



MASTER DE MATHÉMATIQUES DE L'INFORMATION ET DE LA DÉCISION

**Modélisation du système manguiers – cécidomyies des fleurs
pour une évaluation de modes de gestion du ravageur et de
ses dégâts**

Bastien Reyné

Encadré par : Isabelle Grechi (Cirad, UPR HortSys)
Frédéric Boudon (Cirad, UMR AGAP)



Année universitaire 2018/2019

Résumé

Résumé en français

Remerciements

Merci !

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	iv
1 Introduction	1
2 Connaissances biologiques	3
2.1 Les manguiers	3
2.2 Les cécidomyies des fleurs	4
3 Expérimentation réalisée et données disponibles	7
3.1 Dispositif	7
3.2 Données	8
4 Le modèle	11
4.1 Hypothèses	11
4.2 Formalisme	12
4.3 Inflorescences	13
5 Calibration du modèle	15
5.1 Fonction de coût	15
5.2 Analyse de sensibilité	16
5.3 Algorithme d'optimisation	17
5.4 Exploration de l'ensemble des solutions	17
6 Résultats	19
7 Conclusion	21
Bibliographie	23
A Dynamiques d'inflorescences et de larves pour le verger n°2	25

1

Introduction

LE Cirad — où j’ai effectué mon stage — est un organisme de recherche spécialisé dans l’agronomie des régions tropicales et subtropicales, et l’un de ses objectifs principaux est le développement durable desdites régions. Cependant la notion de développement durable vient avec quelques contraintes. Notamment, la durabilité implique la limitation des pesticides ; et le développement induit la nécessité d’une production agricole efficiente, capable de nourrir dix milliards de personnes d’ici 2050.

Ainsi, il est naturel que le sixième fruit le plus produit au monde, à savoir la mangue¹, soit un sujet de recherche. C’est d’autant plus vrai que la culture des manguiers (*Mangifera indica* L.) n’est pas toujours facile. En effet, les manguiers présentent de forts asynchronismes phénologiques, que ce soit à l’intérieur d’une même parcelle entre les différents arbres ou à l’intérieur même d’un arbre entre les différentes branches. Cela entraîne une floraison et une fructification étalée dans le temps, rendant la gestion des vergers plus difficile. Ce phénomène entraîne aussi, pour les différents organes du manguiers, une fenêtre d’exposition prolongée aux ravageurs, ce qui favorise leur prolifération. Et ils sont légion. On peut citer la cécidomyie des feuilles, la mouche des fruits ou encore le charançon du noyau.

Parmi les ravageurs se trouve également la cécidomyie des fleurs (*Procontarinia mangiferae*). Cette dernière pond ses œufs dans les inflorescences, ce qui provoque des dommages potentiellement importants voire la mort des inflorescences. Et qui dit pas d’inflorescences, dit pas de mangues !

Pour limiter les dégâts de la cécidomyie des fleurs sans utiliser de pesticides, deux pistes sont envisagées. La première serait la synchronisation de la floraison, grâce à l’élagage, ce qui réduirait la fenêtre d’exposition aux ravageurs et limiterait par conséquent leur nombre. La seconde repose sur le fait que les œufs pondus dans les inflorescences se transforment en larves qui vont ensuite s’enfouir dans le sol. Restreindre l’accès au sol (avec un enherbement haut par exemple, qui augmente le trajet des larves pour atteindre la terre et favorise la présence de prédateurs) ou l’empêcher (*e.g.* en utilisant une bâche) devrait *a priori* permettre de réduire la présence de ces ravageurs. Afin de pouvoir vérifier cette hypothèse, une expérimentation sur un verger a été conduite en 2017 ; une parcelle a été divisée en trois pour tester trois modalités de couverture du sol différentes : un enherbement ras,

1. La sixième production fruitière mondiale est en réalité le groupement des mangues, mangoustans et goyaves [Food and Agriculture Organization, 2017]

un paillage synthétique et un enherbement haut. De cette expérimentation, des données ont été récoltées. L'objectif est d'utiliser les données pour modéliser les interactions entre les cécidomyies et les inflorescences. Une première version du modèle a été réalisée lors du stage de [Saint-Criq \[2018\]](#), mon stage en est la suite et a pour objectif d'améliorer le modèle existant puis de tester des modes de conduites des vergers *in silico* pour pouvoir répondre à la question :

La modalité de couverture du sol et la synchronisation de la floraison permettent-elles de limiter l'infestation du verger par les cécidomyies des fleurs ?

[BALANCER LE PLAN]

2

Connaissances biologiques

ON s'intéresse dans ce chapitre aux manguiers et aux cécidomyies des fleurs. On s'intéresse en particulier à leurs descriptions d'un point de vue biologique, leurs développements et leurs interactions. Autrement dit, on recense ici les connaissances biologiques nécessaires à la compréhension de notre sujet.

2.1 Les manguiers

Le manguiier est un arbre qui a une croissance végétative rythmique. Cela signifie que sa croissance est entrecoupée par des périodes de repos. Durant les périodes de croissance, les branches sont prolongées par des tiges qui ont des feuilles. Ces tiges sont appelées *unités de croissance*. Si une unité de croissance prolonge la branche dans l'axe, alors elle est dite apicale ; si elle la prolonge sur le côté, elle sera qualifiée de latérale. Au fil du temps, les unités de croissance perdent leurs feuilles, durcissent et grossissent jusqu'à faire partie intégrante de la branche. On peut alors voir le manguiier comme un empilement d'unités de croissance ; la base du tronc étant l'unité de croissance la plus ancienne et celles qui portent des feuilles les plus récentes [Normand, 2009]. Des unités de croissance sont visibles sur la figure 2.1.

Et ce sont ces unités de croissance qui portent les *inflorescences*. Les inflorescences désignent des groupements de bourgeons. Ces bourgeons deviennent des fleurs qui elles-même deviennent des fruits, si elles sont fécondées. En théorie. En pratique, les bourgeons ne survivent que rarement jusqu'au stade de fruit, ils meurent bien souvent avant. S'ils meurent parfois à cause des conditions climatiques, la principale raison de leurs morts reste les attaques des ravageurs.

La forte présence des ravageurs s'explique en grande partie par le *cycle phénologique* du manguiier. On désigne par cycle phénologique les phénomènes périodiques qui rythment le monde vivant en fonction des variations climatiques. Et il y a chez le manguiier, en sus des conditions climatiques, d'autres facteurs qui influent sur la phénologie tels que la position de l'unité de croissance ou la charge en fruit de l'année précédente [Magne, 2004; Normand et al., 2009]. Il en résulte que le cycle phénologique est très variable d'un manguiier à l'autre. On observe même des différences au niveau phénologique entre les différentes unités de croissance d'un même arbre. Cela implique aussi que le cycle phénologique peut être modifié (dans une certaine mesure) grâce à des opérations techniques, comme la taille

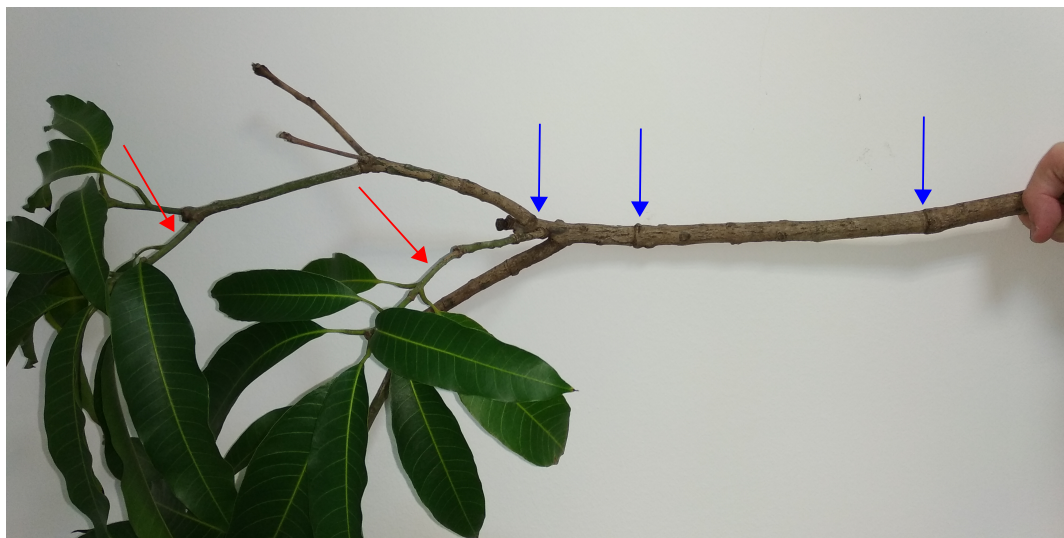


FIGURE 2.1 – Photographie d’une branche portant des unités de croissance. Les flèches rouges montrent des unités de croissances. Les flèches bleues montrent les délimitations des unités de croissance antérieures; la portion de la branche entre deux flèches bleues correspond à une ancienne unité de croissance qui a perdu ses feuilles, grossie et durcie et qui fait désormais partie intégrante de la branche.

par exemple. Mais il subsiste toujours une phénologie étalée dans le temps à l’échelle d’un verger. Cet étalement implique une disponibilité en ressources présente sur de larges périodes pour les ravageurs, ce qui explique leur forte présence.

Du cycle phénologique viennent les *stades phénologiques* des inflorescences. Ils caractérisent le niveau de développement des inflorescences. On considère ici les stades phénologiques allant de C à F. Le stade C correspond au débourrement (l’éclosion des bourgeons) de l’inflorescence. Le stade F s’étend entre l’apparition de la première fleur jusqu’à la disparition de la dernière. Et les stades D et E représentent les étapes intermédiaires du développement qui mènent du débourrement à la floraison. Les durées des stades phénologiques sont les suivantes :

Stade phénologique	C/D	E	F
Durée (en jours)	7	9	34

Les inflorescences ont ainsi une durée de vie théorique de 50 jours [Saint-Criq, 2018]. Cette durée théorique peut être réduite en cas d’attaque de cécidomyies des fleurs, surtout lorsque l’inflorescence se fait attaquer lors des premiers stades, moment où l’inflorescence est la plus vulnérable.

Les inflorescences commencent à apparaître en juillet, les premiers fruits apparaissent à la mi-septembre. La récolte a lieu de décembre à janvier.

2.2 Les cécidomyies des fleurs

Les cécidomyies des fleurs sont des diptères (des sortes de moucheron) dont le manquier est la seule plante-hôte. À la Réunion, les cécidomyies sont présentes toute l’année et se reproduisent sur les inflorescences et les jeunes feuilles [Amouroux, 2013]. Le nombre maximal est atteint pendant la période de floraison.

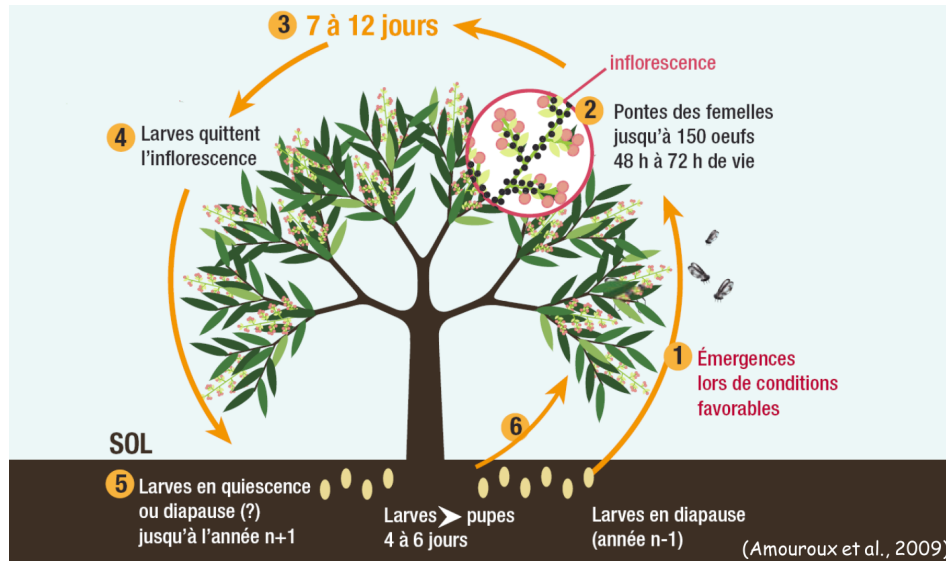


FIGURE 2.2 – Représentation du cycle de développement de la cécidomyie des fleurs du manguier par Amouroux *et al.* [2009].

Le cycle de développement de la cécidomyie des fleurs est schématisé sur la figure 2.2. Les femelles présentes dans le verger au jour t peuvent pondre jusqu'à 150 œufs dans les inflorescences. Les œufs laissent place à des larves. Au bout de sept à douze jours après la ponte, une fois le troisième stade de développement larvaire atteint, les larves s'éjectent des inflorescences en direction du sol. (Et c'est cette sortie des larves qui provoquent des dégâts sur les inflorescences.) Une fois au sol, les larves s'enfouissent dans le sol. Elles peuvent alors entrer en phase de *pupaïson*, qui correspond à la transformation de la larve en cécidomyie. Cette phase dure quatre à six jours, et une fois finie les cécidomyies émergent du sol et infestent le verger — perpétuant ainsi le cycle. Leur durée de vie n'excède pas 72 heures.

Alternativement à la pupaïson, les larves peuvent aussi rentrer en *diapause*. La diapause peut être vue comme une sorte d'hibernation, où le cycle est mis en pause un an ou deux avant l'émergence de la cécidomyie.

Les individus qui sortent de diapause permettent notamment le lancement de la dynamique d'infestation pendant la période de floraison. La sortie est dû à une baisse de température qui coïncide avec le début de la floraison [Amouroux *et al.*, 2014].

3

Expérimentation réalisée et données disponibles

CE chapitre explique l'expérimentation qui a été menée en 2017 sur deux vergers dans la commune de Saint-Paul (à la Réunion). On reviendra sur le dispositif de l'expérience et les données qui en ont été tirées. Le but de cette expérience était de déterminer quel est l'impact de la modalité de couverture du sol dans le degré d'infestation d'un verger.

3.1 Dispositif

Le verger expérimental (que l'on appellera aussi parcelle par la suite) est séparé en trois parts égales de trente arbres. Sur chacune des trois sous-parcelle, une modalité de couverture du sol différente est mise en place. Sur un côté il y avait un enherbement entretenu de sorte qu'il reste court, la modalité *enherbement ras (ER)* fera référence à ce traitement dans la suite du document. La sous-parcelle du milieu fut baché, afin que les cécidomyies ne puissent ni entrer dans le sol ni en sortir ; cette modalité correspond au *paillage synthétique (PS)*. La dernière partie fut laissée telle quelle, sans entretien particulier, donnant ainsi un *enherbement haut (EH)*. À côté de ce verger, il y en avait un autre. Le rôle de cet autre verger était de fournir le verger expérimental en cécidomyies pour voir quelle était la préférence de ces dernières. Tout cela est schématisé sur la figure 3.1.

Sur ces deux vergers expérimentaux, deux types d'observations furent effectués entre juin et octobre 2017. Le premier porte sur les inflorescences. Huit unités de croissance furent sélectionnées sur chacun des vingt-cinq arbres tirés aléatoirement. Et c'est ainsi qu'entre le 26 juin et le 3 octobre 2017 furent notés les dates de débourrements des inflorescences présentes sur les deux cents unités de croissance suivies. À partir du 6 septembre furent aussi notés les dates de morts des inflorescences. Les données de ce relevé seront rassemblées en un jeu de données que l'on nommera *dataset 1*.

La seconde catégorie d'observations porte sur la capture des larves de cécidomyies. Dans chacune des trois sous-parcelles, dix arbres furent sélectionnés. Sous chacun de ces arbres furent placés deux pièges en dessous des inflorescences présentes. Les pièges sont des bidons plastiques carrés de douze centimètres de côté. (À noter que les pièges furent déplacés au cours du temps pour qu'ils soient en-dessous du maximum d'inflorescences

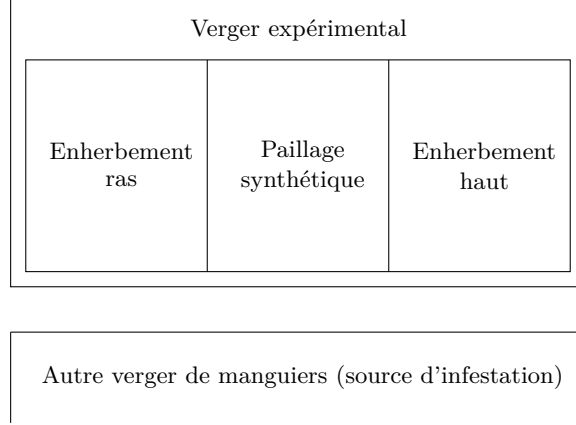


FIGURE 3.1 – Schéma de l'expérimentation menée. Le verger sur lequel ont été testées les trois modalités de couvertures du sol était situé à côté d'un autre verger, qui servait de source d'infestation. Cela fut fait pour garantir la présence de cécidomyies dans le verger expérimental.

possibles.) Et c'est ainsi qu'entre le 18 juillet et le 6 octobre 2017 furent notés le nombre de larves piégées, le nombre d'inflorescences vivantes au-dessus du piège et le nombre d'inflorescences vivantes dans l'arbre. Les données de ce relevé seront rassemblées en un jeu de données que l'on nommera *dataset 2*.

3.2 Données

Après mise en forme des données¹, on peut extraire les dynamiques qui nous intéressent. Il faut cependant noter que les deux jeux de données n'ont pas la même échelle. On choisira de tout mettre à l'échelle de la sous-parcelle.

Inflorescences vivantes

On peut avoir les dynamiques d'inflorescences vivantes grâce aux deux jeux de données. Pour le *dataset 2*, c'est facile. On possède le nombre d'inflorescences vivantes dans les arbres suivis aux différentes dates ; il suffit alors de mettre à l'échelle comme suit :

$$I_t^2 = \frac{N}{n} \sum_{j=1}^n I_{j,t}^2,$$

avec N représentant le nombre d'arbre dans la sous-parcelle, n le nombre d'arbre suivis et $I_{j,t}^2$ le nombre d'inflorescences sur l'arbre j à la date t .

Pour le *dataset 1*, il faut récupérer le nombre de débourrements journalier B_t et le nombre de morts journalier D_t ; et le nombre d'inflorescences vivantes au jour t s'écrit alors

$$I_t^1 = \alpha \left(\sum_{j=1}^t B_j - \sum_{j=1}^t D_j \right),$$

où α représente le coefficient de mise à l'échelle. Il faut cependant apporter une correction cette dynamique. En effet, l'observation des inflorescences mortes n'a été faite qu'à partir

1. Tous les scripts utilisés sont disponibles à l'adresse <https://github.com/bastienreyne/cecidomyie>

du 6 septembre. De ce fait, sur ce jeu de données la distinction entre inflorescences vivantes et mortes n'est possible qu'à partir du 6 septembre. Il en résulte un écart non-négligeable entre le 5 et le 6 septembre (voir figure 3.2). Cet écart correspond au nombre de mort qu'il y a eu avant le 6 septembre, qu'il faut donc répartir sur la période concernée. N'ayant aucune indication de comment la répartir, on utilisera la dynamique d'inflorescences vivantes du *dataset 2* afin que la dynamique du *dataset 1* y ressemble le plus possible — et on en profitera au passage pour estimer le coefficient de mise à l'échelle α . Plus précisément, on attribuera un poids (à calibrer numériquement) pour tous les jours entre le jour 1 et le 5 septembre, et le nombre de morts chaque jour sera donné par la formule

$$D_t^c = \frac{p_t \times m}{\sum_j p_j},$$

où D_t^c désigne le nombre de mort à la date t , m le nombre de mort total déterminé par la différence d'inflorescences entre le 5 et 6 septembre et p_t le poids assigné au jour t . Les poids p_t et le coefficient de mise à l'échelle α seront déterminés numériquement afin de résoudre le problème

$$\arg \max_{\alpha, p_t} \sum_t \left| I_t^2 - I_t^{1,c} \right|,$$

où $I_t^{1,c}$ représente les inflorescences vivantes du *dataset 1* mises à l'échelle et corrigées ; cette dynamique est déterminée par la formule

$$I_t^{1,c} = \begin{cases} I_t^1 - D_t^c & \text{si } t \leq 6 \text{ septembre,} \\ I_t^1 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Les différentes dynamiques d'inflorescences sont visibles sur la figure 3.2. On remarque des dynamiques très différentes pour la modalité «enherbement haut», et ce même après correction de la dynamique issue du premier *dataset*. On peut expliquer ce phénomène par la grande variabilité de la phénologie chez le manguier ; ainsi des échantillonnages différents peuvent produire des dynamiques très différentes. Les deux autres modalités ont en revanche des dynamiques similaires (après correction).

On fera le choix de privilégier, à chaque fois que cela s'avèrera possible, les dynamiques issues du *dataset 2*. Ce choix découle du fait que ce sont les dynamiques associées aux dynamiques de larves.

Larves

Le *dataset 2* permet aussi de récupérer la dynamique de larves, à partir des larves piégées. En effet, on connaît le nombre de larves par piège, le nombre d'inflorescences vivantes situées au-dessus des pièges et le nombre d'inflorescences vivantes dans les arbres suivis. De là, on peut estimer le nombre de larves qui s'éjecte des inflorescences à l'échelle d'un arbre, puis à l'échelle de la sous-parcelle. Les différentes dynamiques de larves sont visibles sur la figure 3.3. Les relevés des pièges n'étant pas quotidien, le nombre de larves piégées a été repartitionné uniformément entre deux relevés, ce qui explique les «plateaux» visibles sur le graphique.

Les dynamiques pour le verger n°2 sont visibles dans l'annexe A

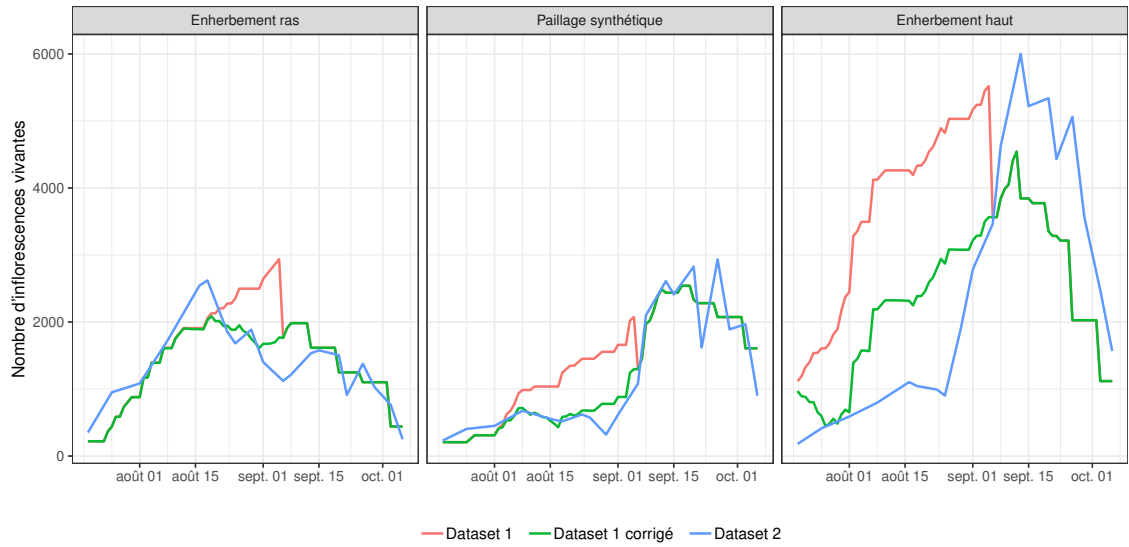


FIGURE 3.2 – Comparaison des différentes dynamiques d’inflorescences vivantes du verger n°1 en fonction du *dataset* utilisé. Si après correction les dynamiques des deux *datasets* sont similaires pour les deux premières modalités, la modalité «enherbement haut» présente des différences significatives entre les deux dynamiques. Cela peut s’expliquer par un échantillonnage différent d’un phénomène présentant une grande variabilité.

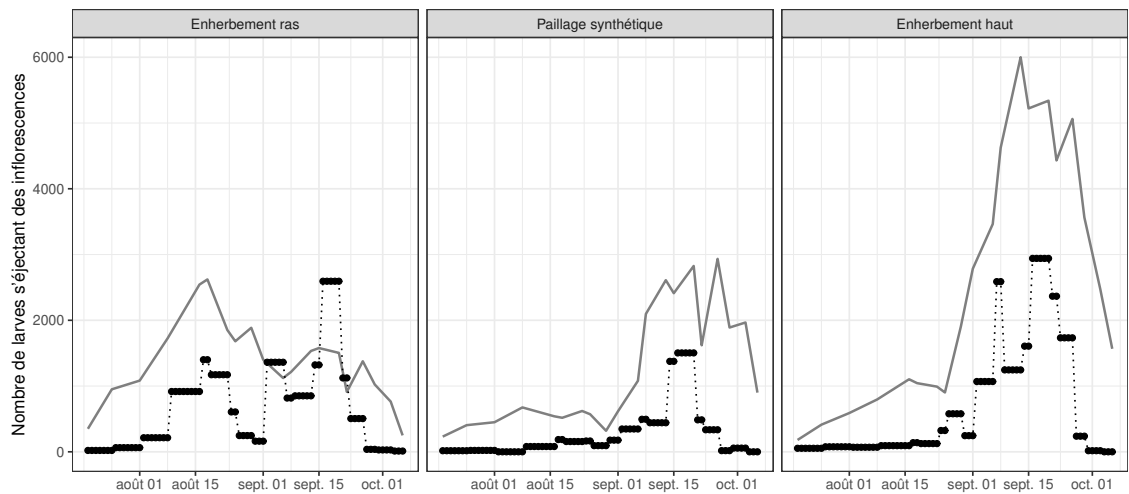


FIGURE 3.3 – Dynamiques de larves s’éjectant des manguiers chaque jour dans le verger n°1 pour chacune des trois sous-parcelles. En gris sont visibles les dynamiques d’inflorescences vivantes.

4

Le modèle

ON s'intéresse ici aux différentes approches possibles pour modéliser le phénomène. Et il y a du choix car il y a dans la littérature quelques modèles relatifs aux manguiers et aux cécidomyies. On décrira la solution retenue ainsi que les hypothèses faites.

Concernant la modélisation en rapport avec le manguier, on peut citer le modèle *Virtual Mango* développé par [Boudon et al. \[2016\]](#). C'est un modèle qui simule le développement du manguier, notamment sa croissance et les différents stades phénologiques des unités de croissance et des inflorescences. Le modèle ne prend cependant pas en compte l'impact des ravageurs sur le développement de l'arbre.

Plus en rapport avec notre sujet, on peut noter l'existence d'un modèle de colonisation d'un verger par les cécidomyies [\[Amouroux, 2013\]](#). Les données utilisées proviennent d'une expérimentation menée sur un verger entièrement bâché. C'est un modèle stochastique et spatialisé qui prend en compte l'arrivée des femelles sur le verger, leurs pontes d'œufs dans les inflorescences, le développement de ces derniers jusqu'au troisième stade de développement larvaire et enfin l'éjection des larves des inflorescences. Cependant, le fait que le verger modélisé est entièrement bâché implique l'absence de cycle de développement complet pour les cécidomyies à l'intérieur du verger ainsi que l'absence d'émergence de cécidomyies dans le verger.

On choisira ici l'approche amorcé par [Saint-Criq \[2018\]](#), qui propose une modélisation du verger expérimental avec à la fois venue de femelles exogènes et reproduction endogène, tout en prenant en compte les différentes modalités de couverture du sol. L'objectif sera de simuler les dynamiques de larves à l'échelle de la sous-parcelle en fonction du nombre d'inflorescences présentes.

4.1 Hypothèses

À cette fin, il convient de faire des hypothèses sur les processus biologiques qui régissent le développement des larves et des manguiers. Les voici :

- la modalité de couverture du sol n'influe pas sur le développement et la phénologie du manguier, elle n'influe pas non plus sur le déplacement des cécidomyies ;
- la durée de vie des femelles n'est que d'un jour, et il correspond au jour de la ponte ;

- aucune femelle ne rentre dans le sol ou ne sort du sol pour la sous-parcelle avec un paillage synthétique ;
- il y a un taux de mortalité pour larves lorsqu'elle rentrent ou sortent du sol, et ce taux est différent entre l'enherbement ras et l'enherbement haut ;
- les larves qui n'entrent pas en pupaison (soit qui meurent, soit qui rentrent en diapause) sont exclues du système ;
- la probabilité d'entrer en pupaison dépend de la température ;
- des larves entrées en phase de diapause l'année précédente émergent dans les sous-parcelles avec un enherbement ;
- un individu qui émerge dans une sous-parcelle peut se déplacer dans les autres, il y a cependant un coût relatif à la distance (autrement dit, les cécidomyies préfèrent rester dans la sous-parcelle dans laquelle elles émergent, puis aller dans la sous-parcelle limitrophe plutôt que dans la troisième) ;
- les femelles exogènes arrivent proportionnellement aux inflorescences ;
- s'il y a significativement plus de femelles que d'inflorescences, alors elles ne peuvent pas toutes pondre.

4.2 Formalisme

En reprenant les hypothèses ainsi que le cycle de développement de la cécidomyie présenté dans la partie 2.2, on peut formaliser notre modèle. Le modèle cherche à prédire les larves qui s'éjectent des manguiers, seule quantité observée concernant les cécidomyies, ce qui permettra donc d'évaluer notre modèle.

Ainsi, le nombre de larves au jour t dans la sous-parcelle i est donnée par

$$L_{t,i} = F_{t-d_\ell,i} \times R \times E_0 \times \mu_\ell,$$

où $F_{t-d_\ell,i}$ est le nombre de femelles dans la sous-parcelle i au jour $t-d_\ell$, d_ℓ est la durée entre la ponte et le troisième stade de développement larvaire, R un indicateur de disponibilité en ressources, E_0 le nombre d'œufs pondus et μ_ℓ la probabilité de survie des œufs entre la ponte et le troisième stade de développement larvaire. Et on a $R = \min\{1, kI_{t,i}/F_{t,i}\}$, qui dit que s'il y a *significativement* plus de femelles que d'inflorescences, alors elles ne pourront pas toutes pondre. Le *significativement* est déterminé par le paramètre k .

Le nombre de larves en pupaison à la date t est donné par $P_{t,i} = L_{t,i} \times \mu_{\text{sol}}^1 \times p_p$, où μ_{sol}^1 est la probabilité d'une larve d'entrer dans le sol en fonction de la modalité de couverture du sol et p_p est la probabilité pour une larve d'entrer en pupaison. Le nombre de larves en diapause des années précédentes qui sort au jour t est donnée par $D_{t,i}$, qui sera estimé.

Le nombre de femelles émergentes du sous-bloc i au jour t est donnée par

$$F_{t,i}^{\text{endo}} = F_{t,i}^{\text{pupe}} + F_{t,i}^{\text{diap}},$$

avec $F_{t,i}^{\text{pupe}} = P_{t-d_p,i} \times \frac{1}{1+SR} \times \mu_{\text{sol}}^2$ le nombre de femelles issues de la reproduction locale de l'année et $F_{t,i}^{\text{diap}} = D_{t-d_p} \times \frac{1}{1+SR} \times \mu_{\text{sol}}^2$ le nombre de femelles issues des femelles entrées en diapause les années précédentes. Et on a SR qui correspond au *sex-ratio* et μ_{sol}^2 à la probabilité pour une femelle de sortir du sol après la pupaison ou la diapause en fonction de la modalité de couverture du sol.

Les femelles qui émergent dans la sous-parcelle i n'y restent pas forcément, elles peuvent potentiellement aller dans la sous-parcelle j ou k . Ainsi, pour $n \in \{i, j, k\}$, on a

$$F_{t,i \rightarrow n}^{\text{endo}} = \frac{I_{t,n} \times p_m^\delta}{\sum_{\{i,j,k\}} I_{t,n} \times p_m^\delta},$$

avec $p_m \in [0; 1]$ et $\delta = \begin{cases} 0 & \text{si } n = i \text{ (même sous-parcelle),} \\ 1 & \text{si } n = j \text{ (sous-parcelle limitrophe),} \\ 2 & \text{si } n = k \text{ (sous-parcelle non-limitrophe).} \end{cases}$

Enfin, le nombre de femelles qui pond dans la sous-parcelle i à la date t est donné par

$$F_{t,i} = F_{t,i \rightarrow i}^{\text{endo}} + F_{t,(j,k) \rightarrow i}^{\text{endo}} + F_{t,i}^{\text{exo}},$$

où $F_{t,(j,k) \rightarrow i}^{\text{endo}} = F_{t,j \rightarrow i}^{\text{endo}} + F_{t,k \rightarrow i}^{\text{endo}}$ est le nombre de femelles venant d'une autre sous-parcelle, et $F_{t,i}^{\text{exo}}$ le nombre de femelles venant de l'extérieur dans la sous-parcelle à la date t . Le nombre de femelles exogènes est donné par $F_{t,i}^{\text{exo}} = \gamma \times I_{t,i}$, avec γ à déterminer.

Le schéma conceptuel du modèle est visible sur la figure 4.1.

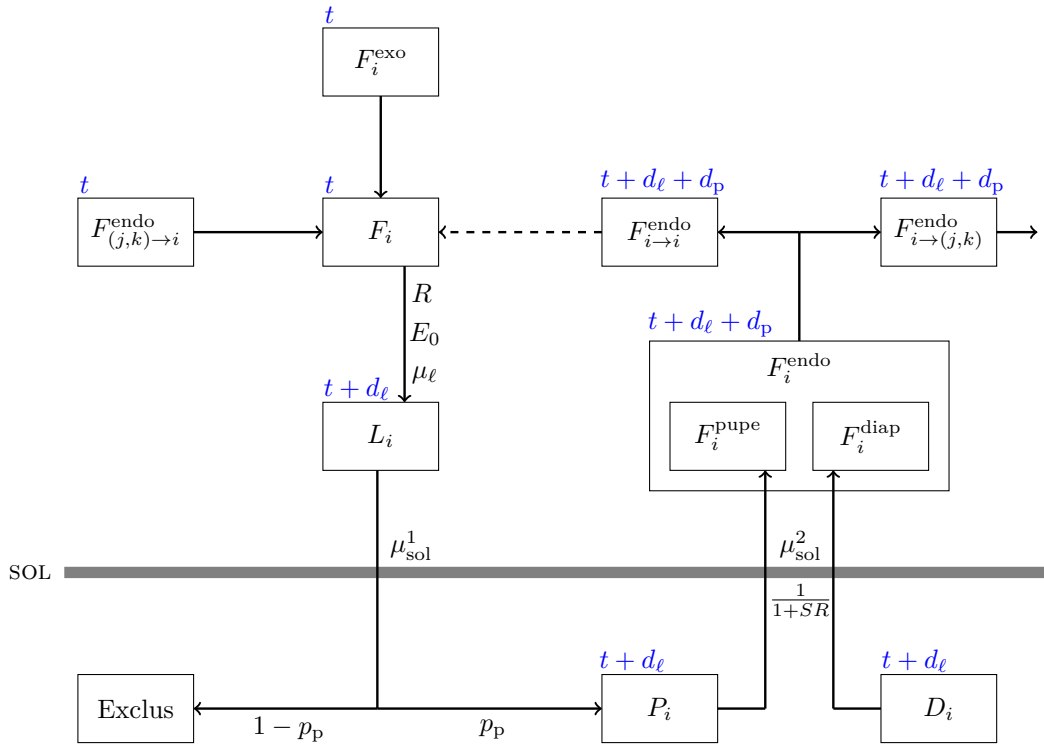


FIGURE 4.1 – Schéma conceptuel du modèle pour la sous-parcelle i . En bleu est visible la date, la flèche en pointillés marque une rupture du temps.

4.3 Inflorescences

Le modèle prendra en entrée les inflorescences. Il faut cependant noter qu'il ne prendra pas les inflorescences «brutes», mais des dynamiques modifiées. En effet, on émet également l'hypothèse que les cécidomyies n'attaquent non pas les toutes les inflorescences mais uniquement celles se situant au stades phénologiques C, D ou E. Ce qui correspond aux seize premiers jours de l'inflorescence. Pour parvenir à avoir lesdites dynamiques, on a besoin de procéder à quelques étapes intermédiaires. On a notamment besoin de la date de débourrements des inflorescences avant d'avoir une estimation des dynamiques voulues.

Débourrements

Afin de pouvoir simuler des dynamiques d'inflorescences avec une durée de vie de seize jours, il est nécessaire d'avoir les dates de débourrements des inflorescences. Dans le verger n°1, les dynamiques pour les modalités «enherbement ras» et «paillage synthétique» issues des deux jeux de données ont des dynamiques plutôt similaires ; on pourrait donc utiliser les débourrements du *dataset 1* mis à l'échelle. En revanche, pour la modalité «enherbement haut», on observe des dynamiques très différentes. Et comme l'on souhaite privilégier les dynamiques issues du *dataset 2*, il faut procéder autrement. (Il en va de même pour les modalités «enherbement ras» et «paillage synthétique» du verger n°2.)

L'objectif est alors de simuler les dates de débourrements qui permettent de produire la dynamique d'inflorescences vivantes du *dataset 2*. Pour cela, on suppose que la durée de vie effective d'une inflorescence suit une loi normale. On possède les durées de vies effectives dans le *dataset 1*. Premièrement, en fixant le risque de première espèce à $\alpha = 5\%$, un test de normalité de Shapiro–Wilk nous confirme la normalité (p -valeur de 0.05447, on ne rejette donc pas l'hypothèse de normalité). Deuxièmement, on observe une durée de vie effective moyenne de 29 jours (avec un écart-type de 14). Ainsi, il faut donc simuler des débourrements, pour que des inflorescences ayant une durée de vie qui suit une $\mathcal{N}(29; 14)$, donne la dynamique d'inflorescences vivantes du *dataset 2*. Il faut donc trouver les B_t tels que

$$I_t^2 = B_t + \sum_{j=1}^{50} B_{t-j} \times (1 - F(j)), \quad \text{avec } B_t = 0 \text{ si } t \leq 0,$$

où F est la fonction de répartition d'une $\mathcal{N}(29; 14)$.

Par souci d'homogénéité, on utilisera les débourrements simulés pour les trois modalités, et ce pour les deux vergers.

Dynamiques

Une fois les dates de débourrements obtenus, on peut simuler des dynamiques d'inflorescences aux stades phénologiques C, D et E. Ces inflorescences *attractives* peuvent se calculer en utilisant la formule

$$I_t^a = B_t + \sum_{t=1}^{16} B_{t-j} \times (1 - F(j)), \quad \text{avec } B_t = 0 \text{ si } t \leq 0.$$

Ici, B_t représente toujours le nombre de débourrements à la date t et F la fonction de répartition d'une $\mathcal{N}(29; 14)$.

5

Calibration du modèle

IL est question ici de définir la méthodologie afin de calibrer les paramètres libres du modèle. On s'intéressera notamment à définir une fonction de coût, pour évaluer la qualité de la calibration. Dans cette optique, on essaiera de calibrer les paramètres en utilisant uniquement les dynamiques du verger n°1 ; le deuxième servira à la validation.

Il peut être utile de donner la liste des paramètres à calibrer :

- γ , le paramètre relatif à l'arrivée des femelles exogènes ;
- p_m , le paramètre relatif à la migration des femelles endogènes entre les sous-parcelles ;
- μ_{ER}^1 et μ_{ER}^2 , les probabilité de réussir à entrer et à sortir du sol pour les cécidomyies pour la modalité «enherbement ras». Pour simplifier, on pose $\mu_{ER}^1 = \mu_{ER}^2$;
- μ_{EH}^1 et μ_{EH}^2 , les probabilité de réussir à entrer et à sortir du sol pour les cécidomyies pour la modalité «enherbement haut». Ici aussi, on pose $\mu_{EH}^1 = \mu_{EH}^2$;
- k , le paramètre relatif à la disponibilité en ressources pour les inflorescences ;
- **stock**, le nombre de larves entrées en diapause les années précédentes qui décident de sortir l'année considérée ;
- $E_0\mu_\ell$, le nombre d'œufs pondus par une femelle qui survivent, se transforment en larves puis s'éjectent de l'inflorescences.

5.1 Fonction de coût

Avant une quelconque estimation des paramètres, nous avons besoin de mesurer la qualité de nos estimations. Pour ce faire, on utilisera une fonction pour comparer le nombre de larves estimées avec le nombre de larves observées. Pour définir cette fonction, on pose :

- m , le nombre de jours entre la première observation et la dernière ;
- n , le nombre de relevés effectif ;
- t , le nombre de jours passés depuis la première observation ;
- t^j , le nombre de jours entre la première observation et le $j^{\text{ème}}$ relevé.

(On a donc $t^1 = 0$ et $t^n = m$.)

La fonction est alors définie par

$$f(y, \hat{y}) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=2}^n (y_j^* - \hat{y}_j^*)^2}}{\max(y^*) - \min(y^*)},$$

où

$$y_j^* = y_{t^j} \quad \text{et} \quad \hat{y}_j^* = \frac{1}{t^j - t^{j-1}} \sum_{k=t^{j-1}}^{t^j} \hat{y}_k.$$

La figure 5.1 illustre le fonctionnement de la fonction. Appliquer la fonction à $n - 1$ valeurs (correspondant aux relevés sur le terrain) plutôt qu'à chacun des m jours (correspondant à l'étendue des relevés) est motivé par le fait que les relevés ne furent pas fait à des intervalles de temps régulier. Ce faisant, on évite d'attribuer plus d'importance aux relevés qui ont eu un écart relativement important avec le relevé précédent.

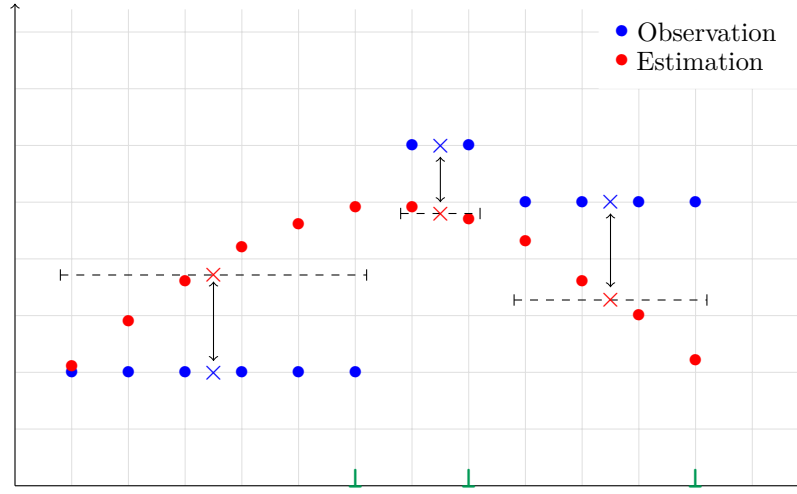


FIGURE 5.1 – Schéma illustrant le fonctionnement de la fonction objectif. À chaque relevé effectif (marqueurs verts), on fait correspondre la période correspondant à ce relevé (segments en pointillés). Et pour chacune de ces périodes, on calcule la moyenne des valeurs estimées (les croix rouges). On compare ensuite les moyennes ainsi calculées avec les valeurs observées associées (les croix bleues).

Par la suite, l'objectif sera de minimiser cette fonction pour chacune des sous-parcelle.

5.2 Analyse de sensibilité

Avant de calibrer le modèle, il est pertinent d'effectuer une analyse de sensibilité. L'analyse de sensibilité est définie par Saltelli *et al.* [2008] comme

«l'étude de comment l'incertitude de la sortie d'un modèle — qu'elle soit numérique ou non — peut être répartie entre les différentes sources d'incertitudes que sont les entrées du modèle.»¹

Autrement dit, on cherche à connaître les paramètres les plus influents sur la sortie du modèle. La calibration comportant toujours une part d'arbitraire, cette analyse permet de prendre du recul sur les choix de paramètres, relativement à leur impact sur le modèle.

1. «The study of how uncertainty in the output of a model (numerical or otherwise) can be apportioned to different sources of uncertainty in the model input.»

5.3 Algorithme d'optimisation

5.4 Exploration de l'ensemble des solutions

6

Résultats

7

Conclusion

Remerciements

Ce rapport de stage a été réalisé dans le cadre du projet ECOVERGER, action pilotée par le ministère de l'Agriculture et de l'alimentation et le ministère de la Transition écologique et solidaire, avec l'appui financier de l'Agence française pour la biodiversité dans le cadre de l'APR «Résistance et pesticides» grâce aux crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du plan Ecophyto et dans le cadre du programme de recherche agronomique du Cirad à la Réunion, DPP COSAQ, (activités 2015-2018) financé par la communauté européenne (fond structurel FEDER) et le Conseil Régional de La Réunion.



Bibliographie

- P. Amouroux. *Bio-écologie et dynamique des populations de cécidomyie des fleurs (Procontarinia mangiferae), un ravageur inféodé au manguier (Mangifera indica), en vue de développer une lutte intégrée*. PhD thesis, La Réunion, 2013.
- P. Amouroux, F. Normand, and D. Vincenot. Guide de production intégrée de mangues à la Réunion, chapitre VII, 2009.
- P. Amouroux, F. Normand, H. Delatte, A. Roques, and S. Nibouche. Diapause incidence and duration in the pest mango blossom gall midge, procontarinia mangiferae (felt), on reunion island. *Bulletin of entomological research*, 104(5) :661–670, 2014.
- F. Boudon, S. Persello, A. Jestin, A.-S. Briand, P. Fernique, Y. Guédon, M. Léchaudel, I. Grechi, and F. Normand. An FSPM approach for modeling fruit yield and quality in mango trees. FSPMA, 2016.
- Food and Agriculture Organization. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC>, 2017. ONU. Site internet visité le 25 juin 2019.
- C. Magne. Effet de la charge en fruits sur la croissance végétative de plusieurs variétés de manguier à l’île de la Réunion. Master’s thesis, Université Blaise Pascal, 2004.
- F. Normand. Guide de production intégrée de mangues à la Réunion, chapitre IV, 2009.
- F. Normand, A. K. P. Bello, C. Trottier, and P.-E. Lauri. Is axis position within tree architecture a determinant of axis morphology, branching, flowering and fruiting? an essay in mango. *Annals of botany*, 103(8) :1325–1336, 2009.
- L. Saint-Criq. Modélisation du système manguier-cécidomyie des fleurs pour une évaluation de modes de gestion du ravageur et de ses dégâts. Master’s thesis, Université Paul Sabatier, 2018.
- A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, and S. Tarantola. *Global sensitivity analysis : the primer*. John Wiley & Sons, 2008.



Dynamiques d'inflorescences et de larves pour le verger n°2

Le verger n°2 présente des caractéristiques particulières qui impactent les résultats visibles. Ce verger est disposée «en escalier», avec une modalité sur chaque «marche». L'ensoleillement n'était pas le même entre les différentes modalités, et cela se ressent sur la figure A.1. La sous-parcelle avec un paillage synthétique — la plus ensoleillée — présente ainsi plus d'inflorescences que les deux autres. On retrouve aussi des différences d'inflorescences entre les parcelles enherbées, celle avec l'enherbement haut avait plus de soleil que l'autre, et elle a eu plus d'inflorescences.

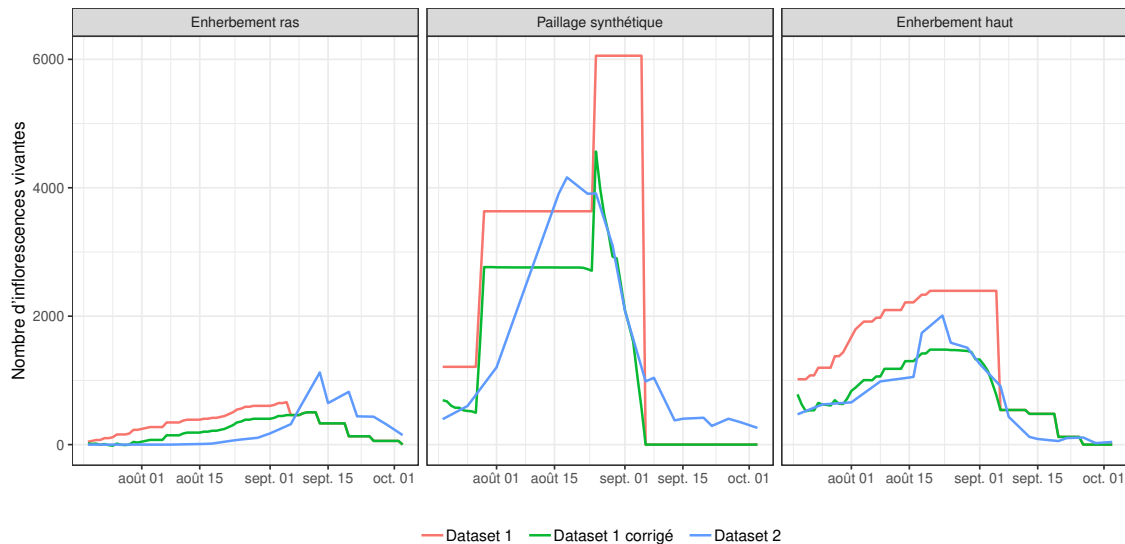


FIGURE A.1 – Comparaison des différentes dynamiques d'inflorescences vivantes du verger n°2 en fonction du *dataset* utilisé. Même après correction, on observe des différences entre les dynamiques issues des différents jeu de données, en particulier pour les deux premières modalités.

On peut noter aussi des différences entre les deux jeux de données. C'est flagrant pour la modalité «paillage synthétique», où il n'y a seulement que 5 observations dans le *dataset 1* produisant cette dynamique particulière. À cela se rajoute la variabilité du phénomène donnant des dynamiques très différentes pour des échantillonnages différents. Seule la sous-parcelle avec un enherbement haut présente des dynamiques similaires entre les deux jeux de données.

Les dynamiques de larves pour ce verger sont visibles sur la figure A.2.

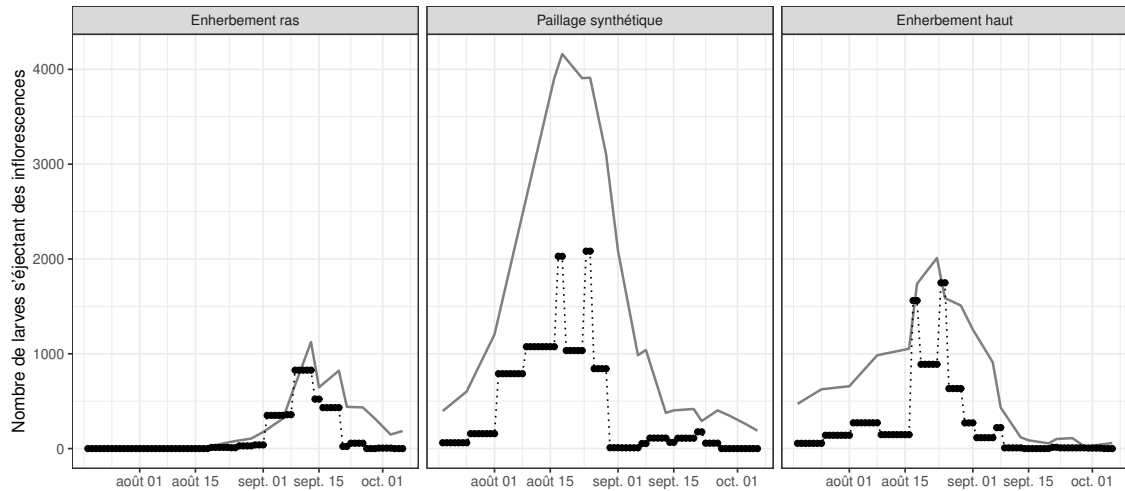


FIGURE A.2 – Dynamiques de larves s'éjectant des manguiers chaque jour dans le verger n°2 pour chacune des trois sous-parcelles. En gris sont visibles les dynamiques d'inflorescences vivantes.