



Quelles seront les conséquences du  
changement climatique sur le  
développement des monilioses sur  
fleurs et rameaux d'abricotiers ?

Paul Tresson

**Rapport de stage de fin d'études**

2014-2018 – Protection des cultures

Maitre de stage : Marie Launay

Tuteur de stage : Emile Benizri

Co-encadrant : Laurent Brun

# Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Marie Launay et Laurent Brun pour leur encadrement durant ce stage, leurs compétences et leur gentillesse.

Je tiens également à remercier l'équipe abricot, Freddy, Christophe, Simon, Marie et Fred ainsi qu'Hélène pour leur aide pendant les expérimentations et leur disponibilité.

Merci aux colocataires de la maison des stagiaires, Emilie, Flora, Sophie et Mélodie pour ces beaux moments passés ensemble !

---

Note : sauf indications du contraire, les photographies et figures ont été réalisées par Paul Tresson.

Image de couverture : Amandier en fleur – Vincent Van Gogh, 1890 (huile sur toile 73,5x92 cm). Exposé au Van Gogh Museum Amsterdam. Ce tableau représente donc un amandier et non un abricotier néanmoins, les deux arbres étant du genre *Prunus*, leurs fleurs sont semblables et sensibles aux monilioses.

## Introduction

1. Contexte général .....	4
2. La culture de l'abricotier .....	4
3. Les monilioses.....	5
3.1. Présentation des <i>Monilinia spp.</i> .....	5
3.2. Cycle infectieux et dispersion .....	5
3.3. Symptômes et identification.....	6
3.4. Effet des conditions climatiques sur le développement des monilioses.....	7
4. Modélisation bioclimatique.....	8
4.1. Hypothèses fondamentales .....	8
4.2. Outils statistiques utilisés .....	8
5. Importance de la modélisation en protection des cultures dans le cadre du changement climatique.....	9

## Partie I : Expérimentation sur pots

1. Matériel et Méthode .....	10
1.1. Matériel végétal .....	10
1.2. Dispositif expérimental .....	10
1.3. Notation de l'incidence .....	11
1.4. Identification du pathogène .....	11
1.5. Mesure de l'inoculum .....	11
1.6. Données météorologiques.....	12
1.7. Modèles épidémiologiques choisis .....	12
2. Résultats et discussion.....	13
2.2. Identification de l'espèce de <i>Monilinia</i> responsable des infections.....	13
2.3. Stades phénologiques sensibles.....	13
2.4. Effet de la position des arbres .....	13
2.5. Présence d'un inoculum aérien.....	14
2.6. Effet des différents facteurs climatiques .....	14
2.7. Calibration des modèles épidémiologiques .....	16

## Partie II : Etude des dégâts sur rameaux dans un réseau de parcelles

1. Matériel et méthode .....	18
1.2. Présentation des parcelles du réseau .....	18
1.3. Suivi phénologique.....	18
1.4. Notation de l'incidence .....	19
1.5. Identification des pathogènes.....	19
1.6. Données météorologiques .....	19
1.7. Construction d'un indice de risque pondéré.....	20
2. Résultats et discussion .....	20
2.1. Identifications des espèces de <i>Monilinia</i> .....	20
2.2. Performances des modèles épidémiologiques .....	21
2.3. Facteurs expliquant le développement de <i>Monilinia</i> sur rameau .....	22

## Partie III : Etude des conséquences du changement climatique sur le développement de moniliose sur abricotier

1. Matériel et méthode .....	24
1.1. Modèle phénologique .....	24
1.2. Modèles épidémiologiques .....	25
1.3. Données climatiques.....	25
1.4. Regroupement en clusters .....	26
1.5. Etude de l'évolution du risque moniliose.....	26
2. Résultats et discussion.....	27
2.1. Evolution la date de floraison .....	27
2.2. Evolution des conditions climatiques.....	28
2.3. Evolution du risque de moniliose.....	29

## Discussion générale

1. Hypothèses des modèles climatiques.....	33
2. Effets physiologiques et génétique de sensibilité de l'arbre .....	33
3. Validité des modèles en dehors des conditions de calibration .....	33
4. Résultat émergent : pluies de fin de floraison .....	33
5. Incertitude des données .....	34

## Conclusion

# Introduction

## 1. Contexte général

La production mondiale d'abricots en 2016 était de 3,95 millions de tonnes (FAOSTAT 2017). La production française était de 110 000 tonnes, soit 3% de la production mondiale. En 2016, les principaux bassins producteurs en France étaient la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur (19 % de la production française), l'Occitanie (37 %) et la région Auvergne-Rhône-Alpes (43%) avec une production essentiellement localisée dans la vallée du Rhône (Agreste - Abricot 2017).

La maîtrise des bio-agresseurs est un enjeu majeur en arboriculture. En culture d'abricots, l'IFT (Indicateur de Fréquence de Traitement) moyen est de 11,8 en 2012, dont 8,1 IFT en fongicides et bactéricides (AGRESTE 2014). La gestion de pathogènes tels que *Monilinia spp.* reste un verrou important dans la culture des fruits à noyau, que cela soit en agriculture conventionnelle ou biologique.

Le changement climatique fait évoluer rapidement les conditions climatiques des agro-systèmes. Les cultures mais aussi leurs pathogènes sont impactés par ces changements (Fisher *et al.* 2012; Tylianakis *et al.* 2008). De nombreux pathogènes montrent déjà des changements de développement et de distribution (Mariette *et al.* 2016; Bebber 2015; Bebber *et al.* 2013; Chakraborty, Newton 2011; Barbetti *et al.* 2012). Afin de pouvoir se prémunir ou s'adapter face à ces évolutions dans les climats futurs, il est important de bien les prédire.

Ces différentes problématiques sont le cadre du projet Partenariat Européen pour l'Innovation (PEI) ClimArbo « *Changement climatique et maladies cryptogamiques émergentes en arboriculture en Rhône-Alpes* » dans lequel s'inscrit ce stage.

## 2. La culture de l'abricotier

L'abricotier est un arbre fruitier de la famille des Rosacées, sous famille des prunoïdés, genre *Prunus*. L'espèce la plus commune d'abricotier est *Prunus armeniaca*. Il est originaire de Chine. Il a été introduit en France durant le XV<sup>ème</sup> siècle et sa culture s'est principalement développée dans le sud de la France (Provence, Languedoc-Roussillon, vallée du Rhône) (Lichou et Jay 2012).

L'abricotier est adapté au climat méditerranéen. Il peut supporter des températures hivernales jusqu'à -20°C mais reste sensible aux froids printaniers. L'irrigation est nécessaire pour assurer une production importante (Lichou et Jay 2012).

La multiplication peut se faire par semis mais il est courant que l'abricotier soit greffé. Les porte-greffes les plus courants sont l'abricotier, le pêcher, le prunier et l'amandier. L'abricotier rentre en production après 3 ans. La floraison a lieu entre mi-février et fin mars et dure environ deux semaines. Les fleurs sont hermaphrodites et certaines variétés sont auto-fertiles. La récolte des fruits se fait entre début juin et fin août selon les variétés et les régions (Lichou et Jay 2012).

Les vergers peuvent être organisés en gobelet (arbres séparés, port conique) ou en palmette (arbres sur une même rangée, taille en rang). Les vergers peuvent être installés sous filets pour limiter les dégâts de grêle (Lichou et Jay 2012).

Les ravageurs importants sur abricotier sont les forficules, la petite mineuse *Anarsia lineatella* et la tordeuse orientale *Grapholita molesta*. Les principales maladies sur abricotier dans la Drôme sont la bactériose, causée par *Pseudomonas syringae*, l'Enroulement Chlorotique de l'Abricotier (ECA) causé par *Candidatus Phytoplasma prunorum*, la sharka causée par le *Plum pox virus* et les monilioses causées par *Monilinia spp.* (Lichou et Jay 2012).

## 3. Les monilioses

### 3.1. Présentation des *Monilinia spp.*

La moniliose, aussi appelée pourriture brune (sur fruit) ou dessèchement (sur fleur et rameau) est une maladie fongique majeure en culture fruitière. La moniliose peut entraîner des pertes importantes en abricotier, allant jusqu'à 90% de pertes sur fleur et rameaux pour une variété sensible et s'étalant entre 25 et 50% pour une variété à sensibilité moyenne (Parveau *et al.* 2016). Les principales espèces de *Monilinia* sont *Monilinia laxa*, *Monilinia fructicola* et *Monilinia fructigena* (Hrustić *et al.* 2012)

*Monilinia laxa* (Aderhold and Ruhland) Honey est l'espèce la plus importante rencontrée en production d'abricots en France (Lichou, Jay 2012; Hrustić *et al.* 2012). Elle est largement présente dans de nombreuses zones de productions (Rungjindamai *et al.* 2014) et provoque des dégâts sur fruits à noyau. *Monilinia laxa* est principalement responsable d'infections sur fleurs et rameaux. En France, seule la forme asexuée du champignon a été observée (Hrustić *et al.* 2012).

*Monilinia fructicola* (Winter) Honey est également responsable d'importants dégâts sur fruits à noyau. *M. fructicola* a été introduit en Europe dans les années 2000 et a été retiré de la liste des organismes de quarantaines en 2014 (Oliveira Lino *et al.* 2016). Contrairement aux deux autres espèces de *Monilinia*, la phase sexuée du cycle de *M. fructicola* est plus fréquente et peut être observée en conditions naturelles. Néanmoins cette phase n'a pas encore été observée en Europe (Hrustić *et al.* 2012). Cette espèce présente des particularités à remarquer d'un point de vue épidémiologique : des cas de résistance de *M. fructicola* aux benzimidazoles ont été observés en France depuis plusieurs années (Lichou et Jay 2012). De plus, *M. fructicola* semble tolérer de plus hautes températures que *M. laxa* (Casals *et al.* 2010), ce qui rend la surveillance de ce champignon importante dans un contexte de réchauffement climatique.

*Monilinia fructigena* (Aderhold and Ruhland) Honey est l'espèce la plus étudiée de *Monilinia*, de par les importants dégâts qu'elle cause sur pomme et poire. Les fruits à noyaux peuvent également être touchés mais de manière plus anecdotique (Hrustić *et al.* 2012).

### 3.2. Cycle infectieux et dispersion

*Monilinia spp.* se conserve sous forme de mycélium durant l'hiver, dans les chancre de rameaux infectés ou dans des fruits momifiés. En Europe, seule la phase de reproduction asexuée est observée en conditions naturelles : en conditions humides, les mycéliums produisent des conidies qui seront ensuite dispersées et responsables de nouvelles infections. La dispersion peut se faire par le vent, par les insectes ou encore par les précipitations (splashing) (Hrustić *et al.* 2012).

La germination des conidies pour chaque *Monilinia spp.* n'est possible que dans une fourchette de température entre 0°C et 30°C avec des optimums aux alentours de 15°C (Casals *et al.* 2010; Tamm *et al.* 1995). La présence d'eau est également nécessaire et la durée d'humectation est une variable explicative du succès de la germination en conditions contrôlées (Tamm *et al.* 1995). La figure 1 illustre le cycle infectieux des *Monilinia spp.* (Agrios 2005).

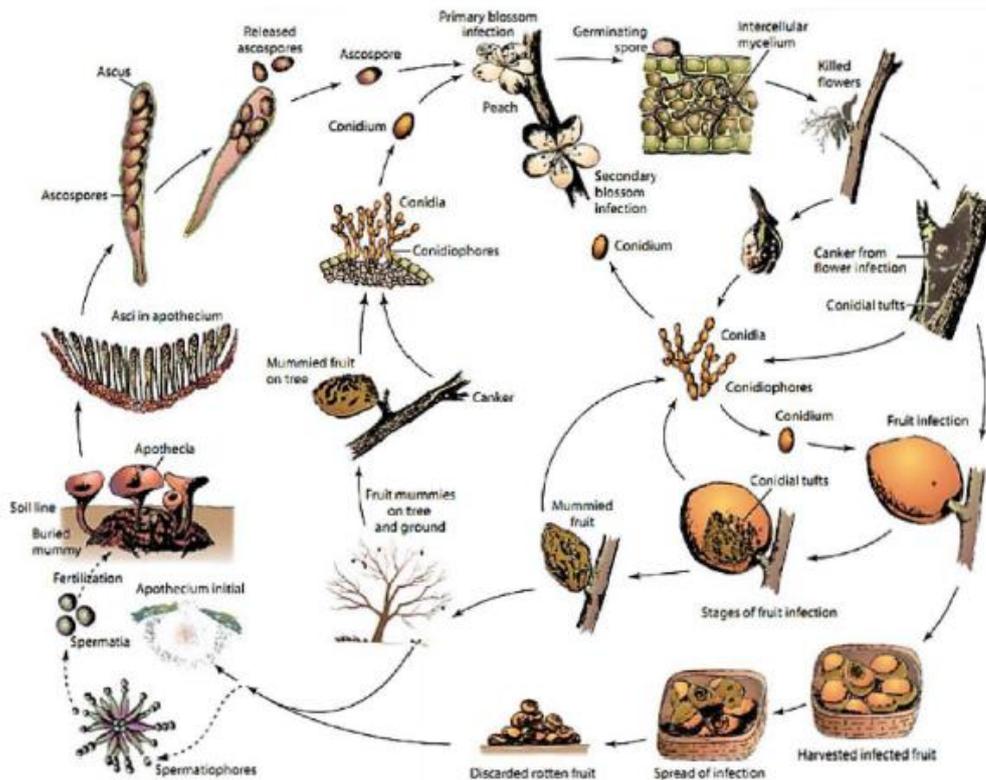


Figure 1: Cycle infectieux des monilioses (Agrios 2005)

L'abricotier est sensible aux monilioses sur fleur du gonflement des bourgeons floraux à la chute des pétales avec une sensibilité maximale au stade pleine fleur (Lichou et Jay 2012). Durant ce stade, si les conditions sont favorables (humectation, fenêtre de température correcte), il peut y avoir germination des conidies. Après pénétration, le champignon se développe, provoquant la nécrose des tissus infectés (pétales, étamines, pistil, sépales). Le champignon peut ensuite gagner le rameau par l'intermédiaire du pédoncule des fleurs infectées. A partir des lésions ainsi créées, de nouvelles spores peuvent être émises et démarrer un nouveau cycle infectieux.

Dans ce rapport, nous adoptons la notation des stades phénologiques de Baggiolini (Baggiolini 1952; décrit dans la plaquette agroscope Fabre, Bloesch, Viret en annexe 1) :

- |   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| B – Gonflement des bourgeons              | E – Ballonnets/ début floraison      |
| C – Éclatement des bourgeons/bouton rouge | F – Pleine fleur                     |
| D – Ouverture des sépales/ bouton blanc   | G – Chute des pétales/ fin floraison |

L'inoculum secondaire constitué sur les fleurs et rameaux infectés, ainsi que sur les fruits de l'année précédente est ensuite responsable des infections sur fruits. Les fruits sont sensibles durant tous leurs stades de développement mais plus sensibles à l'approche de la maturité (Lichou et Jay 2012; Hrustić *et al.* 2012). L'infection des fruits est favorisée par les blessures de l'épiderme du fruit (impact de grêle, éclatement du fruit, piqûres d'insectes). Le champignon se développe ensuite sous la forme d'une moisissure brune à grise et conduit à la chute ou à la momification du fruit (Lichou et Jay 2012; Hrustić *et al.* 2012).

### 3.3. Symptômes et identification

Les trois espèces de *Monilinia* provoquent des symptômes comparables sur fleur et rameaux : nécrose du pétale (Figure 2a) puis dessèchement et momification de la fleur. Les symptômes sur fleur

se transmettent ensuite au rameau, provoquant des nécroses des tissus internes et un dessèchement du rameau (Figure 2b). Lors du développement des symptômes, des coussinets gris peuvent apparaître à la base des fleurs desséchées.

Si les symptômes sur pétale sont distinguables sans équivoque, un dessèchement de rameau peut également être causé par la bactériose. Il est tout de même possible de distinguer clairement les deux syndromes en prenant quelques éléments supplémentaires en compte : le rameau atteint de bactériose est noir, souple et peut présenter des chancres. Le rameau monilié est cassant, peut présenter des écoulements de gomme, est forcément fleuri et présente des nécroses brunes « couleur chocolat » sous l'écorce superficielle (Figure 2c).



Figure 2: a. Nécrose sur pétales b. Rameau desséché c. Nécrose des tissus internes du rameau

L'observation des symptômes *in situ* ne permet pas de différencier l'espèce de *Monilinia* responsable de l'infection. Afin d'être certain du pathogène responsable, il est nécessaire de conduire des tests d'identification. Les différentes espèces de *Monilinia* peuvent facilement se distinguer après isolement sur milieu PDA (Potato Dextrose Agar) en boîte de Petri (Lane 2002). Les colonies de *Monilinia laxa* sont lobées et de couleur claire. Les colonies de *Monilinia fructicola* effectuent des sporulations qui permettent de les distinguer facilement de *M. laxa* ou *M. fructigena* qui n'en produisent pas sur milieu PDA (Figure 3). Il est aussi possible d'identifier les différentes espèces par PCR (Polymerase Chain Reaction) (Guinet *et al.* 2016).



Figure 3: Colonies de *Monilinia* sur boîte de Petri.

*M. fructicola* (à gauche) présente des sporulations et un développement radial.

*M. laxa* (à droite) forme des lobes caractéristiques.

### 3.4. Effet des conditions climatiques sur le développement des monilioses

Plusieurs études ont été réalisées sur les conditions climatiques favorisant le développement des monilioses. Tamm *et al.* montrent en 1995 avec une expérience en chambre climatique, l'importance de la durée d'humectation et de la température sur le développement de *M. laxa* sur fleurs de cerisier. 24 heures d'humectation successives à température optimale peuvent causer jusqu'à 80% d'infection sur les fleurs. De même, Luo *et al.* montrent en 2001 un rôle semblable de l'humectation et de la température pour le développement de *M. fructicola* sur prunier, également en conditions contrôlées. Cette étude montre également que la fleur ouverte est le stade le plus sensible

à l'infection. Koball *et al.* 1997 met en évidence un effet de l'humidité relative et de l'activité de l'eau dans le développement de *M. fructicola* sur pétales de cerisier en boîte de Petri. Des résultats similaires sont obtenus par Casals *et al.* en 2010 pour la germination *in vitro* de *Monilinia spp.*. Ces études montrent toutes un fort besoin en eau sous différentes formes (heures humectées, humidité relative, activité de l'eau) pour le développement des monilioses. Le développement de *Monilinia* montre à travers ces études une réponse en cloche à la température, centrée autour d'une température optimale dépendant de l'espèce étudiée. Ces études ont été réalisées avec différentes espèces de *Monilinia* et sur différentes plantes hôtes. De plus, toutes ont été réalisées en conditions contrôlées, d'où l'intérêt d'expérimentations au verger, dans des conditions climatiques plus variables.

## 4. Modélisation bioclimatique

« La modélisation en écologie est la construction et l'analyse de modèles mathématiques de processus écologiques, incluant des modèles purement biologiques et des modèles biophysiques. Les modèles peuvent être analytiques ou fondés sur des simulations et sont utilisés pour comprendre des processus écologiques complexes et prédire comment les écosystèmes réels pourront évoluer » (Nature - ecological modelling 2018).

La modélisation bioclimatique étudie la distribution et le développement d'un organisme en fonction des conditions climatiques.

### 4.1. Hypothèses fondamentales

L'étude des conditions favorables au développement de pathogène peut être conduite suivant différentes hypothèses. Ici, l'axe d'étude nous intéressant est l'examen des conditions climatiques favorisant le développement de la maladie. Nous nous plaçons donc sous les hypothèses des modèles bioclimatiques (Jeschke, Strayer 2008). Ces hypothèses sont les suivantes :

- Les interactions biotiques sont négligeables dans la dispersion des espèces ou sont constantes dans l'espace et dans le temps

- La composition génétique et phénotypique des espèces est constante dans l'espace et dans le temps.

- La dispersion est non limitante : les espèces sont présentes là où les conditions sont favorables et seulement là.

### 4.2. Outils statistiques utilisés

Les méthodes statistiques couramment utilisées pour la modélisation bioclimatique sont la régression logistique, les modèles linéaires généralisés, les modèles additifs généralisés, les enveloppes climatiques, les arbres de classifications et les réseaux neuronaux (Jeschke, Strayer 2008).

Ces approches diffèrent principalement par les connaissances *a priori* infusées dans le modèle. Ainsi par exemple, les modèles linéaires généralisés sont purement statistiques et ne requièrent aucune connaissance biologique en amont de l'organisme étudié. Les réseaux de neurones sont des modèles « boîte noire ». Ils montrent de très bonnes capacités prédictives mais le rôle donné aux différentes variables prises en compte par le modèle est inconnu. Les modèles en enveloppe climatique en revanche, sont construits avec des *a priori* biologiques sur la réponse de l'organisme au climat (températures optimales de développement par exemple).

## 5. Importance de la modélisation en protection des cultures dans le cadre du changement climatique

Le développement des ravageurs et maladies des cultures est grandement influencé par le climat. Le changement climatique aura donc des conséquences sur la distribution et le développement des pathogènes (Pautasso *et al.* 2012; Bebber *et al.* 2013; Bebber 2015). Ainsi, des hivers plus doux et des printemps plus pluvieux pourraient augmenter le risque d'infections printanières (Harvell 2002). Des conséquences du changement climatique sont déjà étudiées pour plusieurs ravageurs et pathogènes (Exemples : bactérioses - Godefroid *et al.* 2018; Hirschi *et al.* 2012; carpocapse - Saudreau *et al.* 2013; Stoeckli *et al.* 2012; mildiou - Mariette *et al.* 2016; rouille jaune - Hovmøller *et al.* 2016).

Afin de se préparer correctement aux changements à venir, il est nécessaire de pouvoir les prédire au mieux. Dans ce cadre, mener des études épidémiologiques concernant les pathogènes dont le développement est grandement affecté par le climat est primordial. Aussi, on peut observer un intérêt grandissant de la communauté scientifique sur ce sujet. Le graphique ci-après présente le nombre de publications correspondant aux mots clefs « *plant + disease + climate + change* » sélectionné par la base Web Of Science. La date de départ pour le décompte est 2007, date de publication du quatrième rapport de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change/Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat – GIEC) (Pachauri *et al.* 2007). Ce rapport a redonné un élan à la recherche dans l'étude des conséquences du changement climatique (Fig. 4).

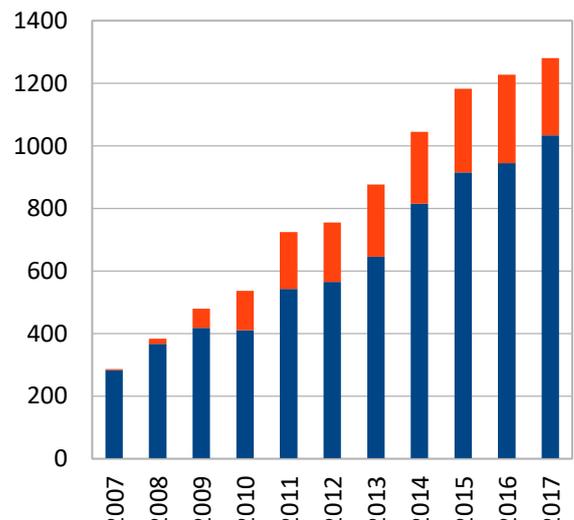


Figure 4: Nombre de publications correspondant aux mots clefs « *plant + disease + climate + change* » dont en rouge les publications contenant le mot clef additionnel « *modeling* »

La prédiction des conséquences du changement climatique sur le développement de la moniliose sur fleur et rameaux d'abricotiers est donc un exercice de modélisation bioclimatique. Pour répondre à cette problématique nous suivrons la démarche de construction et de mise en œuvre d'un modèle : construction d'un schéma conceptuel et choix d'un (ou plusieurs) formalismes, calibration à partir de données expérimentales, évaluation du modèle sur des données indépendantes, puis utilisation du modèle. Ce rapport sera donc séparé en trois parties :

**Partie I :** Description de l'expérimentation en pots pièges permettant la calibration de modèles épidémiologiques.

**Partie II :** Analyse de dégâts sur un réseau de parcelles, puis test et évaluation des modèles sur ces parcelles.

**Partie III :** Application des modèles pour étudier les conséquences du changement climatique sur le développement de la moniliose de l'abricotier en région Rhône-Alpes.

# Partie I : Expérimentation sur pots

Calibration des modèles.

L'expérimentation en pots piège a eu lieu au domaine INRA de Gotheron (Drôme). Elle consiste en l'installation d'abricotiers en pots au sein d'un verger lors de différents épisodes climatiques afin de déterminer leur influence sur l'infection des fleurs par *Monilinia spp.*.

## 1. Matériel et Méthode

### 1.1. Matériel végétal

Les arbres utilisés pour l'expérience sont des abricotiers de la variété Bergarouge. Cette variété est très sensible à la moniliose sur fleur (Parveau *et al.* 2016). Cette sensibilité a également été observée lors d'un essai sur fleur en 2016. Ce test préalable avait montré une bonne expression des symptômes sur pétales. Ceci permet d'être assuré de l'expression de symptômes si les conditions sont favorables.

Durant l'hiver, les arbres ont été placés en chambre froide pour satisfaire les conditions de levée de dormance ( $4\pm 2^\circ\text{C}$ , alternance 8h jour/ 16h nuit) puis en serre de manière décalée afin d'échelonner les floraisons durant la saison.

Les arbres sont répartis en 12 séries de 6. Au sein d'une série, les 6 pots ont un avancement de floraison homogène. 9 séries ont été utilisées au verger en pots pièges (Fig. 5). Dans chaque série, 5 pots sont exposés au verger et un pot témoin reste à la serre pour contrôler l'absence d'inoculum à l'intérieur de la serre. Ainsi des témoins ne présentant pas de symptômes assurent que les symptômes observés sur une série sont bien dus à l'inoculum au champ. Deux séries ont été disposées dans un champ éloigné du verger pour tester la présence d'inoculum aérien dans le domaine. Une dernière série n'a pas pu être utilisée car arrivée trop rapidement au stade de chute des pétales.

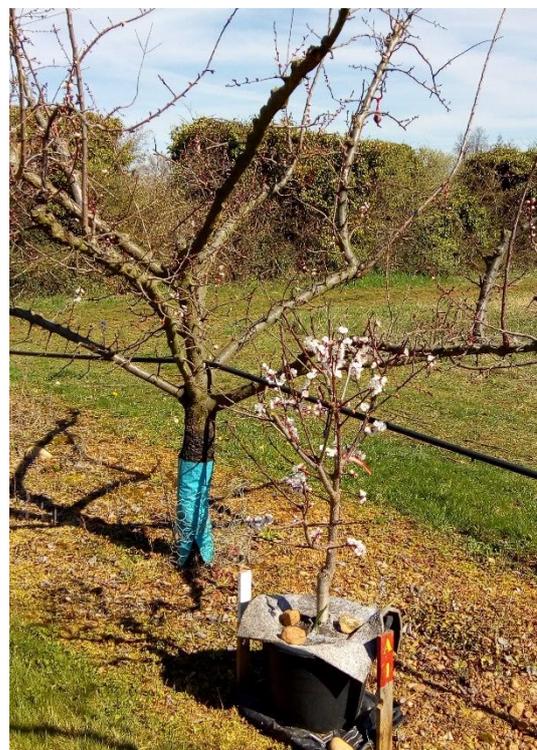


Figure 5: Abricotier en pot utilisé lors de l'expérimentation

### 1.2. Dispositif expérimental

Une fois qu'une majorité de fleurs est au stade F, chaque série de pots piège est installée dans un verger de variété Bergeval. Ce verger est constitué de 3 lignes de 25 arbres avec une distance de plantation de 5m par 3,75m ainsi que d'une quatrième ligne d'autres variétés pour prévenir d'un effet bordure. Le verger a été installé en 2001 mais certains arbres ont été remplacés pour cause de mortalité. Chaque série d'arbre reste au verger pendant un épisode climatique complet, correspondant en général à un épisode pluvieux. Les expositions durent environ 24h mais peuvent être rallongées selon les conditions climatiques, pour ne pas interrompre un épisode de pluie par exemple.

Les séries de pots pièges sont séparés en 3 arbres au nord du verger (N1, N2, N3) et 2 arbres au sud (S1, S2) (cf. plan en annexe 2). Des momies d'abricots récoltées sur des vergers d'abricotiers du domaine durant l'hiver 2017-2018 ont été accrochées grâce à des filets dans les arbres au nord du verger. Un total de 180 momies a été réparti sur les 10 premiers arbres de chaque ligne (cf. plan en

annexe 2). Chaque arbre présente un filet contenant une à deux momies à chaque point cardinal. Ainsi, la présence d'un inoculum était assurée dans la partie nord du verger.

Après leur exposition, les pots sont rentrés à la serre. La serre est séparée en deux parties par une cloison. Les pots sains ne partagent ainsi pas la serre avec les pots qui ont déjà été exposés. Les conditions à la serre sont contrôlées (humidité > 40 %,  $5^{\circ}\text{C} < T < 25^{\circ}\text{C}$ ) de manière à être favorables au développement des symptômes.

### 1.3. Notation de l'incidence

Lors du retour des pots pièges en serre, les fleurs n'étant pas au stade F sont étiquetées pour repérer leur stade phénologique. À partir de l'apparition des symptômes, plusieurs comptages sont effectués. Les expérimentations des années précédentes nous indiquaient qu'après 3 à 5 jours, les symptômes sont clairement exprimés, permettant un comptage adéquat. Le nombre de fleurs saines et le nombre de fleurs moniliées par arbre et stade phénologique sont comptés. L'incidence (nombre de fleurs présentant des symptômes/nombre de fleurs total) de la maladie sur une série de pots peut donc être mise en relation avec des conditions climatiques subies pendant l'exposition au verger.

### 1.4. Identification du pathogène

À chaque notation, jusqu'à 16 fleurs moniliées sont prélevées par arbre. Un pétale symptomatique de chaque fleur est déposé en boîte de Petri sur milieu PDA ( $3,9 \text{ g.L}^{-1}$ ). La culture se fait ensuite au laboratoire à température ambiante. L'identification des différentes espèces de *Monilinia* peut ensuite se faire grâce à la clef synoptique de Lane (Lane 2002).

### 1.5. Mesure de l'inoculum

#### 1.5.1. Inoculum aérien

L'inoculum aérien a été mesuré grâce à des capteurs aériens de spores (Burkard 7-days recording volumetric spore traps, Burkard Manufacturing Co. Ltd. Rickmansworth, Angleterre). NB : Dans la suite, et par souci de simplification, ces appareils seront appelés « Burkard » (Fig. 6). L'aspiration des Burkards est fixée à  $14,4 \text{ m}^3/\text{jour}$  et a été vérifiée quotidiennement. Les particules aériennes aspirées sont piégées sur une bande à l'intérieur de l'appareil. La bande est fixée à un tambour réglé pour effectuer un tour en une semaine.

Un appareil a été placé au nord (Burkard Nord, BN) du verger, un second au sud (Burkard Sud, BS) (cf. plan en annexe 2). Les bandes des Burkard sont relevées puis les conidies présentes sur la bande sont comptées au laboratoire INRA de Gotheron. Les comptages sont effectués au microscope après coloration au bleu de coton lactique. Le nombre de conidies par  $\text{m}^3$  d'air aspiré par jour peut donc ensuite être déterminé.

#### 1.5.2. Mesure sous les momies

Des lames microscopiques recouvertes d'une fine couche de vaseline ont été disposées 5 cm sous les filets de momies à l'aide de balancelles. Ces lames ont été remplacées quotidiennement à heure régulière. Un comptage est effectué en plusieurs lectures pour avoir une estimation du nombre de conidies sur la lame. Ce dispositif permet d'avoir une estimation de l'inoculum transporté par ruissellement avec la pluie.



Figure 6: Capteur aérien Burkard

## 1.6. Données météorologiques

Une station météorologique iMETOS (modèle IMT 200 Pessl Instruments, Weiz, Autriche) est installée au centre du verger, à 1,80m de haut. Elle mesure pluviométrie, température, hygrométrie et humectation foliaire.

L'humectation est une variable dont la mesure varie grandement selon le type de capteur (papier buvard ou résistance électrique). Après comparaison entre différents capteurs et les observations sur le terrain, il a été décidé que la mesure de la sonde PESSL devait être complétée par les mesures d'une sonde située dans un verger voisin (CAPRED), plus sensible. Il ressort de la comparaison qu'une nouvelle variable humectation,  $H = \max(\text{PESSL}, \text{CAPRED})$  correspond le mieux avec les conditions observées sur le terrain. Par la suite, l'humectation foliaire sera mesurée ainsi.

## 1.7. Modèles épidémiologiques choisis

Plusieurs modèles ont été utilisés pour estimer l'incidence de la moniliose sur un arbre en fonction des conditions climatiques.

Les équations détaillées des modèles sont disponibles en annexe 4.

### 1.7.1. Tamm

Le modèle proposé par Tamm *et al.* (1995) calcule une incidence d'infection par la moniliose sur fleur comme une surface de réponse à la température et la durée d'humectation. Il prend en compte des paramètres dépendant du pathogène.

Dans ce modèle la réponse de l'incidence d'infection à la température correspond à une courbe « en cloche » acceptant pour paramètres les températures cardinales  $T_{min}$  et  $T_{max}$  correspondant aux températures en-deça et au-delà desquelles il n'y a pas infection. L'incidence a une réponse sigmoïdale à l'humectation avec une phase exponentielle puis stagnation autour d'un plateau correspondant à l'incidence maximale (Fig. 7).

Ce modèle sera nommé « Tamm » par la suite.

### 1.7.2. Magarey

Le modèle proposé par Magarey *et al.* (2005) est un modèle à seuil. Il détermine s'il y a présence ou absence d'infection étant données la durée d'humectation et la température durant l'humectation, en considérant qu'il y a absence d'infection si l'incidence d'infection est inférieure à un seuil critique. Connaissant une température, le modèle permet donc de calculer la durée d'humectation minimale permettant de dépasser ce seuil critique. Par la suite, nous avons choisi, comme préconisé par Magarey *et al.* (2005), un seuil d'incidence critique de 20 %.

Ce modèle décrit également une réponse en cloche à la température centrée autour d'une température optimale de développement. Plus la température est proche de  $T_{opt}$ , plus les besoins en humectations sont facilement remplis.

Ce modèle sera nommé « Magarey » par la suite.

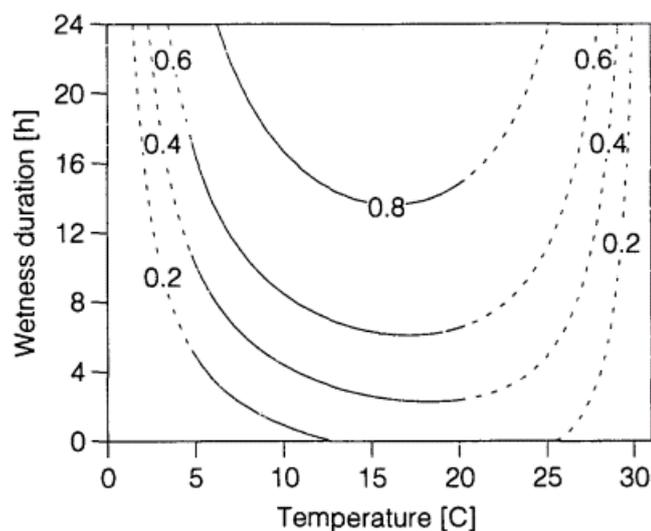


Figure 7: Modèle de Tamm (Tamm *et al.* 1995)

Les isolignes représentent des niveaux d'incidence identiques

### 1.7.3. Modèle linéaire

Un modèle de régression linéaire tenant compte de variables climatiques explicatives a été obtenu sur nos données expérimentales. L'incidence est représentée par une surface de réponse plane.

Ce modèle sera nommé « LM » (Linear Model) par la suite.

## 2. Résultats et discussion

Sauf indication contraire, les analyses statistiques sont conduites avec les paramètres  $\alpha = 0,05$  et  $\beta = 0,80$ .

Remarque : Les 9 pots témoins laissés en serre n'ont développé aucun symptôme. Cela permet de conduire les analyses suivantes en excluant la possibilité d'une contamination après exposition au risque climatique. Ces pots témoins ne seront pas pris en compte dans les analyses à venir.

### 2.2. Identification de l'espèce de *Monilinia* responsable des infections

Le dépôt de fleurs contaminées sur boîte de Petri nous permet d'identifier les espèces de *Monilinia* responsables d'un épisode infectieux. Les fleurs portant vraisemblablement une grande diversité de spores et le milieu choisi (PDA) étant non sélectif, de nombreux saprophytes ont pu se développer en compétition avec *Monilinia*. Cette expérimentation a donc conduit à 63 identifications de *Monilinia* sur 411 prélèvements, soit un taux de réussite d'environ 15 %. Sur les 63 prélèvements ayant développé une colonie de *Monilinia*, 60 ont été identifiés comme *M. laxa* et 3 comme *M. fructicola*, soit 4,8 % de *M. fructicola*.

Par la suite, nous avons donc considéré que les analyses épidémiologiques effectuées concernent *M. laxa*.

### 2.3. Confirmation des stades phénologiques sensibles

Lors de la rentrée des pots en serre, les bourgeons floraux qui n'étaient pas encore au stade F (pleine fleur) ont été repérés. Les résultats détaillés du décompte sont présentés dans le tableau en annexe 3.

On observe que les stades antérieurs au stade F sont moins touchés par la maladie : sur les 706 bourgeons aux stades C, D et E, 28 seulement ont déclaré des symptômes, soit environ 4 %. En revanche, 38 % des fleurs au stade F ont développé des symptômes. Ceci confirme que le stade F est bien le stade sensible de la maladie, les stades précédents n'étant infectés que lors des épisodes à très fort risque (exemple : série 18E).

Par la suite, les incidences seront donc calculées à partir des fleurs au stade F uniquement.

### 2.4. Effet de la position des arbres

Un test de Student païré est effectué entre les incidences observées pour les arbres Nord et Sud de chaque série. Les résultats de ce test ( $p$ -value = 0,695) nous indiquent que l'incidence calculée sur des arbres situés au Nord ou au Sud n'est pas statistiquement différente.

Dans la suite, l'incidence de chaque série sera calculée comme la moyenne des incidences de chaque arbre de la série, sans distinction entre nord et sud. Nos résultats sont cohérents avec ceux

relevés l'année précédente par Doriane Dam (Dam 2017). Ainsi, dans les analyses suivantes, les deux séries de points pourront être utilisées.

## 2.5. Présence d'un inoculum aérien

Les séries témoins au champ (TC) ont exprimé des symptômes malgré l'absence de momies dans leur entourage direct. Les incidences observées pour ces séries sont comparables en ordre de grandeur aux séries en verger correspondantes (18H : 21,59 % pour TC1 : 27,92 % et 18I : 19,93 % pour TC2 : 14,67 %).

Ces résultats, couplés à l'absence de différence d'incidence entre Nord et Sud du verger, nous invitent à considérer la présence d'un inoculum aérien non limitant dans tout le domaine. En effet, la grande concentration de vergers dans les environs et les forts vents balayant la région peuvent permettre une dissémination importante de spores et de conidies sur de grandes distances.

La quantité d'inoculum aérien mesurée par les Burkards semble très faiblement liée aux différentes variables climatiques mesurées ( $R^2 = 0,1$  ; 0,008 et 0,05 pour température, pluviométrie et humectation respectivement).

De même, l'inoculum mesuré sous les momies grâce aux lames vaselinées montre peu de corrélation avec les différentes variables climatiques étudiées. Il est à noter qu'à plusieurs reprises de forts vents ont renversé les balancelles, créant un biais dans la mesure. Cette mesure de l'inoculum n'est donc pas exploitable.

## 2.6. Effet des différents facteurs climatiques

Les facteurs climatiques sélectionnés comme pertinents par les études précédentes pour expliquer l'infection de *M. laxa* sur fleur d'abricotier sont la température et l'humectation (cf. Introduction 1.3.4). Étant donné que le protocole suivi lors de l'expérimentation est le même que celui suivi par Doriane Dam en 2017, les relevés des deux années seront utilisés. Les séries de 2018 sont nommées 18A à 18I et les séries de 2017 A à G.

Tableau 1: Incidence et conditions climatiques enregistrées pour chaque série de pots (*p* = pluviométrie, *H* = durée d'humectation, *T* = température moyenne durant humectation).

Série	Incidence	p (mm)	H (h)	T (°C)	Série	Incidence	p (mm)	H (h)	T (°C)
18A	2,1%	0,2	3,2	2,6	A	77,6%	32,0	33,1	7,8
18B	21,8%	2,6	8,6	10,6	B	1,9%	0	1,2	8,1
18C	51,9%	6,8	20,5	11,8	C	46,6%	13,8	18,7	9,9
18D	4,2%	0	0	9,4	D	40,1%	7,2	22,2	7,5
18E	79,7%	25,4	12,2	10,3	E	0%	0	0	13,3
18F	26,5%	12,0	17,3	7,3	F	0%	0	0	11,0
18G	1,1%	0	0	5,6	G	42,1%	4,0	12,7	11,8
18H	21,6%	1,8	20,5	8,5					
18I	19,9%	2,2	8,1	9,4					

Afin d'étudier l'effet de différents facteurs climatiques, nous nous plaçons dans un premier temps dans l'approximation d'une réponse linéaire du champignon à ces différents facteurs. La

solidité du lien statistique entre l'incidence et la variable explicative est ensuite quantifiée par le coefficient de détermination,  $R^2$  (Tab. 2).

Tableau 2: Coefficients de détermination caractérisant différentes relations pour les points 2017, 2018 et les deux années confondues

Relation	2017 (n = 7) ( $R^2$ )	2018 (n = 9) ( $R^2$ )	Total (n = 16) ( $R^2$ )
Incidence ~ température	0,056 (p-value = 0,297)	0,296 (p-value = 0,0748)	-0,030 (p-value = 0,4681)
Incidence ~ humectation	<b>0,934 (p-value = 0,0002)</b>	<b>0,258 (p-value = 0,0928)</b>	0,622 (p-value = 0,0001)
Incidence ~ pluviométrie	<b>0,771 (p-value = 0,0057)</b>	<b>0,767 (p-value = 0,0012)</b>	<b>0,783 (p-value = 3,25.10<sup>-6</sup>)</b>
Pluviométrie ~ humectation	0,831 (p-value = 0,005)	0,045 (p-value = 0,2777)	0,480 (p-value = 0,0017)

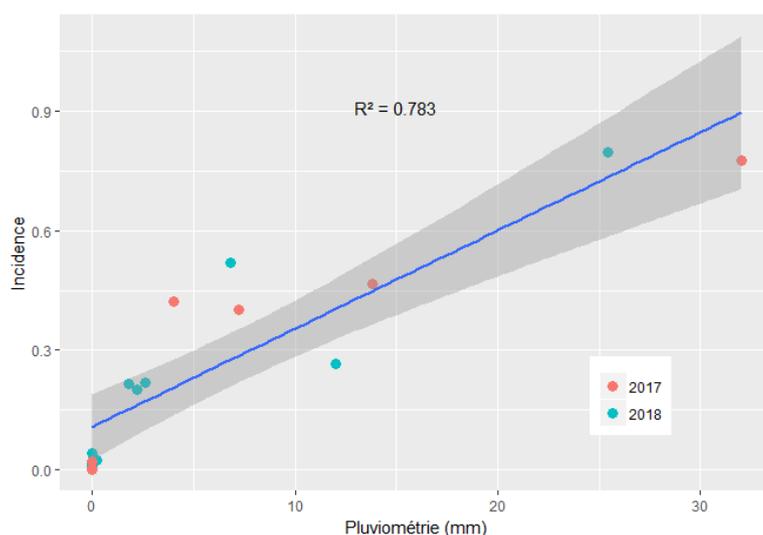
### 2.6.1. Effet de l'humectation

En 2017, l'humectation apparaissait comme le facteur le plus explicatif de l'incidence sur pots. En 2018, cette forte relation entre incidence et humectation ne se retrouve plus. L'importance de l'humectation dans le développement du champignon n'est pas à remettre en cause, car appuyée par des expériences en conditions contrôlées (Tamm *et al.* 1995; Casals *et al.* 2010; Luo *et al.* 2001). Néanmoins, il semble qu'au verger, ce ne soit pas le facteur le plus explicatif.

### 2.6.2. Effet des précipitations

La pluviométrie présente une forte relation avec l'incidence quelle que soit l'année et également pour les deux années confondues (Fig. 8). Les précipitations apparaissent donc comme un paramètre plus explicatif des infections au verger que l'humectation.

Figure 8: Relation entre pluviométrie et incidence (points 2017 en rouge, 2018 en bleu)



### 2.6.3. Lien entre précipitations et humectation.

L'effet de l'humectation observé en 2017 et non en 2018 peut s'expliquer par le lien entre pluviométrie et humectation. En effet, en 2017, toutes les humectations étaient dues à de la pluie, en découlait ainsi une forte relation entre pluviométrie et humectation. Les conditions météorologiques de l'année 2018 ont été plus diverses, avec entre autre des rosées (point 18A), des pluies faibles ayant provoqué de longues humectations (point 18C) et au contraire de fortes pluies ayant séché rapidement, grâce à un vent soutenu (point 18E) (cf. Tableau 1). Ces conditions nous permettent de séparer les facteurs humectation et précipitations.

## 2.6.4. Effet de la température

Étant donnée la faible variabilité des températures durant l'expérimentation et l'importance d'autres facteurs, il est difficile de retracer une relation précise entre incidence et température. En revanche, la prise en compte de la température comme facteur explicatif reste tout de même pertinent d'un point de vue biologique. Ainsi, bien que le  $R^2$  caractérisant la relation entre incidence et température soit uniquement de -0,03 ( $R^2$  ajusté, deux années confondues, p-value = 0,4681), nous choisissons de conserver la température comme variable explicative lors de la modélisation.

## 2.7. Modification des modèles épidémiologiques

L'humectation n'apparaissant pas comme le facteur le plus explicatif de l'incidence au verger, il a été choisi d'utiliser la pluviométrie comme variable d'intérêt (avec la température). Cela implique certaines modifications des modèles.

Les équations proposées pour le modèle de Tamm ne forcent pas l'incidence à être nulle en l'absence d'humectation/précipitations. C'est en revanche une observation que nous faisons avec nos données. Afin de pallier cela et d'adapter le modèle de Tamm, calibré sur des données d'humectation à une modélisation avec la pluviométrie comme variable d'entrée, nous avons effectué une modification de l'équation. Un facteur  $\text{pluviométrie} / (\text{pluviométrie} + \varepsilon)$ , avec  $\varepsilon$  non nul et estimé pendant la calibration, a été ajouté devant l'équation (cf. équation en annexe 4). Ceci permet de forcer l'incidence à 0 en l'absence de précipitation. Dans la suite, ce nouveau modèle sera également désigné « Tamm » par analogie.

L'équation du modèle de Magarey n'a pas été modifiée, la pluviométrie est prise en variable d'entrée à la place de l'humectation. L'allure de la courbe de Magarey en prenant en compte la pluviométrie continue de pouvoir décrire de façon satisfaisante le risque d'infection au vu de nos points, il n'y a donc pas eu plus de modifications des équations.

## 2.8. Calibration des modèles épidémiologiques

Les modèles sont calibrés avec les points obtenus par les expérimentations sur pots en 2017 (Dam, 2017) et 2018. Les différents modèles sont calibrés de manière à minimiser l'écart entre les valeurs observées et prédites. Ceci est mesuré par le  $R^2$  dans le cas du modèle linéaire, par la RMSE (Root Mean Square Error : erreur quadratique moyenne ou erreur type) dans le cas de Tamm (car modèle non linéaire) et par la diminution du nombre d'erreurs de prédiction pour Magarey. La RMSE permet de quantifier l'écart entre les valeurs d'incidence observées et celles prédites par le modèle.

Les modèles Tamm et LM peuvent être représentés par des surfaces de réponse :

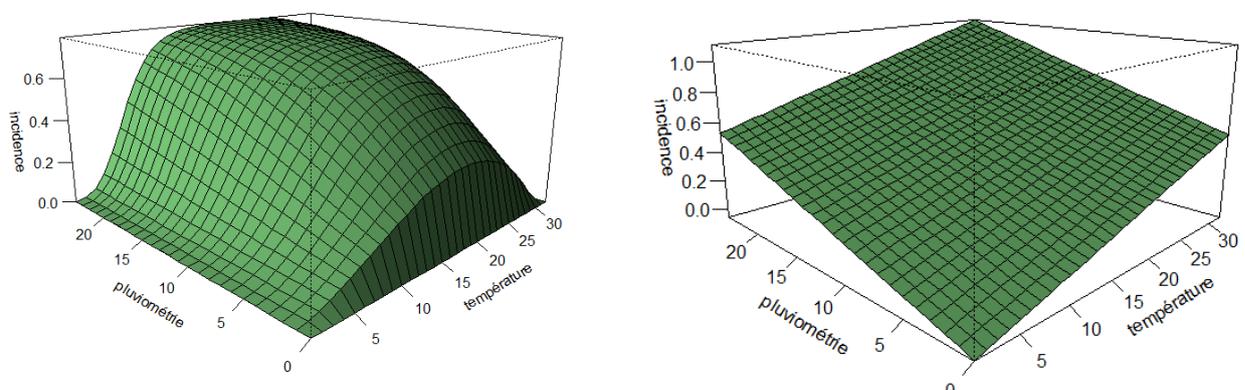


Figure 9: Surfaces de réponse représentant les modèles Tamm (gauche) et LM (droite).

Les différents modèles sont représentés ainsi que les points ayant servi à la calibration sur la figure suivante :

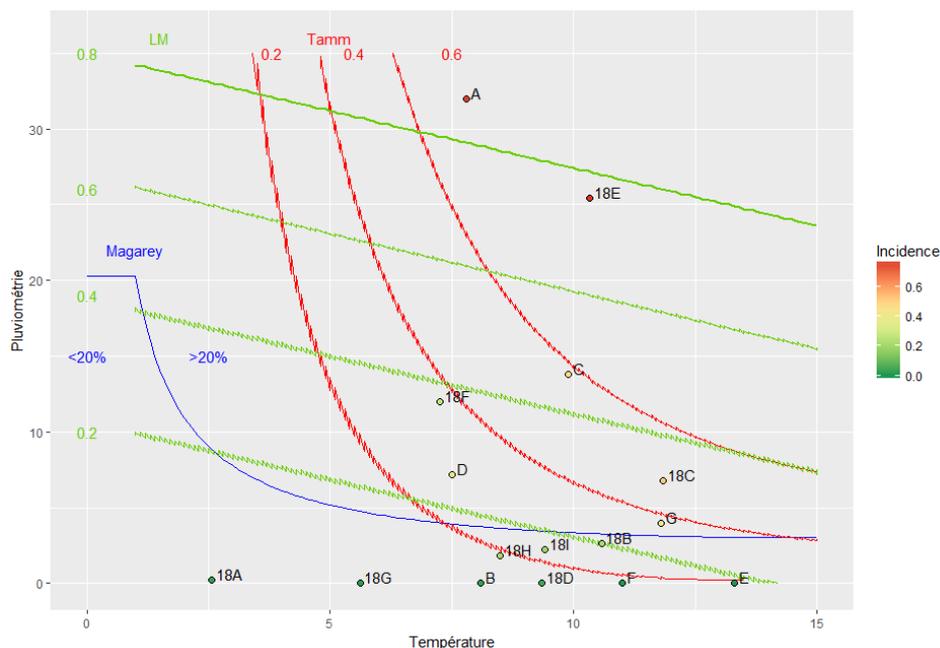


Figure 10: Représentation des différents modèles et des points observés. Les isolignes représentent les niveaux d'incidence.

Les différentes variables d'entrées, de sorties ainsi que paramètres et performances des modèles après calibrations sont retranscrits dans le tableau suivant :

Tableau 3: Récapitulatif des paramétrages choisis et des caractéristiques des modèles (la signification des paramètres est disponible en annexe,  $p$ =précipitations ;  $T$ =température)

Modèle	Paramètres	Valeurs choisies (respectivement)	Variables d'entrée	Sortie	Ajustement
<b>Tamm</b>	$T_{\min}, T_{\max}, m, I_{\max}, \gamma_1, \gamma_2, \rho_1, \rho_2, \varepsilon$ (9)	0, 31, 0.9, 0.79, 1.709, 1.4722, 1.5751, 1.9652, 0.029	$p, T$	Incidence (%)	RMSE : 0,061 RRMSE <sup>1</sup> : 22%
<b>Magarey</b>	$T_{\min}, T_{\max}, T_{\text{opt}}, W_{\min}, W_{\max}$ (5)	0, 31, 15, 3, 24	$p, T$	Incidence > 20 % (oui/non)	14 prédictions correctes sur 16
<b>Modèle linéaire (LM)</b>	$a_{\text{pluvio}}, a_{\text{temp}}, b$ (3)	0.0246, 0.0187, -0.0625	$p, T$	Incidence (%)	$R^2 = 0,81$

Les modèles ont ensuite été testés par l'intermédiaire de l'étude des dégâts sur rameaux sur le réseau de parcelles ClimArbo. Les dégâts sur rameaux sont causés par l'infection sur la fleur. Ainsi, ces modèles épidémiologiques décrivant l'incidence sur fleur devraient pouvoir expliquer une partie des dégâts sur rameaux.

<sup>1</sup> Ici, on peut interpréter ces valeurs comme : Tamm s'ajuste aux points à  $\pm 6,1\%$  d'incidence près. Le RRMSE (Relative Root Mean Square Error) correspond au RMSE divisé par la valeur moyenne de l'incidence. Il nous indique que  $\pm 6,1\%$  d'incidence correspond à une précision de  $\pm 22\%$ , ce qui peut être considéré comme une bonne performance

# Partie II : Étude des dégâts sur rameau dans un réseau de parcelles

Test des modèles

Différents acteurs (INRA, Instituts techniques, GRAB) ont mis en place un réseau de parcelles au sein duquel les conditions météorologiques, l'évolution phénologique des arbres et les dégâts de moniliose sur rameaux ont été suivis. L'analyse des dégâts de moniliose sur rameaux au sein des parcelles étudiées avec le réseau a deux objectifs. Le premier est de valider les modèles épidémiologiques sur fleur calibrés précédemment. Les infections sur rameaux nécessitant le passage par la fleur, si l'infection sur fleur est correctement modélisée, les modèles devraient pouvoir expliquer une partie des dégâts sur rameaux. Le deuxième objectif de cette analyse est d'identifier plus généralement la contribution de différents facteurs dans le développement de *Monilinia* sur rameaux (en dehors de l'utilisation des modèles).

## 1. Matériel et méthode

### 1.2. Présentation des parcelles du réseau

Le réseau est constitué de 15 parcelles réparties dans l'Ardèche et la Drôme. Parmi ces parcelles, 10 sont sous la responsabilité de la SEFRA (Station Expérimentale Fruits Rhône-Alpes), 4 sous la responsabilité du GRAB (Groupe de Recherche en Agriculture Biologique), la dernière parcelle étant la parcelle plantée en Bergeval utilisée pour l'expérience en pots, à l'INRA Gotheron. Ces parcelles sont étudiées avec les données des saisons 2017 et 2018.

Tableau 4: Informations des parcelles du réseau

Code	Responsable	Variété	Année d'étude	Code	Responsable	Variété	Année d'étude
<b>sefra1</b>	SEFRA	Bergeron	2017 et 2018	<b>grab1</b>	GRAB	Bergeron	2017 et 2018
<b>sefra2</b>	SEFRA	Bergeron	2017 et 2018	<b>grab2</b>	GRAB	Bergeron	2017 et 2018
<b>sefra3</b>	SEFRA	Bergeval	2017 et 2018	<b>grab3</b>	GRAB	Bergeron	2017 et 2018
<b>sefra4</b>	SEFRA	Bergeron	2017 et 2018	<b>grab4</b>	GRAB	Bergeron	2017 et 2018
<b>sefra5</b>	SEFRA	Bergeval	2017 et 2018	<b>bergeval</b>	INRA	Bergeval	2018
<b>sefra6</b>	SEFRA	Bergeron	2017 et 2018				
<b>sefra7</b>	SEFRA	Bergeron	2017 et 2018				
<b>sefra8</b>	SEFRA	Bergeval	2017 et 2018				
<b>sefra9</b>	SEFRA	Bergeval	2017 et 2018				
<b>sefra10</b>	SEFRA	Bergeval	2018				

### 1.3. Suivi phénologique

Sur chaque parcelle, 10 arbres adjacents ont été choisis au début de la saison puis suivis. Ces arbres n'ont subi aucune protection fongicide. Régulièrement durant la floraison, des notations ont

été effectuées, indiquant pour différentes dates la proportion de bourgeons à fleurs aux différents stades phénologiques (A, B, C, D, E, F, G). Ces notations sont effectuées séparément entre rameaux courts (<30 cm) et longs (>30cm) car les floraisons sur rameaux courts et longs ne sont pas synchrones. À chaque arbre est également attribuée une note de floribondité entre 1 (peu de fleurs – 10 fleurs par mètre linéaire de rameaux) et 5 (très fleuri – 50 fleurs par mètre linéaire de rameaux) selon l'échelle utilisée par la SEFRA. Ainsi, il est possible de déterminer la période de sensibilité de chaque verger et d'étudier plus précisément les épisodes climatiques à risque.

Pour une étude avec un pas de temps horaire, les proportions de chaque stade sont interpolées entre deux dates de notations.

## 1.4. Notation de l'incidence

L'incidence de la moniliose dans chaque parcelle est mesurée sur 5 charpentières choisies parmi les 10 arbres précédents, et jugées représentatives du verger. Sur chacune de ces charpentières, le nombre de rameaux moniliés ainsi que le nombre total de rameaux sont comptés. L'incidence est mesurée à travers la variable :

$$\text{Note charpentière} = \frac{\text{nombre de rameaux moniliés sur les 5 charpentières}}{\text{nombre de rameaux total des 5 charpentières}}$$

Une note charpentière représentative de l'incidence sur rameaux est attribuée à chaque parcelle.

## 1.5. Identification des pathogènes

Sur chaque parcelle, 32 fleurs moniliées sont prélevées sur les 10 arbres suivis d'un point de vue phénologique puis envoyées aux laboratoires de l'INRA où elles sont déposées sur boîte de Petri suivant le protocole décrit Partie I (§1.4).

10 rameaux présentant des symptômes (dessèchement, coussinets, chancres) sont également prélevés. L'écorce superficielle du rameau est enlevée au niveau du front de progression de la maladie, à la frontière entre la partie malade et la partie saine du rameau. Un échantillon de tissus est ensuite prélevé puis déposé sur boîte de Petri.

## 1.6. Données météorologiques

Chaque parcelle possède une station météorologique PESSL identique, mesurant température (°C), pluviométrie (mm) et humectation (nombre d'heures humectées) à un pas de temps horaire. Les données sont recueillies pour chaque parcelle entre mi-février et début mai, de façon à couvrir toute la période de floraison. Ensuite, les données sont étudiées sur la période de floraison, entre la première apparition de stade D et le dernier stade F, représentant ainsi la fenêtre de sensibilité de l'arbre.

Cette fenêtre de sensibilité est ensuite découpée en plusieurs épisodes pluvieux du fait du caractère déterminant de la pluie pour l'infection, montré précédemment par l'expérimentation en pot. Ces épisodes sont définis suivant la règle de décision suivante :

Si deux pluies enregistrées sont séparées de moins de 4h non humectées, elles sont considérées comme appartenant au même épisode. On considère en effet que la pluie atteignant les fleurs n'aura pas le temps de sécher et restera potentiellement infectieuse (Dulais 2014). Deux épisodes différents sont donc séparés par au moins 4h de temps sec.

Pour chaque épisode, la pluviométrie cumulée, la température moyenne et la somme d'heures humectées sont calculées.

## 1.7. Construction d'un indice de risque pondéré

À chaque épisode pluvieux, un risque climatique d'infection sur fleur (RCIF) peut être calculé à l'aide des modèles calibrés précédemment (Tamm, Magarey et LM). Néanmoins, rameaux courts et rameaux longs ne fleurissent pas en même temps et les différents stades phénologiques ne présentent pas la même sensibilité. Chaque épisode climatique subi par une parcelle durant la floraison n'aura donc pas le même impact en fonction de la proportion de fleurs aux stades sensibles. Remarque : Le stade E étant fugace (quelques heures) et représentant donc une proportion minoritaire des fleurs (5 à 10%), il sera par la suite rattaché au stade F par souci de simplification.

Pour chaque épisode, le nombre de fleurs aux stades sensibles est calculé par parcelle à partir de l'ensemble des rameaux comptés sur les 5 charpentières suivies (cf. 1.4):

$$\text{Nombre de fleurs au stade D(ou F)} = \text{floribondité}^2 \times (\text{nombre de rameaux courts} \times \text{proportion de fleurs au stade D (ou F) sur rameaux courts} + \text{nombre de rameaux longs} \times \text{proportion de fleurs au stade D (ou F) sur rameaux longs})$$

Le nombre de fleur ainsi calculé permet de pondérer le risque RCIF attribué à l'épisode et de calculer un risque climatique pondéré d'infection sur rameaux (RCPIR), tenant compte de la probabilité de transmission de l'infection de la fleur au rameau. En effet, les expérimentations en pots de 2017 et 2018 montrent que le stade D est moins sensible que le stade F quant à l'infection sur fleur. On observe des contaminations sur stade D uniquement pour des épisodes à fort risque et en proportion moindre que sur stade F. Au vu des résultats des expérimentations en pots, la règle de décision suivante a été utilisée :

$$RCPIR = RCIF \times \frac{0,25 \times \text{nombre de fleurs au stade D} + \text{nombre de fleurs au stade F}}{\text{nombre de fleurs au stade D} + \text{nombre de fleurs au stade F}} \text{ si risque} > 0.5$$

Et

$$RCPIR = RCIF \times \frac{\text{nombre de fleurs au stade F}}{\text{nombre de fleurs au stade D} + \text{nombre de fleurs au stade F}} \text{ si risque} < 0.5$$

Ce risque est calculé avec les trois modèles sélectionnés pour l'étude (Tamm, LM et Magarey) pour chaque épisode puis sommés pour obtenir un risque cumulé d'infection sur fleur subi par la parcelle.

## 2. Résultats et discussion

### 2.1. Identifications des espèces de *Monilinia*

L'identification de l'espèce de *Monilinia* responsable des infections sur les échantillons provenant du réseau a eu des résultats variables selon le mode de prélèvement. Les identifications sur fleur ont conduit à l'identification de 202 colonies de *Monilinia* sur 446 prélèvements, soit un taux de réussite de 45 %. Parmi les colonies ayant permis l'isolement de colonies de *Monilinia*, 192 ont été identifiées comme *M. laxa* et 10 comme *M. fructicola*, soit 4,95 %. Les identifications sur rameaux ont conduit à l'identification de 114 colonies de *Monilinia* sur 135 prélèvements, soit un taux de réussite de 83 %. Parmi les colonies ayant permis l'isolement de colonies de *Monilinia*, 112 ont été

---

<sup>2</sup> Rappelons qu'à chaque arbre a été attribuée une note de floribondité entre 1 (peu de fleurs) et 5 (très fleuri)

identifiées comme *M. laxa* et 2 comme *M. fructicola*, soit 1,75 %. Au vu de ces résultats, nous considérons donc que les résultats suivants concernent *M. laxa*.

## 2.2. Performances des modèles épidémiologiques sur fleur

Notre hypothèse est que la performance des modèles pour décrire les dégâts sur rameaux reflète leur performance pour décrire les dégâts sur fleur.

Les prédictions du modèle de Magarey de risque sur fleur ne sont reliées qu'à 15 % avec les dégâts sur charpentière ( $R^2 = 0,1517$ ,  $p\text{-value} = 0,02312$ ).

Les modèles Tamm et LM montrent en revanche de meilleures performances, toutes deux comparables (cf. Fig. 11 pour Tamm). Les prédictions de ces deux modèles sont reliées à 45 % environ avec la note sur charpentière ( $R^2 = 0,4422$ ,  $p\text{-value} = 6,798.10^{-05}$  et  $R^2 = 0,4532$ ,  $p\text{-value} = 5,194.10^{-05}$  respectivement). Toutefois on sait que ces modèles ne décrivent l'incidence qu'en fonction de la pluviométrie et la température et de nombreux facteurs ne sont pas intégrés. Étant donné le grand nombre de facteurs variant entre deux parcelles du réseau et les nombreux facteurs non pris en compte, nous pouvons considérer que 45 % d'explication est une performance correcte de la part de ces deux modèles. Néanmoins, une grande part de variabilité reste à étudier.

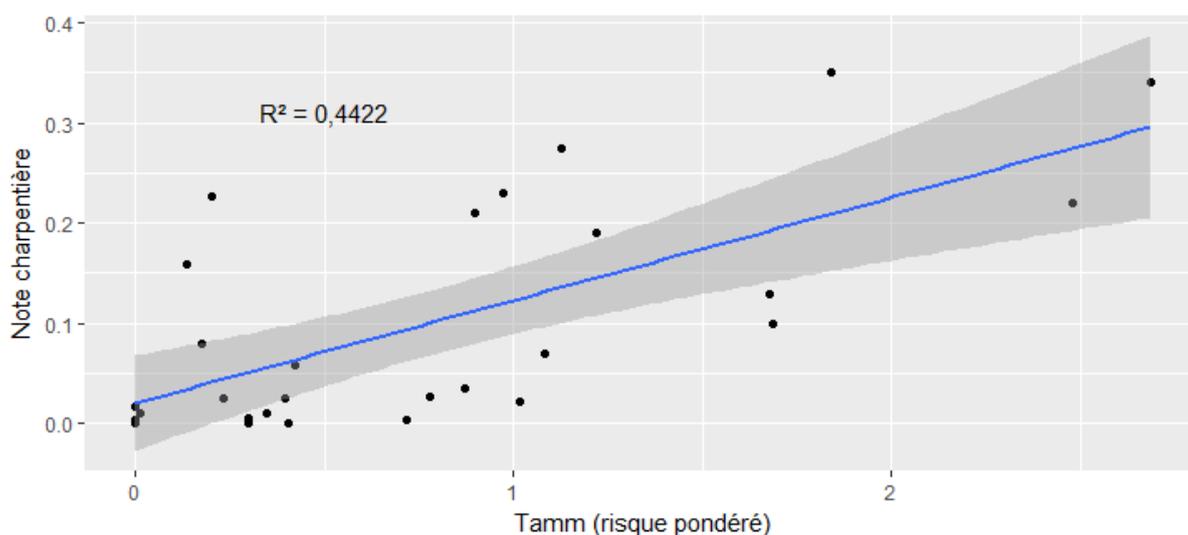


Figure 11: Relation entre le risque Tamm pondéré (RCPIR) et la note charpentière

Les prédictions du modèle Tamm et du modèle linéaire sont fortement corrélées ( $R^2 = 0,986$ ,  $p\text{-value} < 2,2.10^{-06}$ ). En effet, les gammes de pluviométrie et température sur lesquelles ils sont appliqués dans le dispositif du réseau de parcelles, sont les mêmes que celles qui ont servi à calibrer les modèles. Ces résultats pourront néanmoins différer dans l'étude avec le changement climatique car c'est pour des températures hautes que les prédictions des deux modèles divergent, le modèle linéaire répondant de manière croissante avec la température tandis que le modèle de Tamm simule une réponse en « cloche ». Le modèle Magarey quant à lui ne calcule pas un risque d'incidence, mais un nombre de jours avec un risque supérieur à 20 %. Cette différence de calcul fait que les modèles Tamm et LM peuvent diverger en prédiction avec Magarey. Par exemple, des petits épisodes pluvieux seront sous-estimés par Magarey, puisque Magarey assimile un risque d'infection inférieur à 20% d'incidence à un risque nul. La corrélation entre les prédictions de Tamm/LM et Magarey est de  $R^2 = 0,7286$  ( $p\text{-value} = 4,72.10^{-09}$ ). Ce coefficient reste élevé et montre un accord global des modèles sur leurs prédictions. Comparé à la corrélation entre Tamm et LM, il nous confirme que les différences de prédictions entre Tamm et LM ne proviennent pas des épisodes à faible incidence (entre 0 et 20%).

## 2.3. Facteurs expliquant le développement de *Monilinia* sur rameau

Dans cette partie nous analysons uniquement les relations entre dégâts sur rameaux relevés sur les parcelles du réseau et facteurs explicatifs présumés. Les facteurs floribondité, humectation, variété (Bergeron ou Bergeval) ne montrant pas de lien statistique significatif avec le développement de *Monilinia* sur rameau, nous nous focalisons sur la pluie et l'inoculum de la parcelle.

### 2.3.1. Répartition des pluies

L'analyse des relations entre dégâts sur rameaux et épisodes pluvieux subis par une parcelle montre que :

- Le nombre d'épisodes pluvieux a une influence significative ( $R^2 = 0,4216$ , p-value < 0.001)
- Le cumul des pluies durant la floraison a une influence significative ( $R^2 = 0,3536$ , p-value < 0.001)
- L'intensité des pluies par épisode n'a pas d'influence significative ( $R^2 = -0,03994$ , p-value = 0,9709).

Le nombre d'épisodes pluvieux subi par une parcelle semble donc plus explicatif que leur intensité.

### 2.3.2. Pluies de fin de floraison

Les parcelles sefra82017, sefra62017 et grab42017 présentent des taux d'infections plus forts que ce qui est prédit par les modèles épidémiologiques (Fig. 12). L'étude de l'historique de ces trois parcelles nous montre que ces parcelles ont subi des pluies en fin de floraison, alors que la majorité des fleurs étaient déjà au stade G. Ceci pourrait s'expliquer par une sensibilité accrue des fleurs en fin de floraison (micro-blessures dues au vieillissement par exemple) ou par une certaine sensibilité du stade G (infection par le pistil).

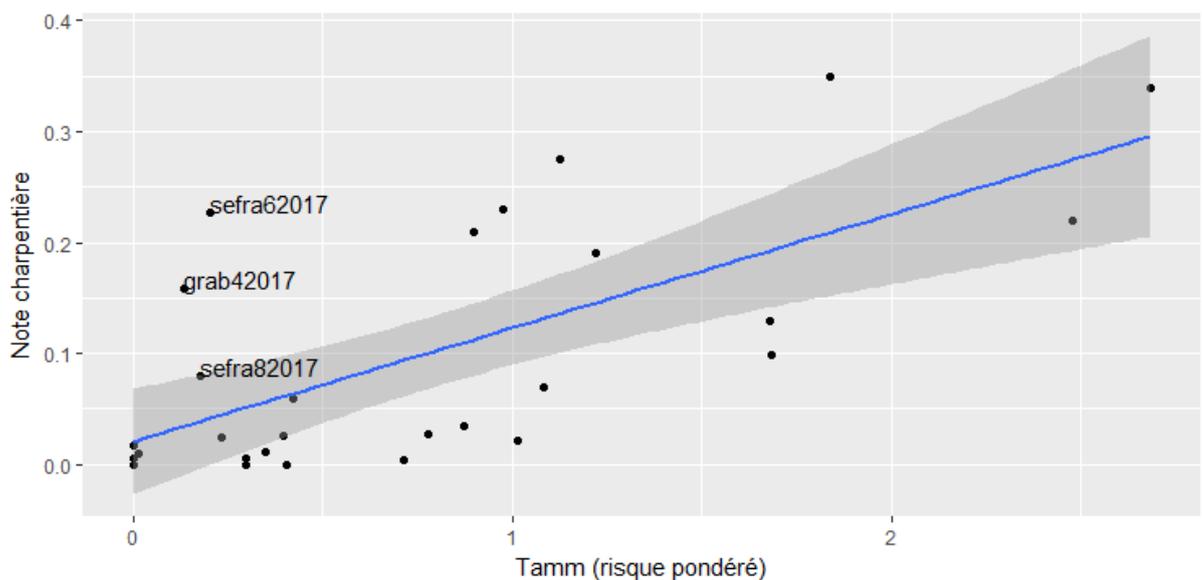


Figure 12: Points à pluie en fin de floraison (sefra62017, sefra82017, grab42017)

### 2.3.3. Variation d'inoculum à l'échelle supra-parcellaire

La relation entre inoculum initial (mesuré en nombre de momies présentes sur la parcelle en début de saison) et note sur charpentière n'est pas statistiquement significative :  $R^2 = 0,003516$ ,  $p\text{-value} = 0,7644$ .

Cette absence de relation ainsi que les expérimentations en pots semblent indiquer que la présence ou l'absence d'inoculum sur la parcelle (sous forme de momies ou de chancres par exemple) est peu explicatif de l'incidence sur fleur et des dégâts sur rameaux. Néanmoins, des variations d'inoculum à plus grande échelle, sur une petite région de production par exemple, pourraient expliquer une part de la variabilité observée.

L'étude du réseau de parcelles permet donc de valider partiellement les modèles épidémiologiques sur fleur, qui se montrent explicatifs à 45 % des dégâts rameaux malgré de nombreux facteurs variants (inoculum, variété, paysage...). Ces performances sont jugées suffisamment satisfaisantes pour l'utilisation des modèles pour l'analyse des conséquences du changement climatique.

L'analyse plus poussée des conditions subies par les parcelles montre que la répartition des pluies joue un rôle non négligeable dans le développement de moniliose sur rameaux. De faibles pluies réparties durant toute la floraison (en particulier à la fin) pourront causer des dégâts importants sur rameaux.

# Partie III : Etude des conséquences du changement climatique sur le développement de moniliose sur abricotier

Utilisation des modèles

L'étude des conséquences du changement climatique a été conduite à partir de données climatiques simulées sur 46 mailles de 8km×8km situées en Rhône-Alpes dans lesquelles est pratiquée la culture de l'abricotier. Afin de pouvoir utiliser les modèles épidémiologiques calibrés et testés précédemment, il est nécessaire de connaître les périodes de floraison chaque année étudiée pour chacune des mailles. Les dates de floraisons ont donc été estimées grâce à un modèle phénologique. Une fois la période de floraison connue, les modèles épidémiologiques ont pu être appliqués afin d'étudier l'évolution du risque moniliose sur abricotier.

## 1. Matériel et méthode

### 1.1. Modèle phénologique

#### 1.1.1. Calcul de la date de mi floraison F50

Le modèle retenu est celui sélectionné comme pertinent par Andreini *et al.* 2014. Ce modèle utilise la fonction *Smoothed Utah* (équations disponibles en annexe 4), inspirée de la fonction proposée par Richardson *et al.* en 1974 puis raffinée par Bonhomme *et al.* 2010.

Ce modèle consiste à attribuer à chaque jour un taux de froid (Rate of chilling)  $R_c$  dépendant de la température. Ces  $R_c$  sont sommés à partir d'une date  $t_0$ . Lorsque la somme des  $R_c$  atteint une certaine valeur seuil, il y a sortie de dormance.

Ici, les différents  $R_c$  sont donnés par la fonction *Smoothed Utah* en fonction de la température.

L'allure de la fonction et les paramètres choisis dépendent de la variété étudiée (Andreini *et al.* 2014). Nous avons sélectionné les variétés Bergeron (date de floraison tardive, répandue dans la vallée du Rhône), Bergarouge (utilisée pour l'expérimentation en pots), Beliana (date de floraison médiane) et Rouge du Roussillon (date de floraison précoce).

Les calculs des dates de floraisons à partir de ce modèle ont été réalisés grâce à la plateforme PMP 5.5 (Phenology Modeling Platform) (Chuine *et al.* 2013). En fin de modélisation, nous obtenons la date de mi floraison (F50) prédite pour chaque année et chaque maille étudiée en fonction des températures journalières.

Les paramètres utilisés pour les modèles phénologiques des différentes variétés sont utilisés par Andreini *et al.* 2014 et préconisés par Inaki García de Cortázar-Atauri (communication personnelle). La date du 15 octobre est choisie comme date de départ pour les simulations (date fixée arbitrairement, en supposant qu'avant le 15 octobre les plantes n'ont pas eu l'opportunité de commencer à couvrir leurs besoins en froid).

### 1.1.2. Estimation de la fenêtre de sensibilité

La fenêtre de sensibilité autour de la date de floraison simulée par le modèle phénologique, est estimée à partir des suivis phénologiques sur le réseau de parcelle (cf. Partie II). La durée moyenne de floraison, entre le premier stade D et le dernier stade F est calculée en degré-jours ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ ). On obtient une durée de floraison moyenne de  $255\pm 49$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ . Afin de pouvoir utiliser cette estimation avec les dates de F50 qui sont données par le modèle phénologique, il faut connaître la position de la date de F50 au sein de cette fenêtre de floraison. Pour cela, la répartition de la proportion de stades F au cours du temps (en  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$ ) est étudiée. La distribution de cette proportion en fonction du temps peut être approximée correctement par une loi normale d'écart-type 28  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$  centrée sur le maximum de floraison ( $\approx F100$ ). Grâce à cela, il est possible de connaître la date de F50 qui a lieu 122  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$  après le début de la floraison. La fenêtre de sensibilité avec pour origine F50 peut donc être estimée ainsi :

Début de la floraison : date F50 simulée - 122  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$

Fin de la floraison : date F50 simulée + 133  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$

## 1.2. Modèles épidémiologiques

Les modèles épidémiologiques utilisés sont ceux calibrés précédemment lors de l'expérience en pots pièges (cf. Partie I).

## 1.3. Données climatiques

Les scénarios de changement climatique étudiés sont ceux proposés par le GIEC lors de son cinquième rapport (Pachauri *et al.* 2014). Ces scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) sont définis selon des gammes de forçage radiatif traduisant le réchauffement du système terre-atmosphère (Moss *et al.* 2010). Nous étudions plus particulièrement ici les scénarios RCP4.5 (moyen) et RCP8.5 (pessimiste), le scénario optimiste RCP2.6 ne sera pas étudié ici car il est désormais considéré comme très peu probable (Penn State University *et al.* 2017).

Les données climatiques sont extraites de la base de données DRIAS de Météo-France ouverte au grand public (<http://www.drias-climat.fr/>) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 entre 2007 et 2100 ainsi que les références historiques de 1950 à 2006. Les données climatiques sont extraites pour 46 mailles DRIAS en région Rhône-Alpes. Contrairement aux parties précédentes, les données climatiques sont étudiées à un pas de temps journalier. Une extrapolation des prévisions à un pas de temps horaire étant donné les incertitudes portées par les variables climatiques serait peu pertinente.

L'étude a été menée soit sur l'ensemble de la période 1950 – 2100 de manière continue, soit en comparant des périodes de 30 ans supposée homogènes d'un point de vue climatique, en moyennant les valeurs sur plusieurs années afin de discerner les tendances. Dans ce 2<sup>ème</sup> cas, les époques choisies ici sont :

Passé (past) entre 1970 et 1999

Futur proche (near future) entre 2020 et 2049

Futur lointain (far future) entre 2070 et 2099

## 1.4. Regroupement en clusters

Afin de rendre l'analyse des résultats plus lisibles, nous avons décidé de regrouper les différentes mailles DRIAS étudiées en régions aux climats comparables. La méthode utilisée pour cette séparation est une classification ascendante hiérarchique. Elle est réalisée grâce à la fonction *hclust* sous R. Les différentes mailles se voient affecter des coordonnées dépendant des conditions climatiques pendant la floraison (température, pluviométrie). La distance euclidienne entre chaque maille est calculée puis les mailles regroupées de proche en proche. Les clusters ainsi formés s'avèrent refléter une séparation des mailles selon leur altitude (Fig. 13). Le regroupement effectué par la classification ascendante hiérarchique apparaît donc pertinente et trois clusters sont ainsi définis :

Cluster 1 : faible altitude ( $\leq 100\text{m}$ ), bords du Rhône en plaine.

Cluster 2 : altitude moyenne ( $100\text{m} < \text{alt.} < 400\text{m}$ ),  
collines de la Drôme

Cluster 3 : haute altitude ( $\geq 400\text{m}$ ), début de montagne

Remarque : Le cluster 3 décrit des conditions dans lesquelles la culture de l'abricot est plus rare que les autres clusters. L'étude de ces mailles est tout de même pertinente car les effets du changement climatique sont exacerbés en montagne et le cluster 3 permet de donner du contraste à l'étude.

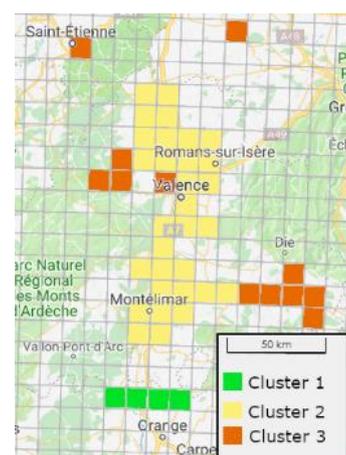


Figure 13: Localisation des mailles étudiées

## 1.5. Etude de l'évolution du risque moniliose

### 1.5.1. Analyse préliminaire

Un Indice de Risque Cumulé (IRC) est calculé pour chaque modèle et selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 par année, variété et maille (76 416 valeurs). L'IRC correspond à la somme des risques climatiques journaliers subis pendant la floraison. Le grand nombre de valeurs calculées rend les tests statistiques sensibles. Aussi, dans un premier temps, une analyse à partir des IRC moyens par cluster et époque est effectuée (3 clusters x 3 modèles x 3 époques x 4 variétés, pour deux scénarios = 180 valeurs).

La distribution des IRC étant non paramétrique (cf. courbe en annexe 5), cette première analyse est conduite en utilisant un test de Duncan. L'objectif de ce test est de déterminer les facteurs (variété, époque, cluster) ayant un effet sur l'IRC pour chaque modèle et selon les deux scénarios. Une évolution due au changement climatique se traduirait donc par un effet époque (situation différente entre [1970 - 1999], [2020 - 2049] ou [2070 - 2099]).

### 1.5.2. Analyse détaillée

Une fois les facteurs pertinents sélectionnés par l'analyse préliminaire, une seconde analyse est conduite en utilisant la totalité des valeurs calculées (76 416 valeurs) pour plus de précision. Étant donné le grand nombre de valeurs, cette nouvelle analyse est conduite avec un seuil plus sévère (test de Duncan suivi d'un test de Kruskal-Wallis,  $\alpha = 0,01$ ).

## 2. Résultats et discussion

### 2.1. Evolution la date de floraison

L'évolution de la date de floraison de chaque variété est représentée dans les graphiques ci-dessous (Fig. 14, scénario RCP 8.5).



Figure 14: Evolution de la date de floraison par variété et cluster pour le scénario RCP8.5

On observe un avancement général de la date de floraison. Pour le scénario RCP 8.5, la date de floraison médiane passe en effet de 89,9 jours juliens (31 mars) en 1951 à 61,5 jours juliens (1<sup>er</sup> mars) en 2100. La même tendance se retrouve déjà pour le scénario RCP4.5 avec un avancement de la date de floraison à 72,2 jours juliens en 2100 (12 mars). De plus, quel que soit le scénario, la variété Bergeron connaît un fort avancement de sa date de floraison qui avance d'environ 50 jours pour les trois clusters. Alors que sa date de floraison est statistiquement différente de celle des autres variétés dans le passé, cette différence ne se retrouve plus dans le futur lointain pour le scénario RCP4.5 qu'entre Bergeron et Rouge du Roussillon (la plus précoce) (anova à un facteur puis test HSD de Tukey). Pour le scénario RCP8.5, aucune différence significative de date de floraison n'est décelable entre variétés en 2075-2100.

On observe donc un avancement et un regroupement des dates de floraisons dû au changement climatique pour les variétés étudiées ici. Ce regroupement est conduit par la variété Bergeron. Le fort décalage de floraison de cette variété peut s'expliquer par des besoins en chaud plus rapidement satisfaits (cf. courbes *Smoothed Utah* disponibles en annexe 4).

En conséquence de cette convergence des dates de floraisons, on peut espérer observer une convergence des conditions climatiques durant la floraison.

## 2.2. Evolution des conditions climatiques durant la floraison

### 2.2.1. Evolution du cumul de pluies et de la température durant la floraison

L'évolution de la température durant la période de floraison dépend des clusters. Il est à noter que les précipitations connaissent de fortes variabilités interannuelles. Cette variable est plus incertaine dans ses prédictions que la température.

On observe effectivement une convergence des conditions climatiques durant la floraison. Les tendances observées pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sont les mêmes et un point de convergence peut être estimé en prenant la moyenne des coordonnées des points représentant la situation 2070-2099.

Les coordonnées de ce point de convergence sont 9,83°C et 52,01 mm de pluie pour le scénario RCP4.5 et 10,07°C et 47,21 mm de pluie pour le scénario RCP8.5.

Les variétés Bergeron et Bergarouge connaissent de grandes variations des conditions climatiques pendant la floraison. Ainsi, dans le cas du scénario RCP8.5, Bergarouge pourrait recevoir 20 mm de pluie en moins quel que soit le cluster et gagner jusqu'à 2°C. Bergeron connaîtrait un refroidissement des températures pendant la floraison dû à la forte avancée de sa date de floraison.

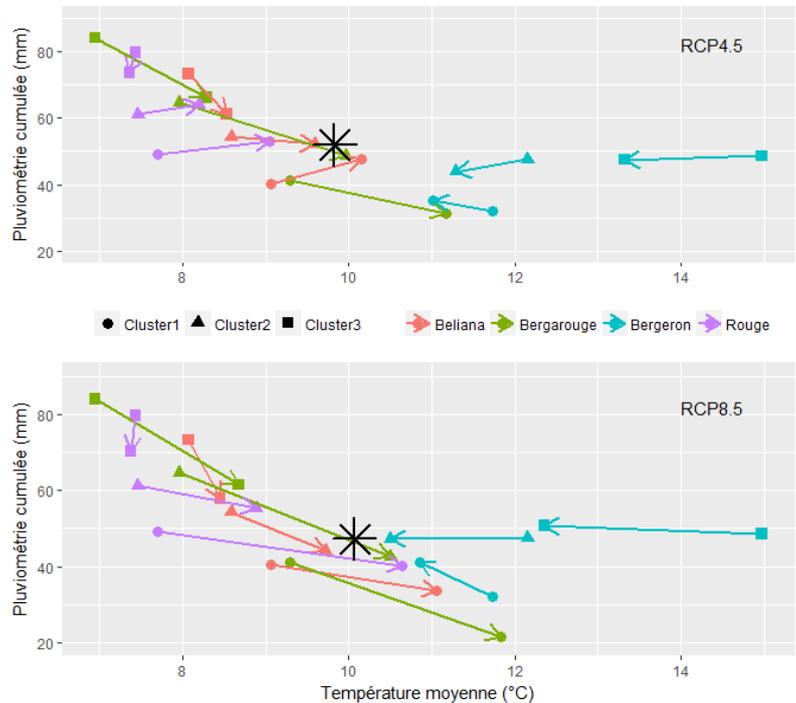


Figure 15 : Evolution des conditions climatiques pendant la floraison.

*Début de flèche = situation en [1970-1999]*

*Fin de flèche = situation en [2070-2099]*

*Étoile = barycentre des conditions en en [2070-2099]*

*≈ Point de convergence*

### 2.2.2. Evolution du nombre de jours de pluie durant la floraison

Etant donné que les risques calculés sont des risques cumulés, il est intéressant d'étudier l'évolution du nombre de jours de pluie durant la floraison. En effet, l'étude des dégâts sur rameaux pour le réseau nous a confirmé que pour une même pluviométrie cumulée, de nombreuses pluies faibles n'ont pas les mêmes conséquences qu'une unique pluie forte (cf. Partie II). L'étude du nombre de jours de pluies nous permettra donc de nuancer le cumul de pluies. Ci-dessous le nombre de jours de pluie pendant la floraison par variété et cluster dans l'éventualité du scénario RCP8.5 :

L'observation de l'évolution du nombre de jours de pluie nous permet de confirmer et nuancer des résultats observés précédemment. Bergarouge et Bergeron connaissent une évolution importante des conditions climatiques pendant la floraison. En particulier, le nombre de jours de pluie augmente pour Bergeron, dans le cluster 3, et dans une moindre mesure dans le cluster 1. Néanmoins, l'évolution du nombre de jours de pluies subi par Bergeron semble plus importante que l'évolution du cumul de pluie (cf. graphe précédent). Il semblerait donc que Bergeron, en conséquence de l'avancée de sa floraison, connaisse des pluies cumulées plus importantes dans le cluster 1 et plus nombreuses dans les clusters 1 et 3 avec le changement climatique. Concernant Bergarouge, en revanche, on observe une diminution du nombre de jours de pluies allant de 5 jours pour le cluster 1 à 10 jours pour le cluster 3.

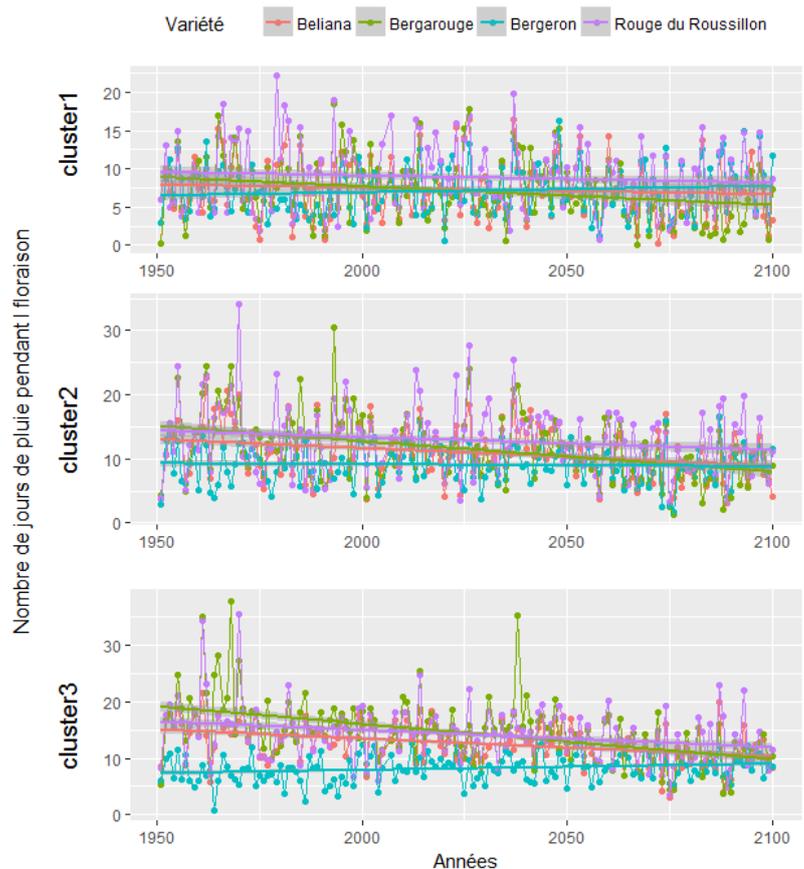


Figure 16 : Evolution du nombre de jours de pluie pendant la floraison par variété et cluster pour le scénario RCP8.5

## 2.3. Evolution du risque de moniliose

### 2.3.1. Analyse préliminaire

Le test de Duncan conduit lors de l'analyse préliminaire nous informe de l'existence d'un effet cluster et d'un effet variété. L'analyse détaillée sera donc conduite par cluster et variété.

Concernant l'effet époque, les résultats diffèrent selon le scénario et le modèle étudié. Ainsi, à l'issu du test les p-values obtenues sont 0.75 (Tamm), 0.38 (LM) et 0.90 (Magarey) pour le scénario RCP4.5. Formulé autrement, cela signifie qu'il y a 25% de chance que le changement climatique ait un effet sur le risque moniliose calculé avec Tamm dans l'éventualité du scénario RCP4.5. Le modèle LM semble montrer un certain effet époque (62% de chance que le changement climatique ai un effet sur le risque moniliose), néanmoins les deux autres modèles ne montrent pas d'effet. Il semble donc que dans la perspective du scénario RCP4.5, le changement climatique aurait peu d'effet sur le risque moniliose. Ce scénario ne sera donc pas étudié plus en détail.

En revanche, pour le scénario RCP8.5, les p-values obtenues sont 0.08 (Tamm), 0.42 (LM) et 0.12 (Magarey). Les tendances indiquées par cette première étude pour le scénario RCP8.5 nous invitent à l'étudier plus précisément.

### 2.3.2. Analyse détaillée de l'évolution des IRC pour le scénario RCP8.5

L'évolution de l'indice de risque cumulé calculé par Tamm pour les différents clusters et variétés est représentée dans le graphique ci-contre.

On observe que les évolutions d'IRC semblent accentuées en altitude (cluster 3) avec plus de différences significatives entre différentes époques pour chaque variété.

Le cluster 1 semble connaître des variations plus importantes au sein d'une même époque, dues à des variations inter annuelles plus importantes avec le changement climatique.

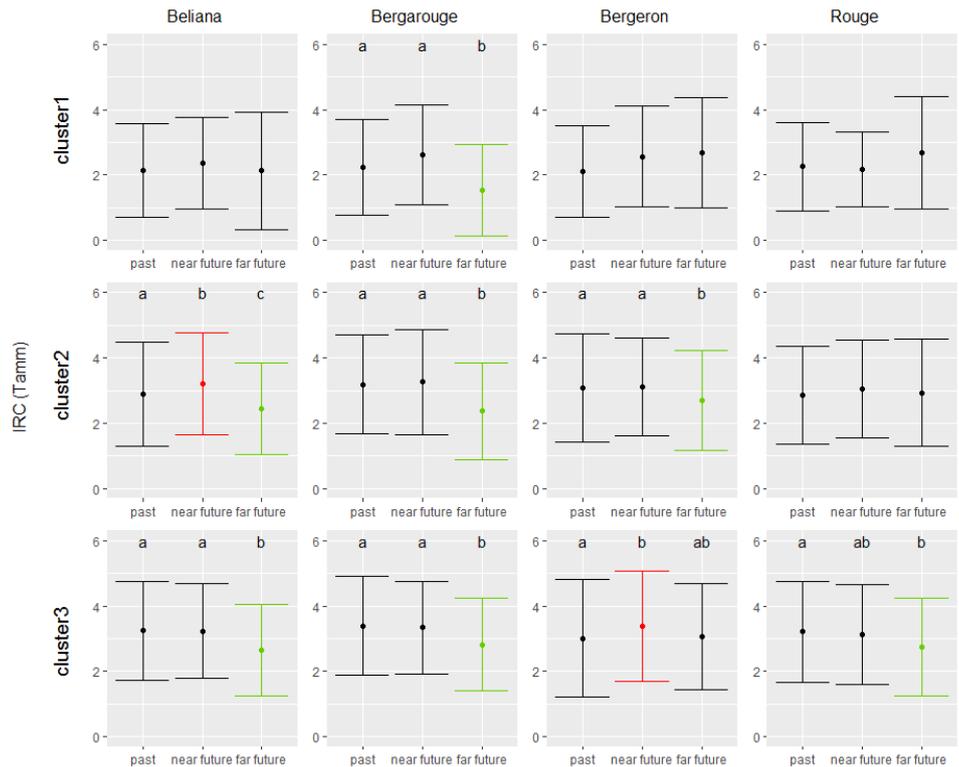


Figure 17: IRC moyen  $\pm$  un écart-type (calculé par Tamm).

Rouge = augmentation significative du risque.

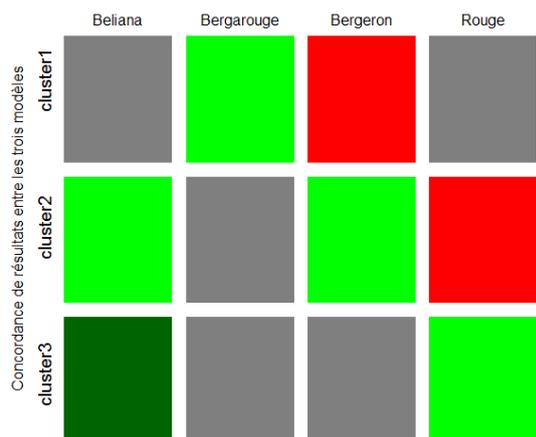
Vert = diminution significative du risque

Les variations d'IRC moyen (calculés par Tamm) entre [1975-1999] et [2075-2099] sont comprises entre +27% (Bergeron cluster 1) et -31% (Bergarouge cluster 1).

Afin de raffiner les prédictions faites ici par le modèle Tamm quant à l'évolution du risque monilieuse, il est intéressant de comparer ces résultats avec les prédictions des autres modèles. Si plusieurs modèles s'accordent, cela donne plus de confiance dans la prédiction.

### 2.3.3. Divergences de prédictions des modèles

Les prédictions des trois modèles en tendances d'évolution du risque monilieuse sont comparées entre elles. Sur le panneau suivant sont représentés les couples variété/cluster pour lesquels les prédictions des trois modèles s'accordent sur une diminution du risque (même non significative, en vert) ou une augmentation du risque (même non significative, en rouge). Les prédictions pour Beliana-Cluster 3 s'accordent sur une diminution mais également sur le fait que cette diminution soit significative (vert foncé).



En comparant les modèles deux à deux, on obtient les résultats suivants :

- Magarey/LM : 7 prédictions concordantes sur 12 dont 1 également sur la significativité
- Tamm/Magarey : 10 prédictions concordantes sur 12 dont 6 également sur la significativité
- Tamm/LM : 9 prédictions concordantes sur 12 dont 3 également sur la significativité

Figure 18: Concordance de prédiction des trois modèles (vert : concordance des 3 modèles à la diminution, rouge : concordance des 3 modèles à l'augmentation, couleur foncée : concordance également sur les niveaux de significativité)

### 2.3.4. Divergence Tamm-LM

Tamm et LM retournent tous deux l'incidence en pourcentage. Lors de l'étude du risque sur rameaux, les prédictions des deux modèles étaient très similaires (cf. Partie II 2.2). Cette similarité ne se retrouve pas lors de la modélisation dans le cadre du changement climatique. Les prédictions de LM sont significativement plus élevées que celles de Tamm (test de Wilcoxon :  $p\text{-value} = 2.10^{-16}$ ) avec une moyenne d'IRC de 4,11 pour LM contre 2,7 pour Tamm. Cette différence s'observe également sur la figure de distribution des IRC en annexe 5. Un décalage de la fenêtre pluviométrie-température durant la floraison avec le changement climatique peut être à l'origine de cette divergence. Lors de l'étude du risque sur rameaux, les modèles étaient utilisés dans des conditions climatiques proches de leurs conditions de calibration. Or, comme il a été vu précédemment, une diminution des pluies (en cumul et en nombre d'épisodes, hormis pour la variété Bergeron dans certains clusters) et un réchauffement sont attendus dans le futur lors de la floraison.

La différence entre les prédictions des deux modèles en fonction de la pluviométrie et la température est représentée ci-dessous (Fig. 19).

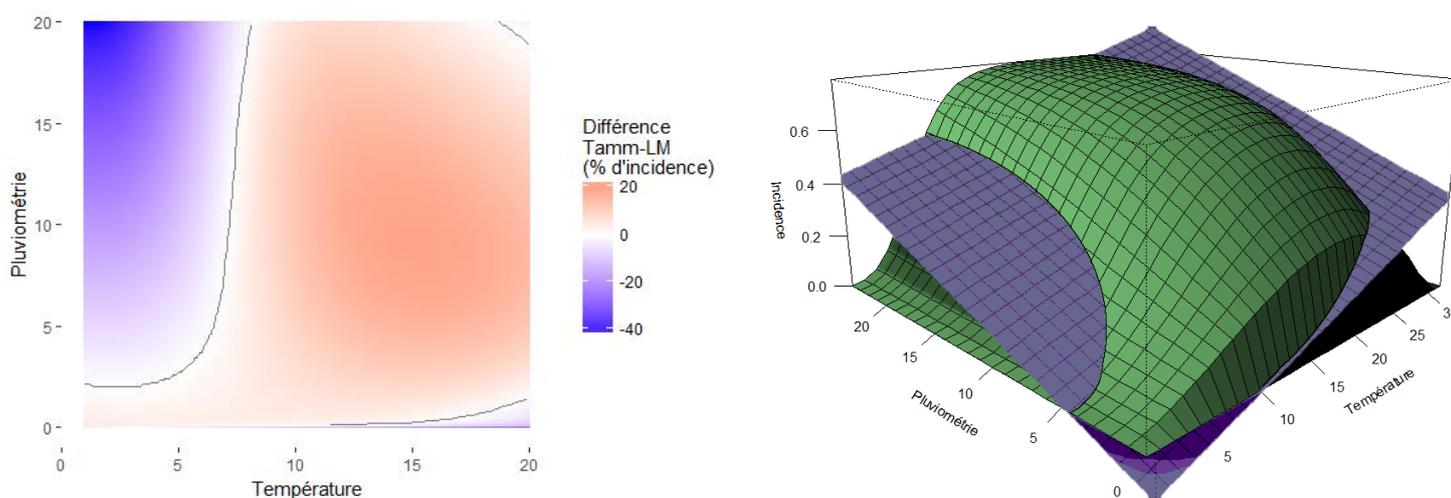


Figure 19: différences de prédiction entre Tamm et LM en fonction de la pluviométrie et la température. A gauche : Bleu = LM au-dessus, rouge = Tamm au-dessus. La ligne représente l'intersection des deux surfaces de réponse. A droite : représentation en 3D.

Les plus grandes différences entre Tamm et LM sont observables dans deux régions particulièrement : pluviométrie forte-température faible et pluviométrie nulle-température forte. Etant donnée l'évolution du climat pendant la floraison, il est plus probable que la discordance entre les deux modèles provienne de la façon de traiter les pluviométries nulles. En effet, LM a été construit sans a priori biologique. Aucun point à forte température et pluviométrie nulle n'ayant été observé, rien ne force le modèle linéaire à retourner des valeurs faibles en l'absence de pluie. Ainsi, si durant la floraison des températures de 15°C sans pluies sont observées, LM retourne une incidence de 22% alors que Tamm retourne 0% par construction. Nos connaissances sur la biologie du champignon nous invitent donc à préférer les prédictions de Tamm dans le cadre du changement climatique.

Ainsi, alors que Magarey était le modèle divergent lors de l'étude sur rameaux, il semble que dans l'étude des conséquences du changement climatique, les deux modèles construits avec a priori biologique (Tamm et Magarey) soient plus en accord. Les deux modèles montrent une bonne concordance sur les différentes prévisions mais également des distributions de probabilité cohérentes entre elles malgré la différence d'unité de mesure.

### 2.3.5. Evolution du risque de moniliose

L'évolution du risque moniliose dépend de l'évolution de la date de floraison et dépend donc grandement de la variété et de la zone géographique (ici les clusters) étudiées. Les prédictions dépendent également du modèle choisi. Les considérations biologiques exposées dans la partie précédente nous invitent à privilégier les modèles Tamm et Magarey. En se cantonnant aux couples variété-cluster pour lesquels les prédictions des deux modèles s'accordent, il est déjà possible de souligner plusieurs points :

La variété Bergarouge connaît un fort déplacement de sa date de floraison, vers des conditions climatiques moins pluvieuses, ce qui amène à une diminution significative du risque climatique pour cette variété.

La variété Bergeron au contraire connaît une grande avancée de sa date de floraison, conduisant la floraison vers des conditions plus hivernales et surtout plus pluvieuses. Une augmentation du risque moniliose pour cette variété est donc possible.

Les évolutions de la date de floraison et du risque moniliose sont plus drastiques pour les clusters 2 et 3. En effet, les conséquences du changement climatique sont accentuées en altitude. Le cluster 1 en revanche montre une plus grande variabilité dans les prédictions. Ceci peut être dû au plus petit nombre de mailles constituant le cluster.

# Discussion générale

## 1. Hypothèses des modèles climatiques

Seul l'effet des variables climatiques sur le développement de *Monilinia* a été étudié ici. La variation de la quantité d'inoculum à grande échelle n'a pas été prise en compte. Le suivi de la quantité de conidies dans l'air pendant l'expérimentation en pots pièges nous invite à penser que les variations d'inoculum à l'échelle de la parcelle sont faibles. Les séries de témoins au champ complètent le raisonnement et indiquent que les variations d'inoculum doivent être prises en compte à l'échelle du paysage voire à l'échelle régionale. Des études ont déjà montré l'importance de la provenance des masses d'air dans la dispersion de *Botrytis cinerea* et des transports d'inoculum sur de grandes distances (Leyronas, Nicot 2013). Les deux champignons sont de la famille des sclérotiniacées et ont des mécanismes de dispersion et d'infection comparables. Les résultats sur *Botrytis* peuvent donc inspirer des recherches analogues sur *Monilinia*.

## 2. Effets physiologiques et génétique de sensibilité de l'arbre

Le changement climatique affecte directement le développement de *Monilinia* mais aura aussi possiblement des effets indirects sur la phénologie et la physiologie de l'arbre. Par exemple, des effets indirects de stress hydrique peuvent affaiblir l'arbre. De même, les différentes sensibilités génétiques des variétés à la maladie ne sont pas étudiées ici. Des recherches sont actuellement menées à l'INRA sur la résistance variétale des abricotiers à la moniliose. Une meilleure connaissance des facteurs climatiques ayant un effet dans le développement des monilioses pourra aider à mieux isoler les facteurs génétiques de résistance variétale (Jean Marc Audergon, communication personnelle). Les deux axes de recherche se complètent mutuellement.

## 3. Validité des modèles en dehors des conditions de calibration

Il est important de ne pas s'arrêter à la calibration des modèles mais également de vérifier leur robustesse en les testant sur des données indépendantes (Jeschke, Strayer 2008). Ici, le test des modèles est effectué indirectement mais sur des données indépendantes des données de calibration. Les conditions de test des modèles sont relativement proches des conditions de calibration. Aussi, si cela confirme l'utilité des modèles dans les conditions climatiques actuelles, la validité des modèles pour des températures plus élevées n'a pas été éprouvée. Afin de vérifier la robustesse des modèles, des tests en conditions contrôlées ou semi-contrôlées (au champ mais protégé de certaines pluies par exemple) ou dans des régions connaissant d'autres gammes de conditions climatiques (Occitanie par exemple) pourraient être conduites.

## 4. Résultat émergent : pluies de fin de floraison

L'analyse des dégâts sur rameaux nous apprend la dangerosité des pluies de fin de floraison. Cette observation est confirmée par une expérience menée en 2014 à Gotheron (Dulais 2014). Un verger d'abricotier (variété Bergarouge) n'ayant subi aucune pluie durant la floraison sauf à la toute fin de floraison a connu d'importants dégâts sur fleur et rameaux. La prise en compte de ce phénomène peut améliorer les performances des modèles épidémiologiques sur fleur à décrire les

dégâts sur rameaux. On peut par exemple imaginer une pondération du stade G ou un indice de pondération croissant en fonction du temps.

## 5. Incertitude des données avec le changement climatique

Une forte incertitude dans les prévisions faites ici réside dans l'incertitude sur les données climatiques elles-mêmes. Les précipitations sont le facteur le plus important dans la prévision du développement de *Monilinia*. C'est en revanche une variable climatique dont la prévision est complexe, y compris à court terme (Jouzel *et al.* 2014). La plus grande incertitude quant aux prévisions fournies ici provient certainement de cette variable. De plus, de nombreuses incertitudes d'ordre socio-politiques entrent en jeu dans la construction des scénarios RCP (Pachauri *et al.* 2014).

## Conclusion

Ainsi, l'expérimentation en pots pièges réalisée ici permet de calibrer des modèles épidémiologiques décrivant le développement des monilioses sur fleur d'abricotiers en fonction des conditions climatiques. Couplés à un modèle phénologique, ces modèles nous permettent d'estimer les conséquences du changement climatique sur le développement des monilioses sur fleur d'abricotiers. Les dégâts sur rameaux sont liés aux dégâts sur fleurs et une pondération adéquate des modèles épidémiologiques sur fleur peut permettre une extrapolation correcte aux dégâts sur rameaux.

Les conséquences du changement climatique sur le développement de monilioses seront diverses selon la zone géographique et la variété concernée. Ainsi, la variété Bergarouge pourrait connaître une diminution du risque de moniliose par un décalage de sa date de floraison. La variété Bergeron en revanche pourrait connaître une augmentation du risque de moniliose dû à une forte avancée de sa date de floraison.

De nombreuses incertitudes règnent autour de ces prédictions. Le calcul de la répartition des pluies à long terme est difficile, l'évolution du climat est dépendante de nombreux facteurs et le développement des monilioses n'est pas conduit que par le climat. Néanmoins, Les tendances calculées par les différents modèles sont utiles à prendre en compte dans la gestion du risque moniliose à long terme.

À court terme, les modèles calibrés lors de cette étude peuvent être un outil d'aide à la décision permettant aux arboriculteurs de raisonner leurs traitements fongicides en fonction des prévisions météorologiques. Un traitement par faible pluie pourrait alors ne pas se justifier ou être conduit à dose réduite. L'utilisation de ces modèles pourra donc permettre un raisonnement et une diminution des traitements fongicides sur abricotiers.

# Bibliographie

- Agreste - Abricot, 2017. [en ligne]. Agreste. Disponible à l'adresse : [http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/2017\\_114ifnforapabricot.pdf](http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/2017_114ifnforapabricot.pdf)
- AGRESTE, 2014. *Enquête paratiques phytosanitaires en arboriculture 2012* [en ligne]. décembre 2014. Disponible à l'adresse : [http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/dossier22\\_integral.pdf](http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/dossier22_integral.pdf)
- AGRIOS, George, 2005. *Plant Pathology*. 5th Edition. ELSEVIER. ISBN 978-0-12-044565-3.
- ANDREINI, Lucia, DE CORTÁZAR-ATAURI, Inaki García, CHUINE, Isabelle, VITI, Raffaella, BARTOLINI, Susanna, RUIZ, David, CAMPOY, José Antonio, LEGAVE, Jean Michel, AUDERGON, Jean-Marc et BERTUZZI, Patrick, 2014. Understanding dormancy release in apricot flower buds (*Prunus armeniaca* L.) using several process-based phenological models. *Agricultural and Forest Meteorology*. janvier 2014. Vol. 184, pp. 210-219. DOI 10.1016/j.agrformet.2013.10.005.
- BAGGIOLINI, M., 1952. Les stades repères de l'abricotier. *Revue romande d'Agriculture et d'arboriculture*. 1952. Vol. 8, n° 4, pp. 28.
- BARBETTI, Martin J., BANGA, Surinder S. et SALISBURY, Phillip A., 2012. Challenges for crop production and management from pathogen biodiversity and diseases under current and future climate scenarios – Case study with oilseed Brassicas. *Field Crops Research*. février 2012. Vol. 127, pp. 225-240. DOI 10.1016/j.fcr.2011.11.021.
- BEBBER, Daniel P., RAMOTOWSKI, Mark A. T. et GURR, Sarah J., 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Climate Change*. novembre 2013. Vol. 3, n° 11, pp. 985-988. DOI 10.1038/nclimate1990.
- BEBBER, Daniel Patrick, 2015. Range-Expanding Pests and Pathogens in a Warming World. *Annual Review of Phytopathology*. 4 août 2015. Vol. 53, n° 1, pp. 335-356. DOI 10.1146/annurev-phyto-080614-120207.
- BONHOMME, M., RAGEAU, R. et LACOINTE, A., 2010. Optimization of endodormancy release models, using series of endodormancy release data collected in France. *Acta Horti*. 2010. Vol. 872, pp. 51-60.
- CASALS, C., VIÑAS, I., TORRES, R., GRIERA, C. et USALL, J., 2010. Effect of temperature and water activity on in vitro germination of *Monilinia* spp.: Effect of temperature and water activity on *Monilinia* spp. *Journal of Applied Microbiology*. janvier 2010. Vol. 108, n° 1, pp. 47-54. DOI 10.1111/j.1365-2672.2009.04402.x.
- CHAKRABORTY, S. et NEWTON, A. C., 2011. Climate change, plant diseases and food security: an overview: Climate change and food security. *Plant Pathology*. février 2011. Vol. 60, n° 1, pp. 2-14. DOI 10.1111/j.1365-3059.2010.02411.x.
- CHUINE, Isabelle, GARCIA DE CORTAZAR-ATAURI, Iñaki, KRAMER, k. et HÄNNINEN, H., 2013. Plant Development Models. In : *Phenology : An Integrative Environmental Science*. Schwarz MD. Dordrechts, Netherlands : Springer. pp. 275-293.
- DAM, Doriane, 2017. *Identification des facteurs intervenant dans le développement du Monilia sur fleurs et rameaux d'abricotiers et recherche de résistances génétiques*. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires.
- DULAIS, Margot, 2014. *Développement des monilioses sur fleurs d'abricotiers. Evaluation de l'efficacité d'une nouvelle méthode de protection physique et recherche des résistances génétiques*. VetAgro Sup.
- FABRE, Anne-Lise, BLOESCH, Bernard et VIRET, Olivier, [sans date]. *Stades phénologiques repères de l'abricotier* [en ligne]. Agroscope. [Consulté le 13 juillet 2018]. Disponible à l'adresse : [http://www.agrometeo.ch/sites/default/files/documents/stade\\_pheno\\_abricotier-fr\\_low\\_ecran.pdf](http://www.agrometeo.ch/sites/default/files/documents/stade_pheno_abricotier-fr_low_ecran.pdf)
- FAOSTAT, 2017. [en ligne]. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. [Consulté le 23 avril 2018]. Disponible à l'adresse : <http://www.fao.org/faostat/en/#home>
- FISHER, Matthew C., HENK, Daniel A. et BRIGGS, Cheryl J., 2012. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature*. 2012. Vol. 484, n° 7393, pp. 18. DOI 10.1038/nature10947.
- GODEFROID, Martin, CRUAUD, Astrid, STREITO, Jean-Claude, RASPLUS, Jean-Yves et ROSSI, Jean-Pierre, 2018. Climate change and the potential distribution of *Xylella fastidiosa* in Europe. [en ligne]. 28 mars 2018. [Consulté le 13 juillet 2018]. DOI 10.1101/289876.

Disponible à l'adresse :

<http://biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/289876>

GUINET, Cécile, FOURRIER-JEANDEL, C., CERF-WENDLING, I. et IOOS, R., 2016. One-Step Detection of *Monilia fructicola*, *M. fructigena*, and *M. Laxa* on *Prunus* and *Malus* by a Multiplex Real-Time PCR Assay. *Plant Disease*. décembre 2016. Vol. 100, n° 12, pp. 2465-2474. DOI /10.1094/PDIS-05-16-0655-RE.

HARVELL, C. D., 2002. Climate Warming and Disease Risks for Terrestrial and Marine Biota. *Science*. 21 juin 2002. Vol. 296, n° 5576, pp. 2158-2162. DOI 10.1126/science.1063699.

HIRSCHI, M., STOECKLI, S., DUBROVSKY, M., SPIRIG, C., CALANCA, P., ROTACH, M. W., FISCHER, A. M., DUFFY, B. et SAMIETZ, J., 2012. Downscaling climate change scenarios for apple pest and disease modeling in Switzerland. *Earth System Dynamics*. 27 février 2012. Vol. 3, n° 1, pp. 33-47. DOI 10.5194/esd-3-33-2012.

HOVMØLLER, M. S., WALTER, S. et BAYLES, R. A., 2016. Replacement of the European wheat yellow rust population by new races from the centre of diversity in the near-Himalayan region. *Plant Pathology*. 2016. Vol. 65, pp. 402-411. DOI 10.1111/ppa.12433.

HRUSTIĆ, Jovana, MIHAJLOVIĆ, Milica, GRAHOVAC, Mila, DELIBAŠIĆ, Goran, BULAJIĆ, Aleksandra, KRSTIĆ, Branka et TANOVIĆ, Brankica, 2012. Genus *Monilinia* on pome and stone fruit species. *Pesticidi i fitomedicina*. 2012. Vol. 27, n° 4, pp. 283-297.

JESCHKE, Jonathan M. et STRAYER, David L., 2008. Usefulness of Bioclimatic Models for Studying Climate Change and Invasive Species. *Annals of the New York Academy of Sciences*. juin 2008. Vol. 1134, n° 1, pp. 1-24. DOI 10.1196/annals.1439.002.

JOUZEL, Jean, DÉQUÉ, M., JOUINI, M., PLANTON, S. et VAUTARD, R., 2014. 4: *Le climat de la France au XXI<sup>e</sup> siècle*. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

KOBALL, D. C., WILCOX, W. F. et SEEM, R. C., 1997. Influence of incubation-period humidity on the development of brown rot blossom blight of sour cherry. *Phytopathology*. 1997. Vol. 87, n° 1, pp. 42-49.

LANE, C. R., 2002. A synoptic key for differentiation of *Monilinia fructicola*, *M. fructigena* and *M. laxa*, based on examination of cultural characters. *EPPO Bulletin*. 2002. Vol. 32, n° 3, pp. 489-493.

LEYRONAS, Christel et NICOT, P.C., 2013. Monitoring viable airborne inoculum of *Botrytis cinerea* in the

South-East of France over 3 years: relation with climatic parameters and the origin of air masses. *Aerobiologia*. 2013. Vol. 29, n° 291. DOI <https://doi.org/10.1007/s10453-012-9280-0>.

LICHOU, J. et JAY, M., 2012. *Monographie abricot*. CTIFL. ISBN 978-2-87911-311-1.

LUO, Y., MORGAN, D. P. et MICHAILIDES, T. J., 2001. Risk analysis of brown rot blossom blight of prune caused by *Monilinia fructicola*. *Phytopathology*. 2001. Vol. 91, n° 8, pp. 759-768.

MAGAREY, R. D., SUTTON, T. B. et THAYER, C. L., 2005. A Simple Generic Infection Model for Foliar Fungal Plant Pathogens. *Phytopathology*. janvier 2005. Vol. 95, n° 1, pp. 92-100. DOI 10.1094/PHYTO-95-0092.

MARIETTE, Nicolas, ANDRODIAS, Annabelle, MABON, Romain, CORBIÈRE, Roselyne, MARQUER, Bruno, MONTARRY, Josselin et ANDRIVON, Didier, 2016.

MOSS, Richard H., EDMONDS, Jae A., HIBBARD, Kathy A., MANNING, Martin R., ROSE, Steven K., VAN VUUREN, Detlef P., CARTER, Timothy R., EMORI, Seita, KAINUMA, Mikiko, KRAM, Tom, MEEHL, Gerald A., MITCHELL, John F. B., NAKICENOVIC, Nebojsa, RIAHI, Keywan, SMITH, Steven J., STOUFFER, Ronald J., THOMSON, Allison M., WEYANT, John P. et WILBANKS, Thomas J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 11 février 2010. Vol. 463, n° 7282, pp. 747-756. DOI 10.1038/nature08823.

OLIVEIRA LINO, Leandro, PACHECO, Igor, MERCIER, Vincent, FAORO, Franco, BASSI, Daniele, BORNARD, Isabelle et QUILOT-TURION, Bénédicte, 2016. Brown Rot Strikes *Prunus* Fruit: An Ancient Fight Almost Always Lost. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 25 mai 2016. Vol. 64, n° 20, pp. 4029-4047. DOI 10.1021/acs.jafc.6b00104.

PACHAURI, R. K., MEYER, L. et EQUIPE DE RÉDACTION PRINCIPALE, 2014. 5: *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genève : GIEC.

PACHAURI, Rajendra K., REISINGER, Andy et ÉQUIPE DE RÉDACTION PRINCIPALE, 2007. 4: *Changements Climatiques 2007 - Rapport de synthèse*. GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC,

Genève, Suisse : Groupe d'experts  
intergouvernemental sur l'évolution du climat.

PARVEAU, Claude-Éric, GOMEZ, C., MERCIER, Vincent,  
BRUN, Laurent, GUILLERMIN, A., CLAUZEL, Guy,  
BROQUAIRE, J-M. et AUDERGON, Jean-Marc, 2016.  
Guide des sensibilités variétales aux bio-agresseurs -  
Fiche n°3 : Monilioses sur fleur. *L'Arboriculture  
Fruitière*. 2016. N° 698 (supplément), pp. 5.

PAUTASSO, Marco, DÖRING, Thomas F., GARBELOTTO,  
Matteo, PELLIS, Lorenzo et JEGER, Mike J., 2012.  
Impacts of climate change on plant diseases—opinions  
and trends. *European Journal of Plant Pathology*. mai  
2012. Vol. 133, n° 1, pp. 295-313.  
DOI 10.1007/s10658-012-9936-1.

PENN STATE UNIVERSITY, MANN, Michael E.,  
SCHURER, Andrew, HAWKINS, Edward, TETT, Simon et  
HEGERL, Gabrielle, 2017. IMPORTANCE OF THE PRE-  
INDUSTRIAL BASELINE IN DETERMINING THE  
LIKELIHOOD OF EXCEEDING THE PARIS LIMITS. In :  
[en ligne]. 2017. [Consulté le 11 juillet 2018].  
Disponible à l'adresse :  
<https://gsa.confex.com/gsa/2017AM/webprogram/Paper300017.html>

RICHARDSON, E.A., SEELEY, S.D. et WALKER, D.R.,  
1974. A model for estimating the completion of rest  
for Redhaven and Elberta Peach trees. *Hortscience*.  
1974. Vol. 9, pp. 331-32.

RUNGJINDAMAI, Nattawut, JEFFRIES, Peter et XU,  
Xiang-Ming, 2014. Epidemiology and management of  
brown rot on stone fruit caused by *Monilinia laxa*.  
*European Journal of Plant Pathology*. septembre 2014.  
Vol. 140, n° 1, pp. 1-17. DOI 10.1007/s10658-014-  
0452-3.

SAUDREAU, Marc, PINCEBOURDE, Sylvain, DASSOT,  
Mathieu, ADAM, Boris, LOXDALE, Hugh D. et BIRON,  
David G., 2013. On the canopy structure manipulation  
to buffer climate change effects on insect herbivore  
development. *Trees*. février 2013. Vol. 27, n° 1,  
pp. 239-248. DOI 10.1007/s00468-012-0791-7.

STOECKLI, Sibylle, HIRSCHI, Martin, SPIRIG, Christoph,  
CALANCA, Pierluigi, ROTACH, Mathias W. et SAMIETZ,  
Jörg, 2012. Impact of Climate Change on Voltinism and  
Prospective Diapause Induction of a Global Pest Insect  
– *Cydia pomonella* (L.). *PLoS ONE*. 23 avril 2012. Vol. 7,  
n° 4, pp. e35723. DOI 10.1371/journal.pone.0035723.

TAMM, L., MINDER, Chr E. et FLÜCKIGER, W., 1995.  
Phenological analysis of brown rot blossom blight of  
sweet cherry caused by *Monilinia laxa*.  
*Phytopathology*. 1995. Vol. 85, n° 4, pp. 401–408.

TYLIANAKIS, Jason M, DIDHAM, K, BASCOMPTE, Jordi  
et WARDLE, David A, 2008. Global change and species  
interactions in terrestrial ecosystems. . 2008. pp. 13.

# Annexes

## Annexe 1 : Description des stades phénologiques de floraison de l'abricotier

### Stades phénologiques repères de l'abricotier

Auteurs: Anne-Lise Fabre, Bernard Bloesch et Olivier Viret, Agroscope, 1260 Nyon

0	5	6	7	8
Repos hivernal	Apparition de l'inflorescence	Floraison	Développement des fruits	Maturation des fruits
<p><b>Bourgeon d'hiver (dormance)</b> 00 (A)</p> 	<p><b>Gonflement des bourgeons</b> 51 (B)</p> 	<p><b>Début floraison</b> 61</p> 	<p><b>Nouaison</b> 71 (H)</p> 	<p><b>Début coloration</b> 81</p> 
<p><b>Eclatement des bourgeons</b> 53 (C)</p> 	<p><b>Plaine floraison</b> 65 (F)</p> 	<p><b>Jeune fruit</b> 73 (I-J)</p> 	<p><b>Coloration avancée</b> 85</p> 	
<p><b>Ouverture des sépales</b> 57 (D)</p> 	<p><b>Floraison déclinante</b> 67 (G)</p> 	<p><b>Croissance des fruits (50%)</b> 75</p> 	<p><b>Récolte maturité gustative</b> 87-89</p> 	
<p><b>Ballonnets</b> 59 (E)</p> 	<p><b>Fin floraison</b> 69</p> 	<p><b>Croissance des fruits (70%)</b> 77</p> 		

**Stades**

0 = Repos hivernal  
5 = Apparition des inflorescences  
6 = Floraison  
7 = Développement des fruits  
8 = Maturation des fruits

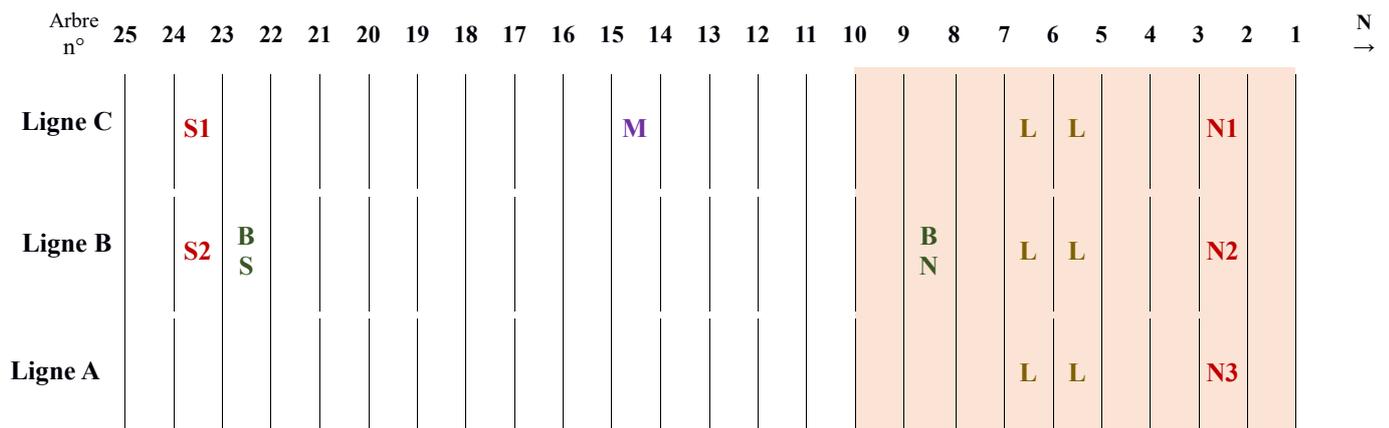
Code BBCH	Code Baggiolini
00	(A)
51 → 59	(B → E)
61 → 69	(F → G)
71 → 77	(H → J)
81 → 89	

**Sources**

- Baggiolini M., 1952. Les stades repères de l'abricotier. *Revue romande d'Agriculture et d'Arboriculture* 8 (4), 28.
- Lancashire P. D., Bleiholder H., Van Den Boom T., Langelöddeke P., Stauss R., Weber E. & Witzingerberger A., 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. appl. Biol.* 119, 561-601.
- Hack H., Bleiholder H., Buhr L., Meier U., Schnock-Fricke U., Weber E. & Witzingerberger A., 1992. Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. - Erweiterte BBCH-Skala. *Allgemein. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutz* 44 (12), 265-270.

Photographies: Carole Parodi

## Annexe 2 : plan d'organisation de la parcelle :



BN = Burkard Nord

M = station météorologique

N1, N2, N3, S1, S2 =  
position des arbres

BS = Burkard Sud

L = lame vaselinée

= Zone dans laquelle les momies ont été accrochées

**Annexe 3** : Nombres de fleurs symptomatiques et asymptomatiques par stade et série de pots.

Série	Stade C		Stade D		Stade E		Stade F	
	asymptomatique	symptomatique	asymptomatique	symptomatique	asymptomatique	symptomatique	asymptomatique	Symptomatique
<b>18A</b>	76	0	79	2	43	5	303	9
<b>18B</b>	31	0	40	0	15	1	119	37
<b>18C</b>	7	0	30	0	19	2	158	173
<b>18D</b>	26	0	68	0	25	0	381	18
<b>18E</b>	11	0	24	10	15	7	83	393
<b>18F</b>	18	0	53	0	4	1	300	107
<b>18G</b>	27	0	49	0	18	0	470	6
<b>18H</b>	0	0	0	0	0	0	258	75
<b>18I</b>	0	0	0	0	0	0	148	35
<b>somme</b>	196	<b>0</b>	343	<b>12</b>	139	<b>16</b>	2220	<b>853</b>
<b>Total</b>	<b>196</b>		<b>355</b>		<b>155</b>		<b>3073</b>	
TC1							61	22
TC2							75	11

**Annexe 4** : Équations des modèles.

$T_{min}$ ,  $T_{opt}$  et  $T_{max}$  représentent respectivement les températures minimale, optimale et maximale de développement du champignon (développement mycélien).  $T$  désigne la température,  $WD$  (pour Wetness Duration) l'humectation et  $p$  la pluviométrie.

**Tamm**

Le modèle proposé par Tamm *et al.* 1995 est le suivant :

$$I(WD, T) = i_{max} * \{1 - (1 - i_0(T)^{(1-m)}) * e^{-r(T)*WD}\}^{\frac{1}{1-m}}$$

Où  $i_0(T) = \gamma_1 * \phi^{\gamma_2} * (1 - \phi)$  et  $r(T) = \rho_1 * \phi^{\rho_2} * (1 - \phi)$

Avec  $\phi = \frac{(T - T_{min})}{(T_{max} - T_{min})}$

$i_{max}$  correspond à l'incidence maximale possible. Le paramètre  $m$  est fixé constant à 0,9. Les paramètres  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ , sont optimisés durant la calibration du modèle.

Nous avons utilisé une version modifiée d'équation :

$$I(p, T) = \frac{p}{p + \varepsilon} * i_{\max} * \{1 - (1 - i_0(T)^{(1-m)}) * e^{-r(T)*p}\}^{\frac{1}{1-m}}$$

### Magarey (Magarey, 2005)

$$W(T) = \frac{W_{\min}}{f(T)} \leq W_{\max} \quad f(T) = \left(\frac{T_{\max}-T}{T_{\max}-T_{opt}}\right) \left(\frac{T-T_{\min}}{T_{opt}-T_{mi}}\right)^{(T_{opt}-T_{\min})/(T_{\max}-T_{opt})}$$

$W_{\min}$  représente le besoin minimal en humectation et  $W_{\max}$  la limite supérieure de  $W(T)$ .

Si une pour une humectation  $WD$  on a  $WD < W(T)$ , alors le risque est inférieur à 20%. Si  $WD > W(T)$ , alors le risque est supérieur à 20%

Nous avons calibré et utilisé ce modèle en entrant la pluviométrie en millimètres au lieu de l'humectation. L'expression de la fonction n'a pas été modifiée.

### Modèle linéaire (LM)

$$I(p, T) = a_{pluvio}p + a_{temp}T + b$$

Où  $a_{pluvio}$  est le coefficient directeur associé à la pluviométrie,  $a_{temp}$  le coefficient directeur associé à la température et  $b$  l'ordonnée à l'origine.

### Modèle phénologique (Andreini *et al.*, 2014)

Le modèle dispose d'un compteur de jours  $S_c$ . Un seuil  $C$  définit doit être atteint pour déclencher la sortie de dormance (Dormancy Release Date =  $DRD$ ):

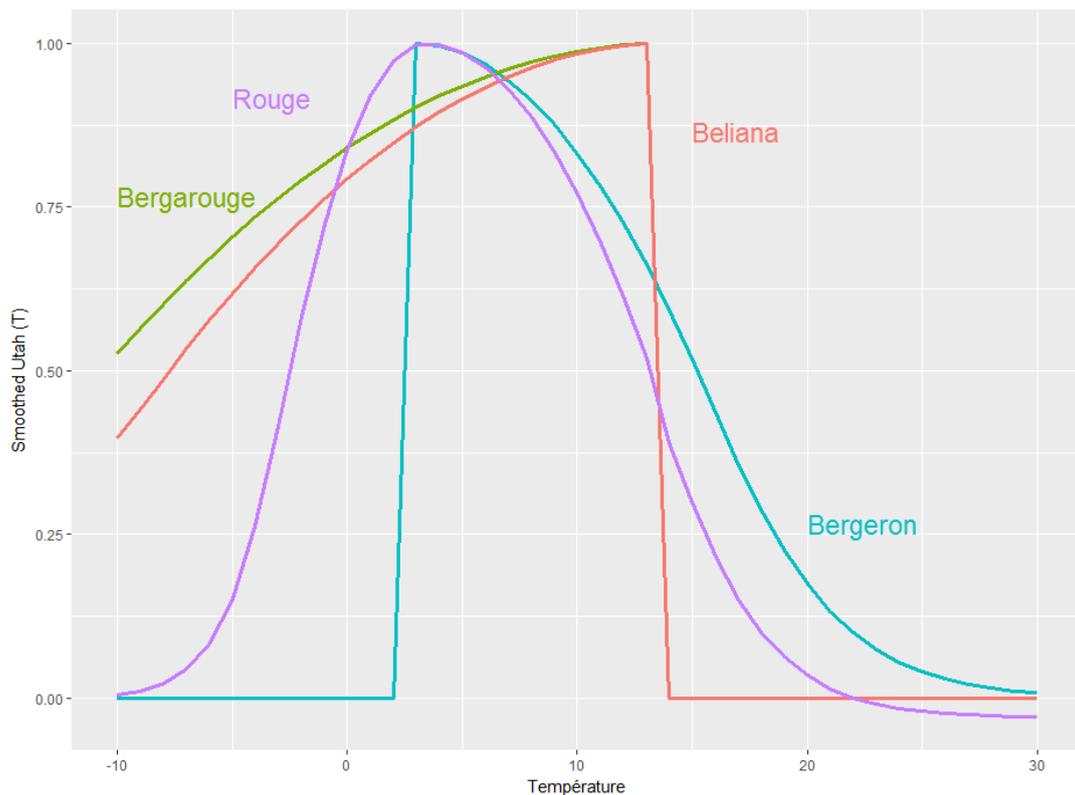
$$S_c = \sum_{t_0}^{DRD} R_c \geq C$$

Les valeurs  $R_c$  attribuées à chaque jour sont ici données par la fonction *Smoothed Utah* en fonction de la température journalière  $Td$ :

$$R_c(T_d) = SU(T_d) = \begin{cases} \frac{1}{1 + e^{-4\frac{T_d - T_{m1}}{T_{opt} - T_{m1}}}} & \text{si } T_d < T_{m1} \\ 1 - \frac{0,5(T_d - T_{opt})^2}{(T_{m1} - T_{opt})^2} & \text{si } T_{m1} < T_d < T_{opt} \\ 1 - (1 + \min) \frac{(T_d - T_{opt})^2}{2(T_{n2} - T_{opt})^2} & \text{si } T_{opt} < T_d < T_{n2} \\ \min + \frac{1 - \min}{1 + e^{-4\frac{(1 + \min)(T_{n2} - T_d)}{(T_{n2} - T_{opt})(1 - \min)}}} & \text{si } T_{n2} < T_d \end{cases}$$

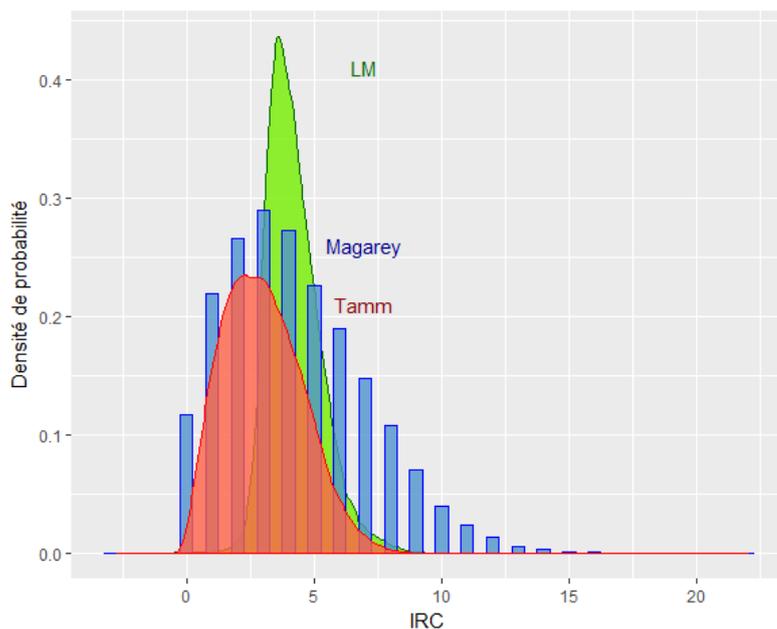
Les paramètres  $T_{m1}$ ,  $T_{opt}$ ,  $T_{n2}$  et  $\min$  étant estimés durant la calibration et dépendants de la température.

L'allure de la fonction SU pour les différentes variétés étudiées est représentée ci-dessous :



On observe que Bergeron connaît une sortie de dormance plus rapide dès que les températures dépassent 3°C et particulièrement pour des températures très chaudes au-dessus de 14°C comparé aux autres variétés. Ces conditions seront plus facilement atteintes dans le futur, expliquant l'avancée de floraison importante de Bergeron.

## Annexe 5 : Densité de probabilité des IRC de chaque modèle



Les distributions de Tamm et Magarey sont comparables et semblent pouvoir être approximées par une loi de Poisson. LM montre en revanche une distribution différente avec une concentration des valeurs autour de 4 et une moyenne plus haute que les deux autres modèles.

Remarque : Magarey n'est pas continu mais en nombre de jours.

## Résumé :

Le changement climatique aura de nombreuses conséquences sur les agro-systèmes. Ici sont étudiées les conséquences du changement climatique sur le développement des monilioses (particulièrement *Monilinia laxa*) sur fleur d'abricotier. Une expérimentation en pots piège dans laquelle des abricotiers sont disposés au verger dans des conditions climatiques variables permet la calibration de modèles épidémiologiques. Ces modèles décrivent le développement de *M. laxa* selon la pluviométrie et la température. Ils sont ensuite testés avec des données indépendantes grâce à l'étude d'un réseau de parcelles. Couplé à l'utilisation d'un modèle phénologique pour prévoir les dates de floraisons futures des abricotiers, les modèles épidémiologiques permettent le calcul d'indice de risque jusqu'à 2100. Ce calcul est conduit pour différentes variétés et zones géographiques. Il ressort de l'étude que les conséquences du changement climatique sur le développement de monilioses seront diverses selon la variété et la zone étudiée. Certaines variété (ex : Bergarouge) pourraient connaître une diminution du risque moniliose auquel l'arbre est exposé durant la floraison. D'autres (ex : Bergeron) pourraient connaître une augmentation du risque. Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour se prémunir face aux changements à venir mais les modèles peuvent également être utilisés actuellement comme outil d'aide à la décision.

Mots clefs : *Monilinia*, Abricot, Fleur, Changement climatique, Modélisation

## Abstact

Climate change will have several consequences on agro-systems. Here the consequences of climate change on blossom blight (*Monilinia laxa*) of apricot are studied. A trap pot experiment in which apricot trees are set in orchard in various conditions leads to the calibration of epidemiological models. These models describe the development of *M. laxa* for a given rain fall and temperature. The models were then tested on an independent dataset thanks to the study of an orchard network. With the use of a phenological model to predict blossom periods in the future, we can estimate cumulated blossom blight risks until 2100. Those computations are done for several apricot trees varieties and geographical zones. This study shows diverse consequences of climate change depending on the variety and the geographic location. Some varieties (ex: Bergarouge) might experience a decrease of the blossom blight risk with climate change. Others (ex: Bergeron) may experience an increase of this risk. The results of this study can be used to anticipate changes to come. These models can also be used nowadays as a tool for famers.

Key words: *Monilinia*, Apricot, Blossom, Climate Change, Modeling