 mètres, la réduction du nombre d'agents médian est de 88%, ce qui est entièrement imputable à l'existence de discontinuités spatiales. Enfin, nous l'avons noté précédemment, de manière assez surprenante, la pire des situations de lutte du point de vue du nombre d'individus est l'intermédiaire (distance entre les pièges de 12 mètres). Nous reviendrons un peu plus tard sur ce phénomène.

Sur la figure 5.21(b), nous pouvons noter l'effet significatif des pièges sur la population des parasites. Le nombre médian de fécondations subies par les femelles *L. botrana* est divisé par 4, voire 5 entre la situation avec et sans diffuseur. La différence entre les situations à 4-12 mètres et 20 mètres permet d'imaginer les effets du comportement différencié entre mâles et femelles (c.f. 5.2.4). Dans les deux situations extrêmes, la médiane des résultats est plus haute que dans le cas intermédiaire, et la variance plus réduite. En confrontant ces résultats aux tableaux 5.8, nous montrons que, là encore, l'hétérogénéité introduite par les données SIG influence le nombre moyen de reproductions par femelle. Ce dernier étant largement plus faible quand l'espace n'est pas entièrement couvert de diffuseurs.

La figure 5.21(c) nous donne à voir le nombre d'œufs début août. Là encore, la lutte par phéromones a réduit d'un facteur 10 le nombre d'œufs par rapport aux situations sans lutte (c.f. tab. 5.7). Nous imaginons bien que le grand nombre d'œufs, quand les

diffuseurs de phéromones sont espacés de 20 mètres, est dû à l'existence de zones moins chargées en phéromones qui permettent aux papillons mâles d'augmenter leur probabilité de trouver une femelle. Tandis que la situation à haute densité de pièges produit des rencontres aléatoires et réduit le nombre de pontes.

Enfin la figure 5.21(d), nous permet d'évaluer l'impact sur la vigne, dans la mesure où elle nous indique le nombre de mètres carrés concernés par un ou plusieurs papillons. Nous observons encore et toujours cette baisse radicale de la surface concernée par rapport à la situation sans diffuseur (c.f. tab 5.7). Nous notons que les surfaces médianes sont assez stables, mais que la variance est un peu moins étendue dans les situations avec une distance entre les pièges de 12 et 20 mètres.

Ce phénomène est également présent sur les exemples de simulations présentés sur la figure 5.22. La zone sur laquelle nous comptons au moins un insecte est plus étendue dans la situation 5.22(a) avec des pièges espacés de 4 mètres, que dans les situations où les pièges sont espacés de 12 et 20 mètres (respectivement fig. 5.22(b) et 5.22(c)). Par ailleurs, nous remarquons qu'une disposition à 4 mètres sature l'environnement de phéromones (fig. 5.22(a)). Les mâles sont incapables de trouver les femelles et restent à proximité immédiate des diffuseurs. La grande densité de phéromones permet aux femelles de tomber facilement sur un mâle et donc de se reproduire facilement. Le phénomène est accentué par l'effet de groupe des pontes autour des diffuseurs de phéromones.

Avec une distance de 12 mètres, l'environnement n'est pas saturé en phéromones (fig. 5.22(b)). Les mâles sont toujours attirés par les diffuseurs, ce qui transforme ceux-ci en épïcètres d'infestations. Les pontes s'effectuent de manière concentrique autour d'eux, ce qui, petit à petit, au moment du passage à l'âge adulte, augmente la chance des mâles de trouver des femelles proches d'eux. Cette configuration bénéficie donc d'une densité assez forte de diffuseurs qui permettent aux femelles de tomber sur un mâle assez facilement, et ces mâles bénéficient de la non-saturation de l'environnement en phéromones après une phase de groupe qui favorise la rencontre avec une femelle avant d'être attirés par le diffuseur.

Enfin avec une distance de 20 mètres (fig. 5.22(c)), la distance entre les diffuseurs est suffisante pour réduire considérablement la probabilité qu'une femelle rencontre un mâle sur un diffuseur. Par ailleurs, l'environnement n'est pas saturé en phéromones ce qui permet aux mâles de trouver des femelles. Il est intéressant de noter que la chance d'accouplement est inversement proportionnelle à l'âge du papillon. En effet, plus le temps passe plus les mâles sont attirés par les diffuseurs. Tandis que dans la phase de groupe la distance qui sépare les individus nouvellement adultes est réduite et favorise l'accouplement.

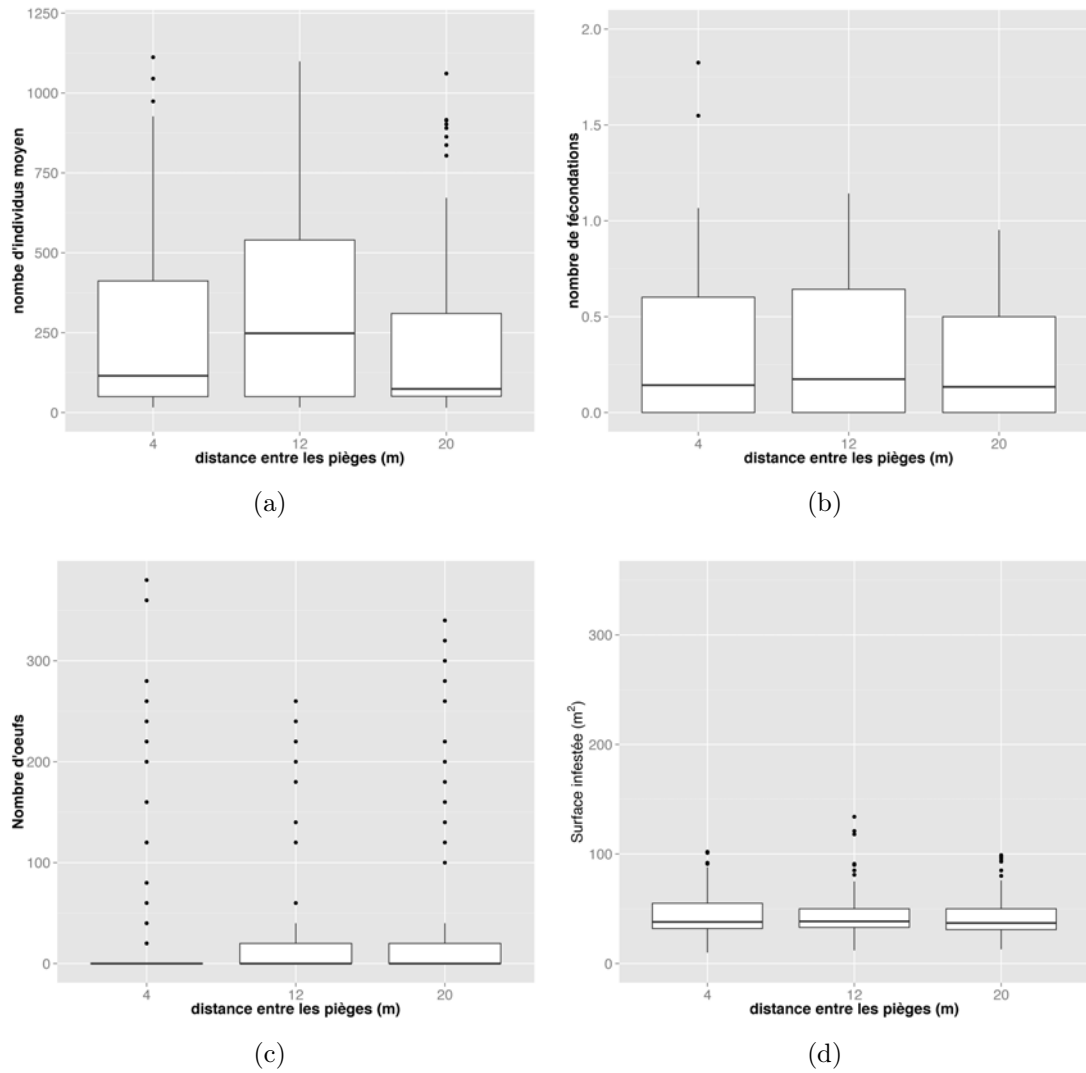


FIGURE 5.21 – Effet de la distance entre les pièges à phéromones sur la population de *L.botrana* en situation de lutte concertée au niveau du bassin versant. En (a) nous observons l'effet sur le nombre d'individus, en (b) sur la fécondité des femelles, en (c) sur le nombre d'œufs, et enfin en (d) sur les surfaces infestées par le parasite.

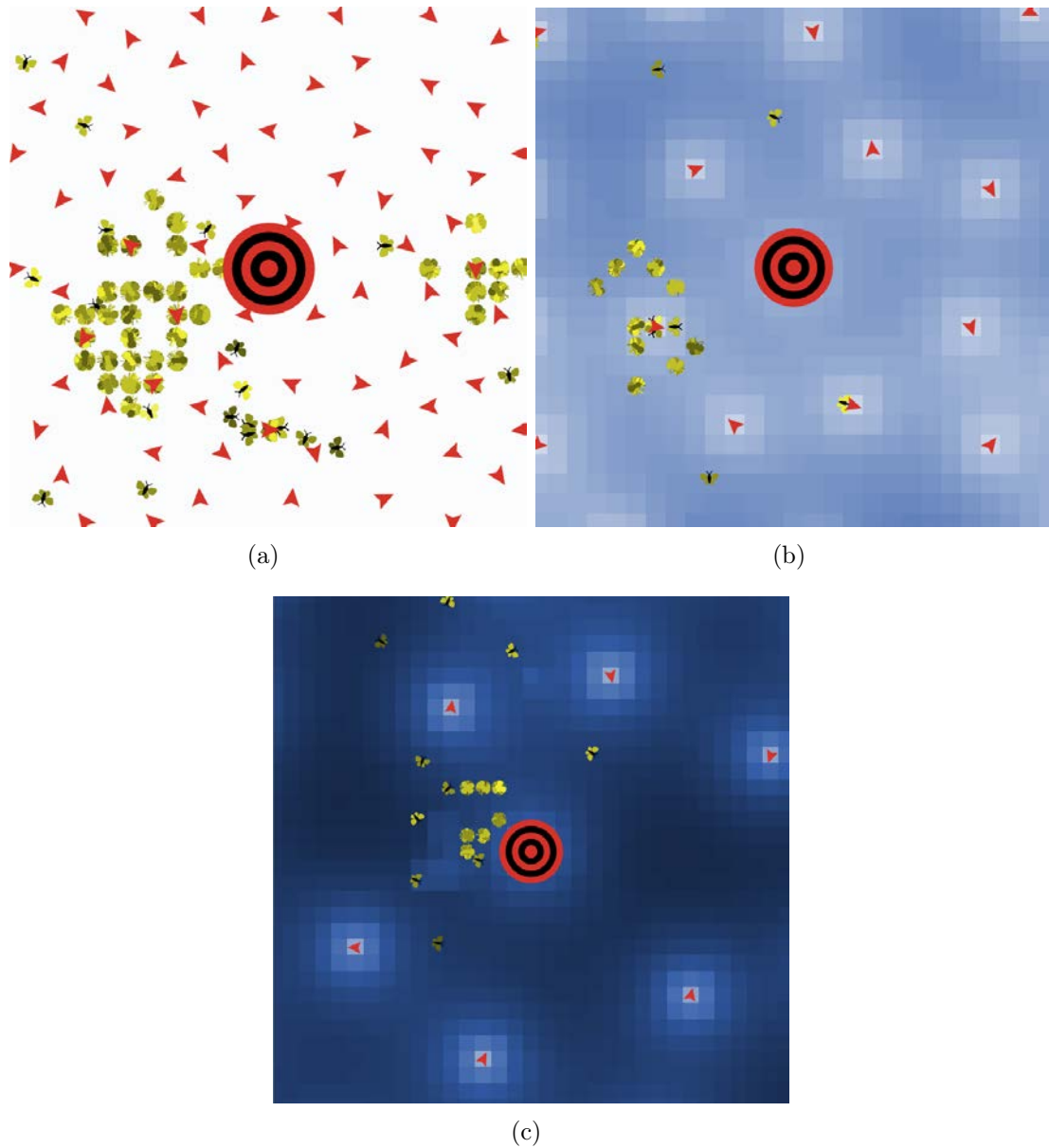


FIGURE 5.22 – L’effet de la densité de diffuseur de phéromones sur la distribution spatiale des *L. botrana*, en (a) avec une forte densité (4 mètres entre chaque diffuseur), en (b) avec une densité moyenne (12 mètres) et en (c), quand la densité est plus faible (20 mètres entre les diffuseurs). La concentration en phéromones est symbolisée par un dégradé du blanc (valeurs hautes), au noir (absence), en passant par toutes les valeurs de bleu pour les valeurs de présence de phéromones. La cible centrale donne l’échelle de l’image, elle est la même dans toutes les prises de vue.

Distance	rt2	rt3	diff
2	3569.51	3741.09	171.57
12	494.86	570.06	75.20
20	191.43	228.20	36.77

Tableau 5.10 – Nombre de pièges en fonction de l'échelle à laquelle est pensé le piégeage. Nous considérons rt2 comme la lutte à l'échelle du bassin versant, et rt3 la lutte à l'échelle de la parcelle. Les valeurs sont les moyennes du nombre de pièges par distance entre les pièges. Diff est la différence entre la situation rt3 et rt2

5.2.3.2 La lutte intégrée : une échelle de réflexion

Quand il s'agit de procéder à de la lutte intégrée, l'échelle spatiale de réflexion entre en ligne de compte notamment quand l'objectif de la lutte s'applique à lutter contre un parasite mobile comme *L. botrana*. On est donc en droit de s'interroger sur la configuration spatiale de lutte la mieux adaptée pour protéger la production, tout en limitant les coûts de la méthode de lutte choisie.

Nous confrontons ici les résultats produits dans une configuration de lutte, réalisée à l'échelle d'un bassin versant (c.f. partie 5.2.3.1 et particulièrement, figure 5.21 et 5.22) avec des résultats produits dans une situation où chaque viticulteur pense la lutte à l'échelle de sa parcelle sans tenir compte de celle de ses voisins. La densité de diffuseurs entre les parcelles va donc être plus élevée qu'au centre de celles-ci.

Nous voyons dans le tableau 5.10 le nombre de diffuseurs de phéromones impliqués dans la lutte pour chaque échelle de réflexion. Plus la densité de pièges est forte par parcelle, plus le différentiel entre les deux situations de lutte est élevé, ce qui peut avoir des répercussions sur les capacités économiques des viticulteurs. Ceci est d'autant plus vrai dans les situations de viticulture de pente, où les exploitations doivent faire face à plus de difficultés (c.f. chap. 4).

Comme dans la partie précédente, nous avons effectué un test de corrélation basé sur une ANOVA et sur nos variables d'intérêt (tab. 5.11). Nous remarquons qu'il semble persister la corrélation déjà identifiée lors de l'ANOVA précédente (tab. 5.9). Ce lien semble moins fort concernant le nombre d'œufs et la moyenne des fécondations, mais existe néanmoins. Nous allons donc étudier le comportement de ces variables.

La lutte à l'échelle de la parcelle permet une surabondance de pièges en limites de parcelles. Ce phénomène a pour effet de réduire légèrement la variabilité du nombre d'individus des différents groupes, mais également d'en augmenter la médiane (fig. 5.23(a)). Nous nous retrouvons donc, en fin de 2^e génération, avec plus de parasites tous stades confondus. Il apparaît également une variance toujours plus grande du nombre d'agents²⁷ pour une situation où les diffuseurs sont disposés tous les 12 mètres.

27. Phénomène que nous avons également relevé sur la figure 5.21.

variable	catégorie	P-value	Sign.
Nombre de <i>L. botrana</i>	DP	0.01165	*
Fécondation	DP	0.006948	**
Nombre d'œufs	DP	1.622e-12	***
Surface touchée	DP	1.977e-05	***

Tableau 5.11 – Tableau synthétique des résultats de l’ANOVA pratiqués sur les résultats de simulation pour tester la corrélation entre la configuration spatiale des pièges installés à l’échelle des parcelles, les différentes variables d’intérêt et la distance entre les pièges (noté DP). Les étoiles (*) représentent la significativité de la p-value : ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

En ce qui concerne le nombre moyen de fécondations par femelle (fig 5.23(b)), la variance de chaque groupe reste assez stable par rapport au résultat de la simulation en situation de lutte sur le bassin versant (fig. 5.21(b)). Par contre, la médiane évolue. Nous aurions donc légèrement plus de fécondations dans une situation à 4 mètres et moins dans un contexte à 20 mètres.

Le nombre d’œufs médian (fig. 5.23(c)), produisant potentiellement la 3^e génération d’insectes, est lui aussi très stable, mais la variance, elle, est plus élevée dans une situation de lutte à haute densité. Enfin, les surfaces peuplées d’eudémis sur lesquelles on retrouve de l’eudémis bondissent. La médiane est presque multipliée par deux, mais la variance intergroupe est également très forte. Les surfaces viticoles touchées par l’infestation (fig. 5.23(d)) sont dans ce cas plus élevées que dans une situation où la lutte est effectuée à l’échelle du bassin versant (fig. 5.21(d)). Nous nous retrouvons dans la situation évoquée sur la figure 5.22. En effet, le parcellaire de nos zones d’étude étant très éclaté, la surreprésentation des diffuseurs en limite de parcelle tend à s’approcher de la situation évoquée sur la figure 5.22(b). Les adultes auront tendance à se masser en bordure de parcelles, ce qui augmentera la probabilité pour les femelles de rencontrer un mâle par hasard.

5.2.3.3 La lutte intégrée et le passager clandestin

La question du passager clandestin dans les campagnes de lutte épidémique interpelle de manière cyclique la société, et le monde viticole n’en est pas exempt²⁸. Or, en écoutant les bruissements de la société, il s’avère que la lutte intégrée nécessite l’adoption des pratiques par l’ensemble des viticulteurs. Mais le refus de participer à des pratiques de lutte collective fait-il appel à une question d’ordre sanitaire et/ou moral et/ou économique ?

28. L’affaire Giboulot en Côte-d’Or, refusant de traiter des vignes contre la flavescence dorée en est un exemple récent. C.f article sur le site du Monde http://www.lemonde.fr/planete/article/2014/02/24/le-viticulteur-bio-qui-refuse-de-traiter-ses-vignes-devant-le-tribunal_4372007_3244.html, site consulté le 26 février 2015.

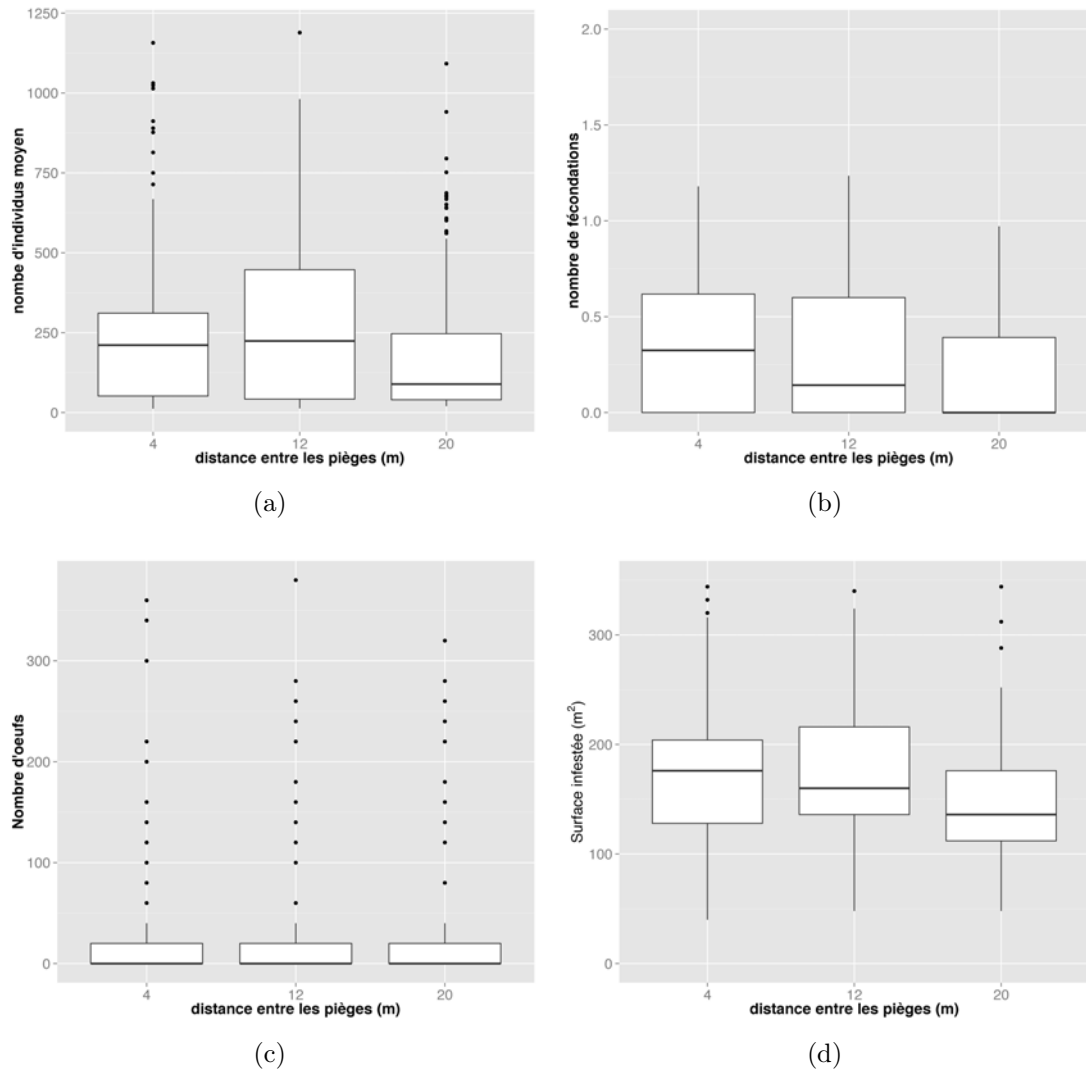


FIGURE 5.23 – Effet de la distance entre les pièges à phéromones sur la population de *L.botrana* en situation de lutte raisonnée à la parcelle. En (a) nous observons l'effet sur le nombre d'individus, en (b) sur la fécondité des femelles, en (c) sur le nombre d'œufs, et enfin en (d) sur les surfaces infestées par le parasite.

Dans le cas de *L. botrana*, nous avons exploré l'influence sur le système de l'existence de passagers clandestins. Nous avons pour cela introduit aléatoirement des passagers clandestins dans la simulation et reprenons les résultats sur la figure 5.24. Elle reprend la même logique que les précédentes, mais y figure une information supplémentaire : la distance au passager clandestin le plus proche sous la forme d'une classification. Nous retrouvons donc, dans chaque graphique, trois classes calculées selon la méthode des sauts naturels de Jenks²⁹. La première regroupe les résultats pour des clandestins situés entre 0 et 50 mètres de la zone d'infestation initiale, la seconde entre 50 et 120 mètres, et enfin la troisième regroupe des parcelles non confusées à une distance comprise entre 120 et 240 mètres.

Avant de nous lancer dans l'analyse, nous effectuons de nouveau une ANOVA (tab. 5.12). Nous nous apercevons que les corrélations sont faibles pour le nombre d'agents et le nombre d'œufs, et inexistantes en tant qu'influence sur le nombre moyen de fécondations et les surfaces concernées par les insectes. Nous soulignons ici que la seule corrélation qui persiste entre le tableau 5.9 et le tableau 5.12 vis-à-vis de la configuration spatiale est liée au nombre moyen de fécondations par femelle, qui lui, n'est pas corrélé à la distance du passager clandestin. Bien que les corrélations observées soient faibles entre la distance au clandestin, le nombre d'insectes et d'œufs, le nombre moyen de fécondations, les surfaces touchées et le nombre de clandestins, c'est à ces variables que nous nous intéresserons par la suite.

En procédant avec circonspection par rapport aux résultats des simulations, nous comparons rapidement la figure 5.24 et la figure 5.21 produites respectivement avec ou sans passagers clandestins, tous les autres paramètres restant inchangés. Nous constatons que la réponse du système n'est pas entièrement linéaire (fig 5.24(a) et (b)). Les résultats avec passagers clandestins, de manière contre-intuitive, sont souvent meilleurs que les résultats sans passager clandestin (nous y reviendrons dans la partie 5.2.4).

En effectuant une comparaison plus fine, nous observons que les profils des boxplots représentant les deux premières classes de populations avec un passager clandestin à moins de 120m (fig. 5.24(a)) ont un profil semblable à ceux de la figure 5.21(a), avec toutefois une légère hausse de population quand les pièges sont disposés à 12 mètres les uns des autres. Au regard des deux graphes 5.24(a) et (b), la situation la plus périlleuse pour la récolte semble être quand le passager clandestin est situé de 50 à 120 mètres du foyer d'infestation et quand les diffuseurs de phéromones sont espacés de 12 mètres les uns des autres.

Comme les résultats de l'ANOVA nous le laissent penser, il y a une corrélation faible

29. Méthode de clusterisation qui repose sur une optimisation de la dérivation moyenne des classes. C'est une méthode de résolution itérative. C.f. http://en.wikipedia.org/wiki/Jenks_natural_breaks_optimization, site consulté le 25 février 2015.

variable	catégorie	P-value	Sign.
Nombre de <i>L. botrana</i>	CL	0.01537	*
	–	0.881	
	–	0.4948	
Fécondation	CL	0.1514	
	–	0.01178	*
	–	1.265e-05	***
Nombre d'œufs	CL	0.04278	*
	–	0.5522	
	–	0.6651	
Surface touchée	CL	0.2185	
	–	0.03016	*
	–	0.9074	

Tableau 5.12 – Tableau synthétique des résultats de l'ANOVA pratiquée sur les résultats de simulation en présence de passagers clandestins dans la zone de lutte. Nous testons ici la corrélation entre la classe de distance au clandestin (CL), la distance entre les pièges (noté DP), le nombre de passagers clandestins (NC) et les différentes variables d'intérêt. Les étoiles (*) représentent la significativité de la p-value : '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

entre le nombre moyen de fécondations par femelle et le nombre de passagers clandestins (fig. 5.24(c)), ceci avec une légère hausse quand le nombre de passagers clandestins est de 6 plutôt que 2 ou 10. Cela laisse présager un fonctionnement complexe du système entre les zones confusées et les zones non confusées.

Enfin le graphe 5.24(d) met en regard les surfaces infestées par le parasite et le nombre de passagers clandestins. La variance intergroupe a tendance à augmenter avec le nombre de parcelles non confusées, ce qui est lié à la sélection aléatoire de ces dernières. À l'échelle du système, le problème de passager clandestin ne met pas en péril la production globale.

5.2.4 Discussions

Deux points nous paraissent importants à souligner dans cette discussion. Ils concernent en fait deux étapes différentes dans la démarche de modélisation, dans lesquelles l'usage de simulations offre de très grandes perspectives. Le premier point consiste à chercher des motifs et des dynamiques en œuvre dans la simulation, en explorant de manière systématique son espace de paramètres (le *pattern oriented desing* des GRIMM, REVILLA *et al.* (2005)), et ses apports dans l'étude des mécanismes difficilement visibles en plein champ. Le second point concerne les apports spécifiques, dans notre modèle, à la compréhension plus générale des mécanismes responsables de la prolifération de l'eudémis.

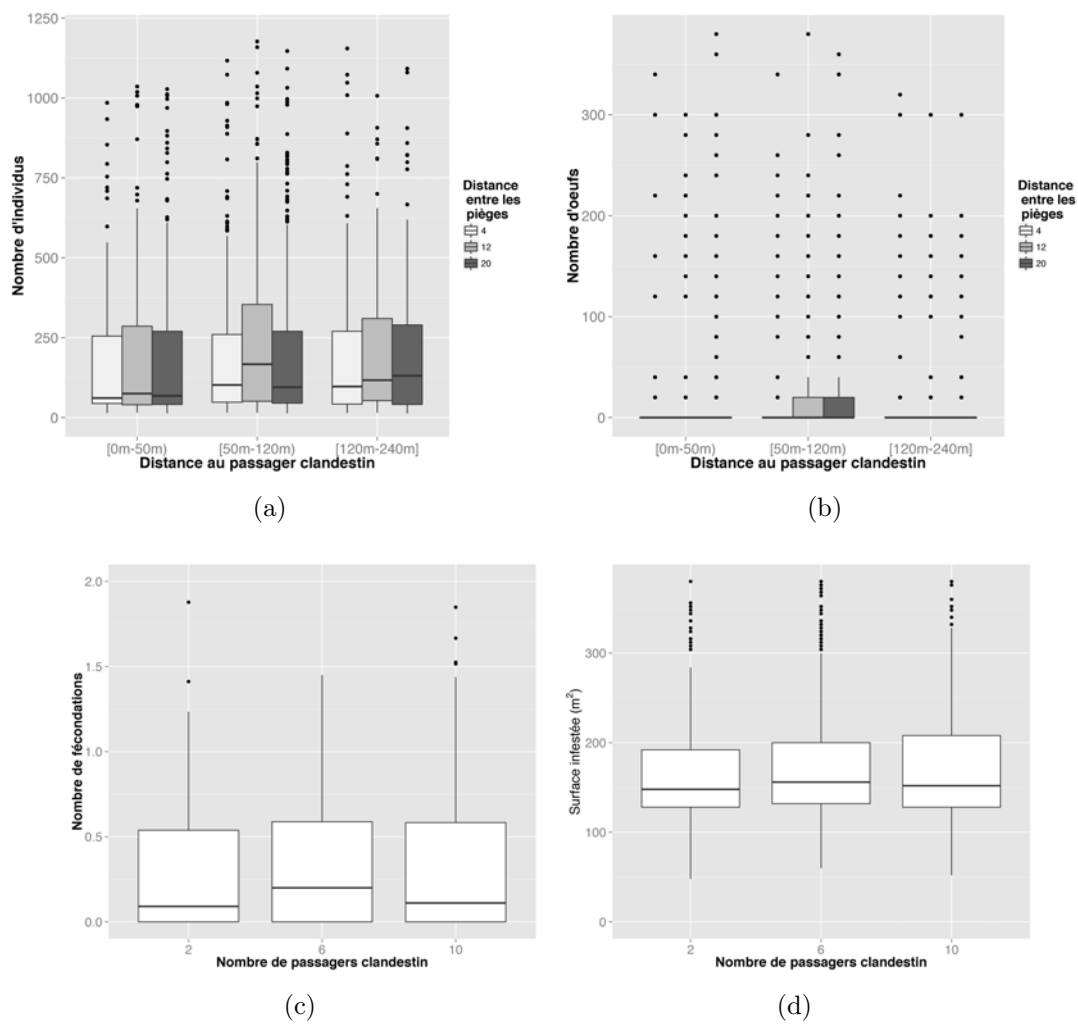


FIGURE 5.24 – Comportement des variables d'intérêt dans une situation avec passagers clandestins. En (a), est montré l'effet de la distance minimum du passager clandestin sur le nombre d'individus, en (b) celui de cette même variable sur le nombre d'œufs. Les graphes (c) et (d) reprennent respectivement le nombre moyen de fécondations par femelle et les surfaces infectées au regard du nombre de passagers clandestins sur la zone simulée.

5.2.4.1 L'exploration algorithmique des variables

Le premier constat à faire sur ce modèle relève de l'utilisation de la modélisation pour explorer la définition de variables et des formalismes utilisés (c.f. part 5.2.2.3). Ce travail de définition des variables par des méthodes algorithmiques permet de questionner des comportements largement documentés, mais également de prospecter le comportement de variables qui n'est pas / ou peu documenté dans la bibliographie (SCHMITT *et al.* 2014; REUILLON, SCHMITT *et al.* 2014).

Ainsi, grâce aux résultats présentés notamment sur la figure 5.20 (qui représente, par la méthode des moindres carrés, les configurations qui permettent d'approcher au mieux des relevés de pleins champs), nous sommes capables de définir la taille de la zone d'infection pour qu'une population de parasites se développe (GRIMM, REVILLA *et al.* 2005). Nous avons également été capables d'affiner le nombre d'œufs pondus par les femelles à 20 ou 24 en condition de plein champ, au lieu des 30 de moyenne en laboratoire proposés par L. TORRES-VILA *et al.* (2002).

5.2.4.2 Effet réel de confusion virtuelle ?

Malgré l'effort apporté à la paramétrisation, ce travail reste à considérer comme une étude de comportement plausible des *L. botrana* en plein champ. Les résultats relèvent davantage de tendances que de valeurs réellement mobilisables. Ils visent à questionner le modélisateur sur sa pratique et l'observateur de terrain sur les variables qu'il observe.

Une fois ces précautions effectuées quant à l'utilisation qui pourrait être faite des résultats, nous pouvons nous intéresser aux phénomènes de confusion sexuelle par diffusion de phéromones dans notre monde virtuel. Elle endigue largement le développement des populations de *L. botrana* (c.f. tab. 5.7 et fig. 5.21), comme nous l'observons significativement en plein champ (DELBAC *et al.* 2010; STOCKEL *et al.* 1994).

Ce premier résultat, qui doit être considéré comme une « preuve du concept » des possibilités liées au portage de modèles statistiques vers des modèles agents, nous permet d'aborder les questions liées à l'espace qui sont bien souvent laissées de côté dans les travaux traditionnels de modélisation (AINSEBA *et al.* 2011). Ainsi, l'introduction de l'espace et l'analyse que nous proposons en comparant espace homogène et hétérogène soulignent l'importance de ce dernier. En effet, les résultats issus de véritables parcelles aux conditions locales propres (fig. 5.21) influencent considérablement les dynamiques de population par rapport aux conditions homogènes de disposition des diffuseurs (sec. 5.2.3.1).

Ce premier résultat conforte l'intérêt d'une modélisation à base d'agents, et offre la possibilité d'aller plus loin. En effet, comme DEGEN *et al.* (2005) et O. T. JONES (1998) le soulignent à l'envie, la lutte par confusion sexuelle « fait appel à divers mécanismes

hypothétiques ». Or, la modélisation à base d'agents peut être considérée comme une étape supplémentaire dans le processus de construction disponible entre le laboratoire (où sont testées les grandes hypothèses) et le champ des viticulteurs (où les hypothèses sont testées). Ainsi tous les travaux sur l'accouplement des *Lobesia* adultes (VASSILIOU 2009 ; L. TORRES-VILA *et al.* 2002 ; L. M. TORRES-VILA *et al.* 1995) ou sur l'influence des plantes hôtes pourraient être testés (TASIN *et al.* 2006).

De part son échelle de résolution, notre modèle et nos simulations ne sont pas concurrents des travaux effectués à plus grande échelle (AMO-SALAS *et al.* 2011) qui nécessiteraient de repenser les processus agrégatifs des individus ainsi qu'un certain nombre de contraintes jouant sur des échelles imbriquées (E. DELAY et VINATIER 2015).

Notre modélisation nous permet de tester différents agencements de diffuseurs (fig. 5.22) et d'en évaluer l'incidence sur la population de papillons (fig. 5.22). Ces résultats sont légitimes du point de vue des viticulteurs pour disqualifier certains comportements de lutte. Nous pouvons imaginer qu'un maillage du territoire viticole à 4 ou 12 mètre soit moins intéressant par rapport à celui à 20. La variance du nombre d'œufs étant la même (au moins entre 12 et 20 mètres), le risque pour la récolte n'est pas atténué alors que le coût de la couverture par les phéromones est plus élevé. En effet, à l'échelle du modèle, ce sont un peu plus de 38% de diffuseurs supplémentaires qui sont nécessaires pour couvrir la même surface (c.f. tab 5.10). De même, la mise place de la lutte à l'échelle des parcelles conduit à une surreprésentation des diffuseurs en limite de celles-ci, ce qui a un effet contre-productif sur les surfaces infestées même si la taille des populations reste faible.

Par ailleurs, DEGEN *et al.* (2005) soulignent quelques limites à la lutte intégrée par diffusion. Ils évoquent l'efficacité, le coût du travail (impliquant le prix des produits et le temps d'application), les impacts environnementaux et les effets sociaux. Pour nous, grâce à la confrontation des résultats des parties 5.2.3.1 et 5.2.3.2, l'efficacité de la lutte est quantifiable par la modélisation. De même, nous pouvons optimiser la méthode de lutte d'un point de vue économique en identifiant la configuration spatiale adaptée. Ce qui nous conduit à préférer une stratégie de lutte à l'échelle du bassin versant plutôt que de la parcelle. Or, dans ce contexte économique mais en tenant compte de variables sociales, la grande taille de la population viticole concernée par la lutte dans le cas particulier de nos territoires de pente pourrait être complexe à mobiliser et à animée. La lutte pourrait alors passer par l'outil de production majoritaire et présent sur les deux territoires : la coopérative. En effet, celle-ci semble avoir accès à une bonne échelle de réflexion spatiale, et pourrait, de plus, bénéficier de prix plus attractifs en centralisant les achats.

Proposer une prise en charge de la lutte à une échelle agrégée permet en plus de rationaliser la lutte, de contourner les problèmes d'hétérogénéité sociale que peut poser le renoncement de certains viticulteurs à la lutte par confusion (les passagers clandestins).

En effet, dans les simulations, nous avons montré que la diffusion des populations de papillons est relativement limitée dans l'espace (sans contrainte extérieure), ce qui n'encourage pas le viticulteur non touché à participer à la lutte. Inversement, les viticulteurs participant voient d'un mauvais œil le refus de traitement de leurs voisins qui deviennent alors des zones refuges pour le parasite (*ibid.*).

Conclusion

Le modèle CeLL est donc un exemple des possibilités offertes par les systèmes multi-agents dans la perspective de lutte contre le parasitisme. L'approche résolument orientée "agent" que nous avons abordée ici n'exclut en rien les autres méthodes d'approche statistique et/ou computationnelle qui peuvent être mises en place pour s'intéresser à d'autres aspects des dynamiques de *L. botrana* à cette échelle (AMO-SALAS *et al.* 2011 ; AINSEBA *et al.* 2011) ou à des échelles plus vastes (CAFFARRA *et al.* 2012).

Par ailleurs, le modèle s'inscrit également dans une réflexion plus vaste sur les recevabilités de l'utilisation des SMA pour comprendre et agir sur les mécanismes à l'œuvre dans les phénomènes de diffusion des ravageurs (REBAUDO et DANGLES 2013 ; CACHO *et al.* 2010). Il serait, par exemple, particulièrement intéressant d'adjoindre à ce modèle un modèle de relation sociale tel que celui développé dans E. DELAY et MARCELIN (2014), car les phénomènes de passagers clandestins peuvent être considérés comme des phénomènes issus d'interactions sociales. Cette couche sociale d'interactions permettrait de pousser la réflexion sur la diffusion de l'information, et les capacités de surveillance passive du territoire par les viticulteurs à des échelles plus fines que celles proposées par CACHO *et al.* (2010).

Conclusion du chapitre

Dans ce dernier chapitre consacré à la description des modèles et de leurs résultats, nous avons abordé des questionnements caractérisés par leur formulation spécifique par les acteurs de terrain. Alors que les modèles présentés dans les chapitres 3 et 4 nous ont permis de mieux cerner les spécificités viticoles de nos territoires et de les confronter aux différentes réalités des acteurs locaux (WATZLAWICK 1984), les modèles *Acidity GIS* et CeLL nous ont amenés à rechercher les réponses à des questionnement locaux, dans une démarche explicitement *bottom-up* (BECU, PEREZ *et al.* 2003 ; SMAJGL et BARRETEAU 2013a).

Signe de notre temps et symptôme d'une agriculture possédant déjà une culture informatique, ces deux modèles n'ont trouvé de public que lorsqu'ils ont été construits sur des données réelles permettant aux viticulteurs de confronter leur vécu aux sorties de modèle.

Cet état de fait a nécessité de notre part un travail de récolte de données quantitatives et d'observations de terrain conséquentes dictées par l'échelle fine des mécanismes que nous avons voulu explorer.

Ces deux modèles largement *data-driven* nous ont permis de confirmer la place de l'espace en tant qu'objet hétérogène et facteur influençant les comportements locaux des agents : que ce soit dans *Acidity GIS* où les viticulteurs tirent rapidement partie des zones plates en haut de versant pour réduire les coûts de production, ou dans CeLL où ces mêmes viticulteurs tirent partie des zones non viticoles pour réduire les dégâts liés aux populations d'eudémis se développant sur leurs parcelles.