

☐ CFR Angers ☒ CFR Rennes

Année universitaire : 2019-2020 Spécialité : Master Spécialisation (et option éventuelle) : Data Science pour la biologie	Mémoire de fin d'études ☐ d'ingénieur de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement ☐ de master de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage (AGROCAMPUS OUEST), école interne de l'institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement ☒ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)
--	---

Analyse des effets de la taille sur la floraison du manguier

Par : Mathis Cambreling

Soutenu à Rennes le 07 /12/1996

Devant le jury composé de :

Président :

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Maître de stage : Isabelle Grechi

Enseignant référent : Marie Pierre Etienne

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Table des matières

I) Introduction	1
II) Matériel et méthodes	4
A) Matériel végétal	4
B) Dispositif expérimental.....	4
C) Analyses statistiques.....	6
III) Résultats.....	10
A) Probabilité de floraison.....	10
B) Intensité de floraison	15
C) Dynamique de floraison.....	17
IV) Discussion.....	22
V) Bibliographie	24

I) Introduction

Le manguier à la Réunion

Le manguier (*Mangifera indica* L.), de la famille des *Anacardiaceae*, est un arbre fruitier que l'on retrouve dans de nombreuses régions tropicales et subtropicales. Il est cultivé dans une centaine de pays et son fruit est l'un des produits les plus consommés et exportés au monde, avec plus de 50 millions de tonnes produites en 2017 (Statistica, 2019). Atteignant jusqu'à 30m de hauteur et pouvant vivre plus de 100 ans, le manguier possède un feuillage persistant dont la durée de vie des feuilles est de 3 à 4 ans. Les inflorescences du manguier, regroupant des centaines ou milliers de fleurs, apparaissent aux extrémités des branches (floraison terminale). La plupart des variétés possèdent des fleurs hermaphrodites et mâles qui sont auto-fertiles. Le fruit du manguier est une drupe dont les caractéristiques morphologiques varient fortement avec la variété.

Le manguier s'adapte à de nombreux climats. Cependant, certaines exigences sont nécessaires pour obtenir de bons rendements. La première est une alternance d'une saison fraîche et sèche avec une saison chaude et humide. La température conditionne en effet fortement la croissance du manguier, avec un optimum compris entre 24 et 30 °C, et des températures fraîches (13-15°C) sont nécessaires pour déclencher la floraison (Whiley et al., 1989). Si les précipitations sont trop abondantes, les problèmes sanitaires du manguier augmentent, réduisant ainsi la rentabilité de la culture.

Pour ces raisons climatiques et sanitaires, la production de mangues à la Réunion est restreinte principalement sur le littoral Ouest de l'Île. Malgré ces contraintes, la mangue est l'une des cultures fruitières les plus importantes à la Réunion. C'est notamment le quatrième fruit le plus produit de l'île (Hoarau et al., 2009). La production repose sur deux variétés principales à La Réunion. La première, appelée José, originaire de l'île, représente la moitié des vergers et est uniquement consommée sur place (Vincenot et Normand, 2009). La seconde, originaire de Floride, s'appelle Cogshall et représente plus de 30% des surfaces de mangues plantées à la Réunion.

Pour cette étude, nous nous intéressons à la variété Cogshall, de grande importance économique à la Réunion et partageant de nombreuses caractéristiques similaires aux autres variétés floridiennes. De plus, un modèle d'élaboration du rendement et de la qualité de la mangue, développé par le Cirad, est paramétré sur cette variété. L'intégration à ce modèle de l'effet de la taille sur la floraison du manguier est souhaitée. Ceci permettra de prendre en compte l'effet de pratiques de culture - ici la taille - sur l'élaboration du rendement.

Cycle et rendement du manguiier

Le cycle du manguiier se caractérise par quatre stades phénologiques successifs : la croissance végétative, le repos végétatif, la floraison et la fructification (Figure 1). L'ensemble du cycle dure 18 mois.

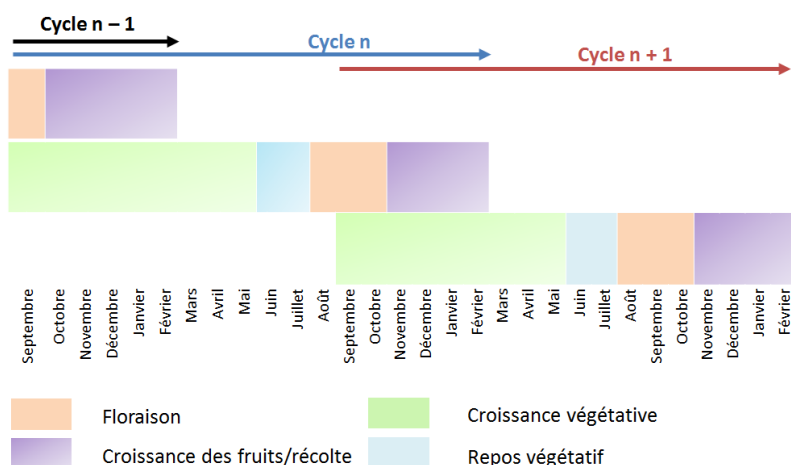


FIGURE 1: SUCCESSION ET SUPERPOSITION DANS LE TEMPS DE PLUSIEURS CYCLES DE PRODUCTION DU MANGUIER (PERSELLO, 2018)

La croissance végétative a lieu principalement après la récolte, pendant la saison chaude et pluvieuse, de janvier à mai. La croissance du manguiier est rythmique. Elle est caractérisée par de brefs épisodes de croissance ininterrompue appelés flushs. Chaque flush correspond à l'apparition d'unités de croissance (UCs).

Au début de l'hiver austral, avec la diminution de la température et des précipitations, la période de repos végétatif pour le manguiier débute. Cette période permet la maturation des UCs nécessaires à leur floraison.

Suite à cette période, la floraison du manguiier a lieu durant la période sèche et fraîche. Précédée par une période de division et d'élongation cellulaire, la nature d'un bourgeon est déterminée par l'initiation, phase de différenciation du bourgeon dépendant entre autres de la température et de la lumière (Whiley et al., 1989; Issarakraisila et al., 1997; Schaffer et al., 2009; Davenport, 2009). Elle conduit à la différenciation de la nature des bourgeons, végétatifs ou reproductifs, qui produisent une nouvelle unité de croissance ou une inflorescence, respectivement.

Par la suite, la croissance des fruits dure généralement 4 mois et se décompose en trois étapes. La division cellulaire permet de constituer l'ensemble des cellules du fruit. La période d'élongation cellulaire correspond à l'augmentation du volume du fruit avec l'accumulation d'eau et de matière sèche dans les cellules. Enfin, la maturation induite par la production d'éthylène provoque le mûrissement du fruit. La mangue étant un fruit climactérique, elle continue sa maturation une fois récoltée (Nordey, 2014).

Comme de nombreux arbres fruitiers tropicaux, le manguiier est sujet aux asynchronismes phénologiques (Bawa, 1983; Ims, 1990). Cela se traduit par un décalage des stades phénologiques du manguiier et peut induire un étalement de la floraison et de la fructification aussi bien inter qu'intra-arbres (Dambreville et al., 2015). Ces asynchronismes complexifient

la culture du manguier et rallongent la période de protection phytosanitaire contre les ravageurs des inflorescences et des fruits ainsi que la période de récolte des fruits.

Le rendement du manguier, en l'absence de dégâts de ravageurs, est dépendant de plusieurs facteurs :

- Le nombre d'axes terminaux dans la canopée pouvant potentiellement fleurir (croissance végétative)
- Le taux de floraison et l'intensité de floraison de ces axes (débourrement floral)
- Le taux et l'intensité de fructification des axes ayant fleuris
- Le poids des fruits à maturité (croissance des fruits)

La taille du manguier est une pratique culturale qui représente un sujet de recherche essentiel. En effet, la taille pourrait modifier directement ou indirectement chacun de ces facteurs.

Taille des arbres fruitiers

La taille est une pratique culturale importante pour la conduite des arbres fruitiers. Elle consiste à supprimer ou raccourcir de manière sélective des axes d'un arbre. En contrôlant la dimension des arbres et en permettant une meilleure aération de la canopée, la taille a facilité les opérations culturales, tel que le traitement des arbres et la récolte des fruits. Cela a aussi permis la culture intensive des vergers en maximisant le nombre d'arbres, le rendement et la surface foliaire par unité de surface de sol.

Par ailleurs, des études ont montré que la taille avait tendance à synchroniser la croissance végétative (Oosthuysen, 1994; Davenport, 2006; Persello et al., 2019). Cela pourrait induire une synchronisation des stades phénologiques suivants, (floraison et fructification) sur les arbres taillés qui faciliterait la conduite des vergers.

Cependant, la réaction des arbres à la taille est difficile à prévoir et varie selon les espèces. Certaines études ont par exemple montré que le rendement des arbres taillés pouvait être supérieur, similaire ou inférieur à celui des arbres non taillés. La complexité de cette réponse peut être liée à la complexité des effets de la taille sur le fonctionnement de l'arbre. Premièrement, la taille supprime des axes terminaux qui auraient pu porter des fruits, mais, en même temps, elle stimule aussi la croissance végétative (Marini, 2003; Davenport, 2009; Fumey et al., 2011; Elkhishen, 2015), générant par la suite de nouveaux axes. Deuxièmement, la surface foliaire de l'arbre diminue suite à la taille, affectant immédiatement la photosynthèse. Mais, pour les arbres fruitiers tropicaux, elle augmente également l'interception lumineuse des branches restantes, notamment dans le centre et les parties basses de la canopée, boostant indirectement l'activité photosynthétique des feuilles restantes (Schaffer et Gaye, 1989; Ferree et Schupp, 2003; Sharma et al., 2006). Troisièmement, la taille affecte les caractéristiques morphologiques, structurelles et temporelles des axes qui peuvent impacter fortement la floraison et la fructification (Lauri et Trottier, 2004; Normand et al., 2009; Gaaliche et al., 2011; Dambreville et al., 2013; Capelli et al., 2016).

Objectif

L'objectif de ce stage est de décrypter l'impact de la taille sur les processus relatifs à la floraison qui participent à l'élaboration du rendement du manguier. Pour cela, différentes modalités de taille ont été appliquées à l'échelle de l'axe et de l'arbre. Le but est de déterminer comment ces traitements agissent sur la floraison du manguier, floraison caractérisée en termes d'occurrence, d'intensité et de dynamique, aux échelles des axes et de l'arbre

II) Matériel et méthodes

A) Matériel végétal

1. Zone d'étude

La parcelle d'étude se situe sur la station expérimentation de Bassin-Plat du Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad) à Saint-Pierre, à la Réunion, à une altitude de 125m (21°19'S, 55°29'E). Elle est constituée de 153 manguiers plantés en 2004, de la variété Cogshall. Les arbres sont irrigués. Une protection phytosanitaire est appliquée, essentiellement contre les ravageurs et maladies des inflorescences et des fruits. Aucune fertilisation n'est apportée. La taille y est réalisée selon la méthode agricole classique, c'est-à-dire visant à aérer et réduire les dimensions de la canopée et favoriser une meilleure pénétration de la lumière, une année sur deux après la récolte ou avant la floraison. L'étude a été réalisée en 2016 et 2018 sur 12 arbres de cette parcelle, choisis chaque année parmi les arbres non taillés l'année précédente et présentant des canopées de dimensions similaires.

2. L'Unité de Croissance : l'individu statistique

La croissance végétative du manguiers est rythmique. L'axe feuillé mis en place durant une période ininterrompue de croissance est appelé unité de croissance (UC). Chaque UC nécessite un repos préalable à l'édification de l'UC suivante. Une UC peut être en position apicale ou latérale par rapport à celle qui la précède, suivant qu'elle s'est développée à partir du bourgeon apical ou d'un bourgeon axillaire de cette UC (figure 3). La démarcation entre deux UCs demeure aisément identifiable grâce aux cicatrices circulaires, laissées par les arrêts de croissance, qui les séparent. On établit ainsi facilement des liens de parenté entre les UCs successives, l'UC mère correspondant à celle portant une ou plusieurs UCs appelées alors UCs filles. Les UCs se situant à l'extrémité des branches sont dites terminales et ce sont leurs bourgeons les plus distaux qui vont se développer préférentiellement : on parle d'acrotonie. On définit la nature d'une UC par ce qu'elle porte : elle est végétative lorsqu'elle porte une autre UC ou reproductive lorsqu'elle porte une inflorescence. La croissance du manguiers est séquentielle, c'est-à-dire que les nouvelles UCs se développent sur des UCs terminales, à l'extrémité de la structure ligneuse de l'arbre. Cependant, certaines UCs peuvent également apparaître sur du vieux bois, à partir de bourgeons dormants. On parle alors de phénomène de réitération. Ces réitérations, rarement spontanées, se produisent principalement en réponse à un traumatisme comme la taille ou la casse d'une branche (Barthélémy et Caraglio, 2007).

B) Dispositif expérimental

1. Modalités de taille

La taille est caractérisée par deux facteurs, l'un au niveau de l'axe, l'autre au niveau de l'arbre. Le premier facteur, au niveau de l'axe, est la *sévérité* de taille. La *sévérité* de taille correspond à la profondeur du point de coupe le long de l'axe à tailler (Figure 2). Trois modalités de sévérité, appelées n1, n2 et n3, sont appliquées. Elles correspondent aux nombres d'UCs de l'axe principal retirées entre l'extrémité de l'axe et le point de coupe, soit respectivement 1, 2 et 3 UCs. Une dernière modalité, n0, correspond aux axes non taillés (la modalité témoin).

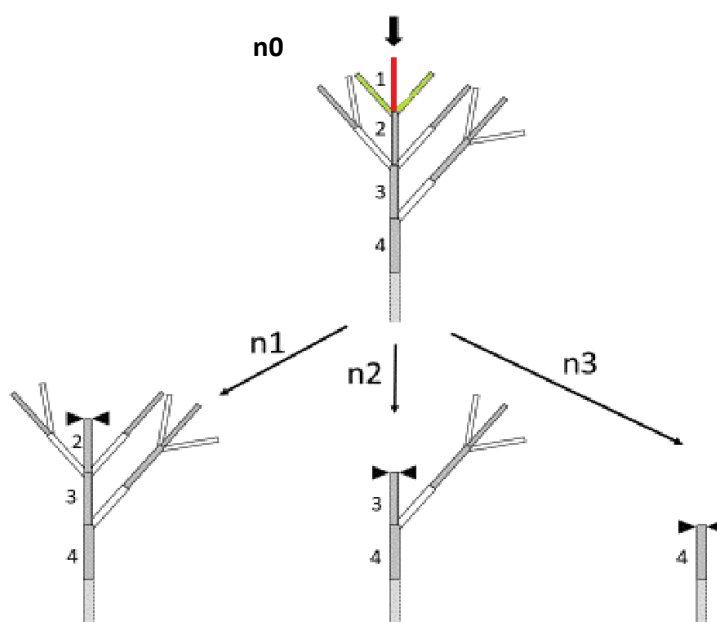


FIGURE 2 : SCHEMA REPRESENTANT LES DIFFERENTS TRAITEMENTS DE SEVERITE DE TAILLE APPLIQUES A UN AXE

La flèche représente l'axe non taillé (n0). Les triangles représentent le point de coupe selon la modalité de sévérité de taille qui est appliquée, n1, n2 ou n3. Le diamètre au point de coupe est mesuré à ce niveau. L'UC restante au niveau du point de coupe est celle qui est suivie pour sa croissance végétative ou sa floraison. La couleur rouge représente une UC fille en position apicale, la couleur verte représente deux UCs filles en position latérales.

Le second facteur, au niveau de l'arbre, est l'intensité de taille. L'intensité de taille correspond à la biomasse fraîche de canopée (feuilles et axes) retirée par unité de volume de canopée. Trois modalités d'intensité de taille sont considérées : T0 pour les arbres non taillés (considérée comme la modalité témoin), T1 pour les arbres faiblement taillés (0.16 kg de biomasse retirée par m³ de canopée) et enfin, T3 pour les arbres fortement taillés (0.51 kg de biomasse retirée par m³ de canopée).

2. Echantillonnages et variables suivis

L'échantillonnage s'effectue sur deux années (2016 et 2018). Chaque modalité d'intensité de taille est répétée sur 4 arbres, soit un total de 12 arbres échantillonnés par année. La taille est réalisée après la récolte, vers le 1^{er} février, en appliquant le même nombre de coupes de chaque sévérité de taille (n1, n2, n3), de façon aléatoire, sur l'ensemble de la canopée de chaque arbre. Ce nombre de coupes varie selon l'intensité de taille appliquée et le volume de canopée.

Sur chaque arbre, 30 UCs taillées (10 de chaque modalité de sévérité n1, n2 et n3) et 30 UCs non taillées (modalité de sévérité n0) sont échantillonnées sur l'ensemble de la canopée, juste après la taille. Parmi les UCs non taillées, 15 sont échantillonnées en position apicale et 15 en position latérale par rapport à l'UC sous-jacente (Figure 2). Le diamètre de chaque UC échantillonnée est mesuré au niveau du point de coupe pour les UCs taillées et à la base de l'UC pour les UCs non taillées.

De février à mai, qui correspond à la période de croissance végétative du manguiier, des suivis sont réalisés afin de noter le débourrement végétatif des UCs échantillonnées qui seront par la suite définies comme les UCs initiales. Pour chaque nouvelle UC, définie comme une UC fille des UCs initiales, on notera la date d'apparition, la position par rapport à l'UC mère et les

caractéristiques morphologiques (diamètre de l'UC, nombre de feuilles, longueur et largeur du limbe de la feuille médiane, position). A partir de ces variables, la surface foliaire (*Sfol*) est calculée pour chaque UC fille.

$$Sfol = 0.74 * Longueur\ limbe * largeur\ limbe * nbr\ feuilles$$

Sfol est fortement corrélée avec le diamètre basal. La surface foliaire remplace la variable diamètre pour les UCs filles, le diamètre des UCs filles n'ayant pas été mesuré les deux années.

Comme le diamètre et la surface foliaire des UCs filles sont fortement corrélés et que le diamètre n'a été mesuré qu'une seule des deux années, la surface foliaire sera retenue préférentiellement au diamètre pour les analyses de la réponse à la taille des UCs filles.

De mi-juillet à fin septembre est effectué le suivi de la floraison des UCs en position terminale (la floraison apparaît en position terminale chez le manguiier). Ces UCs sont soit les UCs initiales si elles n'ont pas donné d'UCs filles, soit les UCs filles. Comme pour le débourrement végétatif, les dates d'apparition et le nombre d'inflorescences sont relevées.

Un échantillonnage supplémentaire à celui énoncé ci-dessus est réalisé entre la croissance végétative et la floraison afin d'évaluer la réponse moyenne de l'arbre en fonction des traitements de taille appliqués et la proportion des différents types d'UCs terminales qui en résulte (i.e., UCs taillées ou non taillées et UCs initiales ou UCs filles). Pour ce faire, 60 UCs terminales sont échantillonnées aléatoirement sur l'ensemble de la canopée de chaque arbre et suivies pendant la floraison comme énoncé précédemment.

C) Analyses statistiques

1. Echelles d'analyse, variables réponses et variables explicatives

Description des échelles d'analyses

Afin d'avoir une vision complète de la réponse de floraison du manguiier à la taille, les analyses se font à trois échelles différentes.

L'échelle de l'arbre (échelle 1) :

Les analyses à cette échelle se font sur les 60 UCs terminales par arbre de l'échantillonnage supplémentaire. Cette échelle représente la réalité agronomique que l'on observe sur le terrain. Seul l'effet du facteur intensité est testé dans le but d'observer la réponse de l'arbre aux différents traitements.

L'échelle de l'UC initiale (échelle 2) :

Les analyses à cette échelle se font sur les UCs initiales, taillées et non taillées, échantillonnées après la taille. A cette échelle, on réalise deux analyses. Une première analyse sur l'ensemble des UCs initiales, qu'on appelle modèle globale. Une seconde analyse seulement sur les UCs ayant débourré (une ou plusieurs UCs filles). Ce sous-modèle permet de prendre en compte plus finement la croissance végétative dans la réponse à la floraison.

L'échelle de l'UC terminale (échelle 3) :

Les analyses à cette échelle se font sur les UCs filles terminales, c'est-à-dire les filles des UCs initiales, apparues après la taille. À cette échelle, on distingue deux populations d'UCs : les UCs filles d'UCs non taillées (UCnt-f) et les UCs filles d'UCs taillées (UCt-f). Ces populations sont traitées séparément pour plusieurs raisons. Premièrement, cela permet d'éviter la colinéarité entre les facteurs explicatifs. De plus, les populations ont des variables explicatives spécifiques (la position pour les UCs non taillées, la sévérité pour les UCs taillées).

Variables réponses

Trois variables réponses sont considérées afin de comprendre la réponse de floraison du manguier à la taille : la probabilité de floraison (Y1), l'intensité de floraison (Y2) et la dynamique de floraison (Y3).

La première variable réponse à laquelle on s'intéresse est la probabilité de floraison des UCs, qui est une variable binaire Y1 (Oui/Non). Une UC appartient à la modalité *Oui* si elle a fleuri. A l'échelle de l'UC initiale, l'UC appartient à la modalité *Oui* si elle a au moins une de ses UCs filles qui a fleuri. Cette variable est exprimée en pourcentage.

La seconde variable réponse, considérée uniquement pour les UCs ayant fleuri, est l'intensité de floraison, traduite par une variable de comptage Y2 correspondant au nombre d'inflorescences, supplémentaires à la première inflorescence, produites par UC. Pour les UCs initiales ayant débourré végétativement, le nombre d'inflorescences est calculé en sommant le nombre d'inflorescences des UCs filles.

La troisième variable réponse est la dynamique de floraison. Il s'agit de la distribution d'une variable Y3 correspondant au nombre de jours entre la date de taille de l'arbre et la date d'apparition de la ou des inflorescences sur chaque UC ayant fleuri (que l'on appellera date de floraison par la suite). Pour les UCs initiales ayant débourré végétativement, la date de floraison correspond à la première date de floraison la plus précoce de ses UCs filles.

Variables explicatives

TABEAU 1 : PRESENTATION DES VARIABLES EXPLICATIVES

Facteur	Type	Description	Echelles (et UCs*) concernées
Intensité	Qualitatif ordonné	Quantité de biomasse fraîche retirée par arbre, 3 modalités (T0<T1<T3)	Echelle 1, 2 et 3
Sévérité	Qualitatif ordonné	Profondeur du point de coupe le long de l'axe, 4 modalités (n0 < n1 < n2 < n3)	Echelle 2 et 3**
Position	Qualitatif	Position de l'UC terminale par rapport à l'UC sous-jacente, 2 modalités (apicale et latérale)	Echelle 3 (UCs non taillées)
Année	Qualitatif	Année du suivi, 2 modalités (2016 et 2018)	Echelle 2 et 3
Diamètre (diam)	Quantitatif	Diamètre de l'UC au point de coupe pour les UCs taillées et à la base pour les UCs non taillées (en mm)	Echelle 2

Surface foliaire (Sfol)	Quantitatif	Surface Foliaire de l'UC	Echelle3 (UCs filles)
Nbr Sœurs	Quantitatif	Pour une UC fille, nombre d'autres UCs filles présentent sur la même UC sous-jacente	Echelle3 (UCs filles)
Fille	Qualitatif	Présence d'au moins une UC fille sur une UC, 2 modalités (oui et non)	Echelle2
Nbr Filles	Quantitatif	Nombre d'UCs filles produites par une UC	Echelle2 (UCs initiales ayant débourré)
Délais de débourement (ddeb)	Quantitatif	Nombre de jour entre le jour de taille et le débourement végétatif de l'UC fille	Echelle 3

*par default toutes les UCs sont concernées

**à l'échelle 3 (UCs terminales), la sévérité considérée est celle de l'UC initiale portant l'UC terminale fille

2. Méthodologie statistique :

Choix du modèle

Pour modéliser la probabilité de floraison en fonction des variables explicatives, un GLMM binomial avec une fonction de liaison logarithmique a été utilisé (fonction `glmer` du package *lme4*). La distribution binomiale est utilisée pour les données binaires (oui/non).

Pour modéliser l'intensité de floraison en fonction des variables explicatives, un GLMM suivant une loi binomiale négative avec une fonction de liaison logarithmique a été utilisé (fonction `bglmer` du package *lme4*). La distribution binomiale négative est utilisée pour les données de comptage présentant de la sur-dispersion, et pour lesquelles la distribution de Poisson n'est pas adaptée.

Pour modéliser la dynamique de floraison, variable suivant une distribution gaussienne, en fonction des variables explicatives, un modèle linéaire mixte a été utilisé (fonction `lmer` du package *lme4*).

Pour tenir compte de la dépendance entre les observations, un ou plusieurs facteurs aléatoires sont ajoutés en fonction de l'échelle étudiée. Pour l'échelle de l'arbre et de l'UC initiale, seul l'effet *arbre* est considéré aléatoire. Pour l'échelle de l'UC terminale, les populations d'UCs filles ont également une dépendance supplémentaire à prendre en compte : leur UC mère commune. Un effet aléatoire *UC initiale* en plus de l'effet *arbre* est alors rajoutée. L'imbrication des effets aléatoires est testée sur le modèle final. Les effets imbriqués ne sont conservés que s'ils améliorent significativement le modèle.

Il a été choisi de considérer le facteur année comme effet fixe et non comme aléatoire. Ce choix s'explique par le nombre restreint de modalités (seulement deux) et par l'intérêt d'identifier de potentielles variations de réponse à la taille en fonction des années.

Afin d'éviter des problèmes de convergence de la fonction de vraisemblance, le nombre d'itérations a été augmenté à 100 000. De plus, le calcul des dérivées exactes a été désactivé, permettant une simplification de la convergence en contrepartie d'une approximation moins précise des erreurs standards des effets fixes.

Sélection des variables

La sélection des variables explicatives se fait par stratégie top-down. On part du modèle le plus complexe (modèles initiaux voir ci-dessous) que l'on simplifie en enlevant un à un les termes les moins significatifs, en commençant par les interactions (seuil alpha fixé à 0.05). Un test d'analyse de variance de type III (fonction Anova du package *car*) est réalisé dans ce but à chaque nouvelle étape de sélection du modèle. Les termes d'interaction testés se limitent à l'ordre 2 et contiennent au moins un facteur de taille (*intensité* ou *sévérité* pour les échelles 2 et 3 de l'UC initiale et de UC terminale) ou du facteur *position* pour les UCs non taillées. En effet, il a été démontré qu'il y avait des différences de comportement des UCs en termes de croissance végétative et de reproduction selon leur *position* apicale ou latérale (Normand et al., 2009). Les facteurs non significatifs sont tout de même gardés dans le modèle final s'ils sont compris dans une ou plusieurs interactions significatives.

Validation et qualité d'ajustement

Les structures des résidus du modèle sont observées afin de vérifier l'ajustement du modèle et la validation du modèle (normalités et indépendances des résidus). Il sera précisé dans les résultats si le modèle ne valide pas les hypothèses.

Afin de tester la qualité d'ajustement des modèles, l'indicateur « accuracy », soit le taux d'UCs bien classées par le modèle, a été utilisé pour les GLMM binomiaux (probabilité de floraison). Le seuil qui départage la modalité de d'échec de la modalité de succès est fixé à 0.5. Pour les GLMM sur les données de comptage (intensité de floraison) et pour les modèles linéaires mixtes, l'indicateur utilisé est le R^2 , soit la corrélation au carré entre les données observées et les valeurs prédites par le modèle.

Visualisation et test post-hoc

La visualisation des effets des facteurs et interactions significatifs est réalisée en représentant graphiquement les effets marginaux. Ces derniers reflètent les différences de valeur que prend la variable réponse en fonction des facteurs explicatifs qu'on cherche à représenter selon ledit modèle. Les autres facteurs significatifs compris dans le modèle sont gardés à un niveau moyen dans l'intercept, de telle sorte que la somme des coefficients des modalités de chaque facteur est égale à 0. Des intervalles de confiances à 95%, calculés par test ratio de vraisemblance.

Des tests post-hoc sont réalisés par la suite sur les facteurs et interactions significatifs de plus de deux modalités en comparant la moyenne des effets marginaux avec le package « *lsmeans* ». L'ajustement de la p-value est fait avec la méthode « FDR ». Les modalités qui ne sont significativement pas différentes sont représentées par une même lettre.

Les effets simples des facteurs ne sont pas représentés s'ils sont compris dans une ou plusieurs interactions.

Logiciel et packages

Les analyses sont réalisées sur le logiciel RStudio Version 1.2.5033. La version 1.1-23 du package *lme4* est utilisée pour construire les modèles et le package *car* version 3.0-8 pour le test d'analyse de variance de type III. Les effets marginaux et les intervalles de confiances sont calculés avec le package *ggeffects* version 0.15.0. Les représentations graphiques sont réalisées avec le package *ggplot2* version 3.3.2.

Présentation des modèles initiaux

Echelle de l'arbre

$$Y1 \sim \text{Binomial}(\mu), Y2 \sim \text{BN}(\mu, \sigma^2), Y3 \sim N(\mu, \sigma^2)$$

$$Y1/Y2/Y3 = \mu + \text{intensité}_i + \text{Arbre}_j + \varepsilon_{ij}$$

$$\text{Arbre}_n \sim N(0, \sigma_j^2), \varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \text{ et sont indépendants}$$

Echelle de l'UC initiale

$$Y1 \sim \text{Binomial}(\mu), Y2 \sim \text{BN}(\mu, \sigma^2), Y3 \sim N(\mu, \sigma^2)$$

$$\begin{aligned} Y1/Y2/Y3 = & \mu + \text{intensité}_i + \text{sévérité}_j + \text{année}_l + \text{diamètre}_k + \text{fille}_m \\ & + \text{intensité} \times \text{sévérité}_{ij} + \text{intensité} \times \text{année}_{il} + \text{severité} \times \text{année}_{jl} \\ & + \text{intensité} \times \text{diamètre}_{ik} + \text{sévérité} \times \text{diamètre}_{jk} + \text{intensité} \times \text{fille}_{im} \\ & + \text{sévérité} \times \text{fille}_{jm} + \text{Arbre}_n + \varepsilon_{ijklmn} \end{aligned}$$

$$\text{Arbre}_n \sim N(0, \sigma_n^2), \varepsilon_{ijklmn} \sim N(0, \sigma^2) \text{ et sont indépendants}$$

Pour le sous modèle en prenant en compte la réponse végétative à cette échelle, le facteur *fille* est remplacé par le facteur *Nbr Filles*.

Echelle de l'UC terminale

$$Y1 \sim \text{Binomial}(\mu), Y2 \sim \text{BN}(\mu, \sigma^2), Y3 \sim N(\mu, \sigma^2)$$

$$\begin{aligned} Y1/Y2/Y3 = & \mu + \text{intensité}_i + \text{sévérité}_j + \text{année}_l + \text{sfol}_k + \text{nbr soeurs}_m + \text{ddeb}_n \\ & + \text{intensité} \times \text{sévérité}_{ij} + \text{intensité} \times \text{sfol}_{ik} + \text{sévérité} \times \text{sfol}_{jk} \\ & + \text{intensité} \times \text{année}_{il} + \text{severité} \times \text{année}_{jl} + \text{intensité} \times \text{nbr soeurs}_{im} \\ & + \text{sévérité} \times \text{nbr soeurs}_{jm} + \text{intensité} \times \text{ddeb}_{in} + \text{sévérité} \times \text{ddeb}_{jn} \\ & + \text{Arbre}_o + \text{UC initiale}_p + \varepsilon_{ijklmnop} \end{aligned}$$

$$\text{Arbre}_n \sim N(0, \sigma_n^2), \text{UC mère}_o \sim N(0, \sigma_o^2), \varepsilon_{ijklmno} \sim N(0, \sigma^2) \text{ et sont indépendants}$$

Pour le modèle de la population UCnt-f, le facteur *sévérité* est remplacé par le facteur *position*.

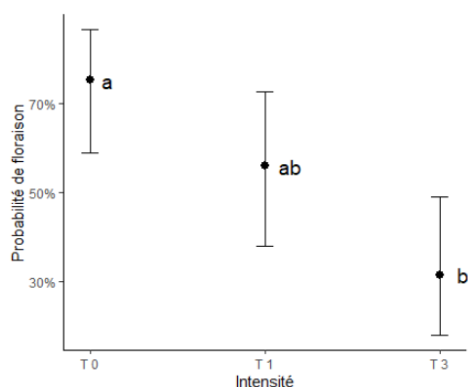
III) Résultats

Les résultats sont présentés pour chacune des trois variables réponses et en fonction des trois échelles décrites ci-dessous afin d'avoir une vision complète de la réponse de floraison du manguier à la taille.

A) Probabilité de floraison

Echelle de l'arbre

On s'intéresse aux 60 UCs échantillonnées aléatoirement à l'échelle de l'arbre, soit un total de 1440 UCs, dont 152 UCs dont les axes ont été taillés.



L'intensité de taille a un effet significatif et négatif sur la probabilité de floraison (Chisq=12.40, P-value=0.002). Les arbres non taillés (T0) fleurissent plus que les arbres faiblement taillés (T1), qui, eux-même, fleurissent plus que les arbres fortement taillés (T3, Figure 3).

FIGURE 3 : EFFET DE L'INTENSITE DE TAILLE SUR LA PROBABILITE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'ARBRE

Echelle des UCs initiales :

Modèle global

Premièrement, un modèle global est réalisé sur l'ensemble des UCs initiales. L'échantillonnage est de 1200 UCs (720 UCs non taillées et 480 UCs taillées).

TABLEAU 2 : FACTEURS SIGNIFICATIFS DU MODELE GLOBAL A L'ECHELLE 2 DE L'UC INITIALE SUR SA PROBABILITE DE FLORAISON

	Chisq	Df	P-value
(Intercept)	19.482	1	0.000
intensite	13.434	2	0.001
severite	44.217	3	0.000
annee	3.247	1	0.072
diam	6.919	1	0.009
filie	2.870	1	0.090
severite:annee	13.905	3	0.003
intensite:diam	13.908	2	0.001
intensite:filie	11.126	2	0.004

Le modèle final obtenu après sélection des variables explicatives (Tableau 2) possède une « accuracy » de 75 % avec l'effet aléatoire *arbre* et de 70% sans. Trois interactions sont présentes dans le modèle : *sévérité : année*, *intensité : sévérité* ainsi qu'*intensité : fille* (Tableau 2). Le facteur diamètre est également significatif.

Plus la *sévérité* de taille est importante, plus la probabilité de floraison diminue. Pour les UCs non taillées (n0), plus l'*intensité* de taille est forte, plus la probabilité de floraison diminue, avec une diminution significative pour la modalité T3 (Figure 1 A). Pour les UCs taillées (n1, n2, n3), l'*intensité* de taille ne semble pas avoir d'effet.

De plus, la probabilité de floraison diminue avec l'*intensité* de taille pour les UCs initiales n'ayant pas débouffées (facteur *filie*), tandis que l'*intensité* de taille n'a pas d'effet sur les UCs initiales ayant débouffées (Figure 4 B).

L'année 2016 a été une année plus propice à la floraison. La différence avec 2018 est plus marquée pour les UCs non taillées (Figure 4C). Le diamètre de l'UC initiale impacte la probabilité de floraison. Plus il est important, plus la probabilité de floraison augmente (Figure 4D).

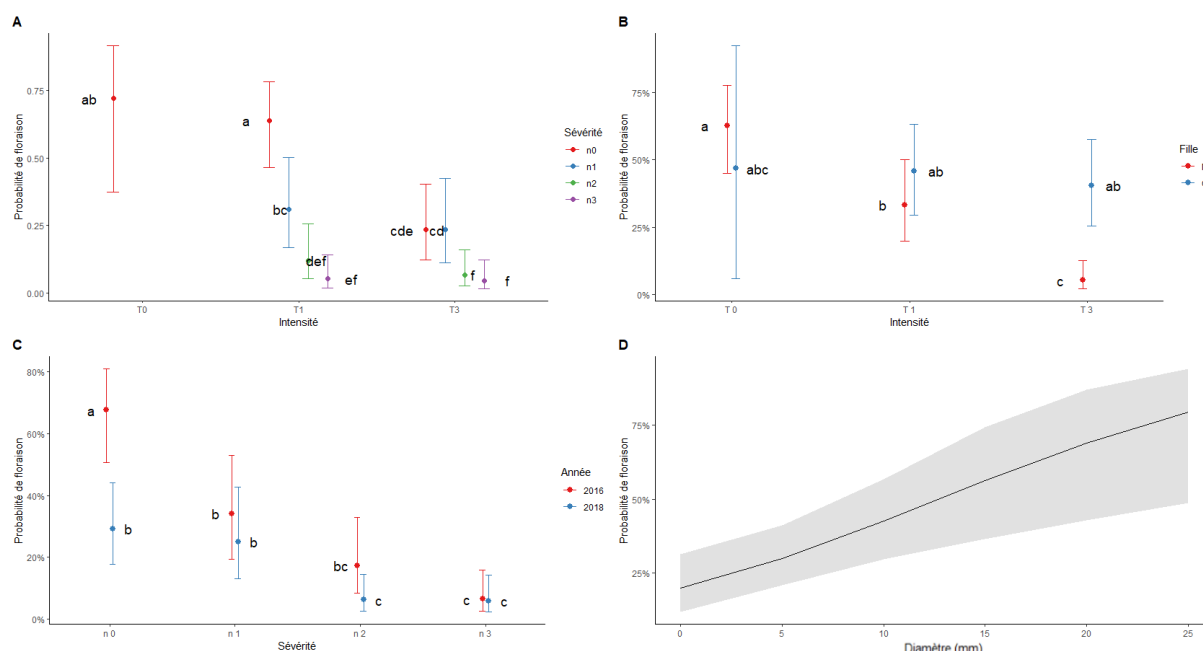


FIGURE 4 : EFFETS MARGINAUX DES FACTEURS SIGNIFICATIFS DU MODELE GLOBAL A L'ECHELLE 2 DE L'UC INITIALE SUR SA PROBABILITE DE FLORAISON

Sous-modèle en prenant en compte la réponse végétative

L'échantillonnage ne comporte désormais que les UCs ayant débourré, ce qui représente un total de 573 UCs (344 UCs taillées et 229 UCs non taillées). La modalité T0 du facteur *intensité* étant très peu représentée dans ce nouvel échantillonnage (seulement 3 UCs), elle est retirée de l'analyse.

TABLEAU 3 : FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS-MODELE RELATIF AUX UCs INITIALES AYANT EMIS DES UCs FILLES APRES LA TAILLE SUR LA PROBABILITE DE FLORAISON

	Chisq	Df	P-value
(Intercept)	21.752	1	0.000
intensite	3.887	1	0.049
severite	50.247	3	0.000
annee	4.036	1	0.045
nbr filles	18.135	1	0.000
intensite:annee	3.894	1	0.048
severite:annee	11.517	3	0.009
intensite:nbr filles	14.447	1	0.000

L'« accuracy » du sous-modèle-final est similaire à celle du modèle précédent avec 74% (70% sans l'effet aléatoire). La variance de l'effet aléatoire *arbre* est également identique (0.664 pour ce sous-modèle et 0.684 pour le modèle global).

On retrouve la même interaction, *sévérité : année*, que dans le modèle précédent avec les mêmes effets observés (Figure 5B). L'interaction *intensité : année*, faiblement significative (P-value=0.046, Tableau 3) montre une différence de probabilité de floraison entre les deux années pour la modalité T3 (Figure 5A). L'interaction significative *intensité : UCf* montre que plus le nombre d'UCs filles est important, plus la probabilité de floraison de l'UC initiale augmente, augmentation beaucoup plus marquée pour la modalité T3 (Figure 5C).

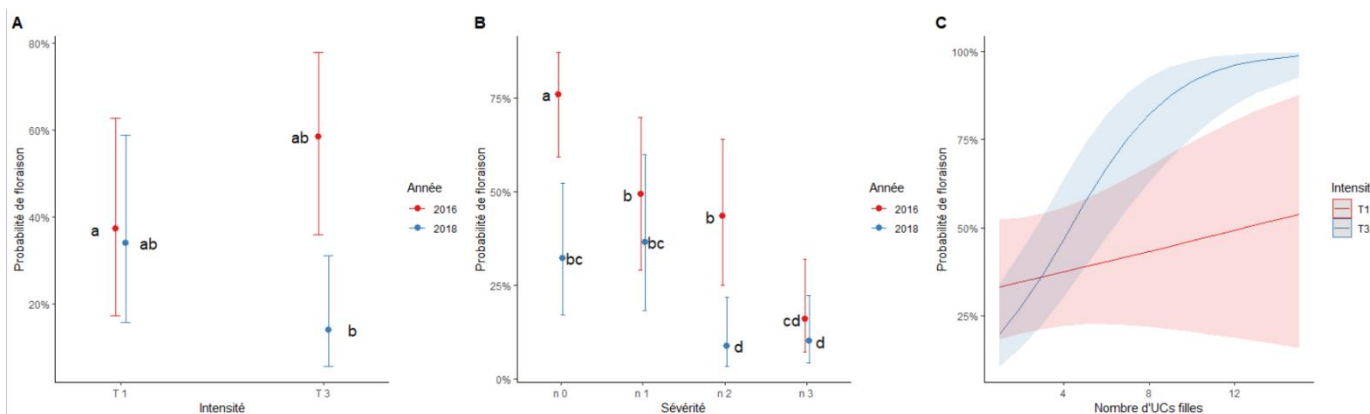


FIGURE 5 : EFFETS MARGINAUX DES FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS-MODELE RELATIF AUX UCs INITIALES AYANT EMIS DES UCs FILLES APRES LA TAILLE SUR LA PROBABILITE DE FLORAISON

Echelles 3 des UCs terminales

UCt-f

La première population correspond aux UCs filles issues des UCs taillées. Il s'agit de la population la plus commune avec 1273 individus.

TABEAU 4 : FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS-MODELE CONCERNANT LA POPULATION UCt-F A L'ECHELLE DE L'UC TERMINALE SUR LA PROBABILITE DE FLORAISON

	Chisq	Df	P-Value
(Intercept)	21.829	1	0.000
severite	24.372	2	0.000
annee	2.445	1	0.118
sfol	32.334	1	0.000
nbr soeurs	5.364	1	0.021
severite:annee	7.814	2	0.020
intensite:sfol	8.081	2	0.018

L'« accuracy » excellente du modèle de 93 % est en partie dû à l'effet aléatoire *UC initiale* qui explique une variabilité très importante (« accuracy » de 75% sans les effets aléatoires). Le profil des résidus s'éloigne d'une loi normale, avec une concentration anormalement importante autour de 0. Cela est sans doute dû à un type d'UCs très bien classé. Il s'agirait des UCs ne possédant aucune sœur. L'effet aléatoire *UC initiale* ajoute pour ces UCs une fausse dépendance augmentant anormalement la qualité d'ajustement. Les autres profils d'UCs (UCs ayant plus d'une UC sœur) demeurent bons avec une « accuracy » supérieure à 85%, confirmant que le modèle est tout de même bien ajusté au reste des données.

L'interaction *sévérité : année* est significative (Tableau 4). On retrouve l'effet négatif de la sévérité sur les UCs filles. Plus la sévérité est forte, plus la probabilité de floraison est faible. Les UCs des années 2016 ont une

probabilité de floraison globalement plus importante que celles de 2018, effet particulièrement marqué quand les UCs ont subi la sévérité de taille n2. On remarque également une baisse globale de la probabilité de floraison plus la sévérité de taille est importante. (Figure 6A). De plus, la probabilité de floraison augmente avec la surface foliaire d'autant plus rapidement pour les UCs filles issues de la sévérité n1 (Figure 6B). Il existe également une relation positive entre le nombre de sœurs que possède une UC fille avec la probabilité de floraison de cette dernière.

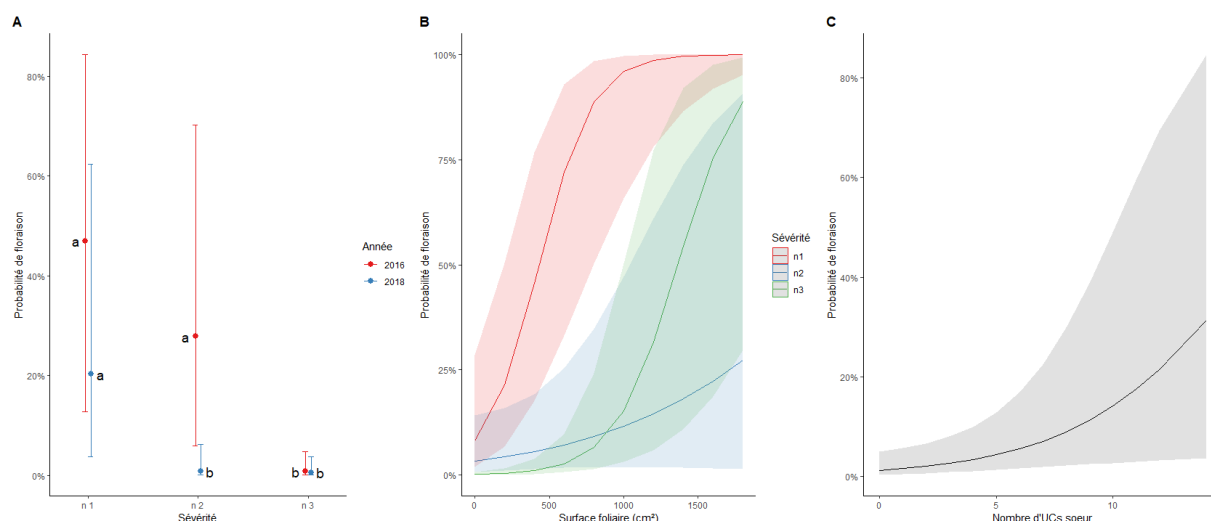


FIGURE 6 : EFFETS MARGINAUX DES FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE CONCERNANT LA POPULATION UCT-F A L'ECHELLE DE L'UC TERMINALE SUR LA PROBABILITE DE FLORAISON

UCnt-f

La quatrième population correspond aux UCs filles issues des UCs non taillées. La population dénombre 344 individus. On retire les UCs d'intensité de taille T0, très peu représentées dans cette population.

TABLEAU 5 : FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE CONCERNANT LA POPULATION UCT-F A L'ECHELLE DE L'UC TERMINALE SUR LA PROBABILITE DE FLORAISON

	Chisq	Df	P-Value
(Intercept)	6.430	1	0.011
intensite	0.404	1	0.525
position	18.045	1	0.000
annee	15.239	1	0.000
sfol	6.086	1	0.014
nbr soeurs	1.526	1	0.217
intensite:annee	6.407	1	0.011
position:nbr soeurs	12.073	1	0.001

Le modèle possède une «accuracy» de 85% («accuracy» de 74% sans les effets aléatoires *UC initiale* et *arbre*). Les interactions *intensité : année*, *position : nbr sœurs* ainsi que le facteur *sfol* sont significatifs (Tableau 5). L'*intensité* de taille impacte négativement la probabilité de floraison. Cependant, lors de l'année 2016, les UCs issues des arbres T3 ont fleuri aussi bien que celles issues d'arbres taillés à plus faible intensité (T1, Figure 7A). On retrouve également la relation positive entre *surface foliaire* et probabilité de floraison (Figure 7B). De plus, pour les UCs latérales, plus elles ont de sœurs plus elles ont de chance de fleurir. Les UCs apicales ne semblent pas être impactées par ce phénomène (Figure 7 C).

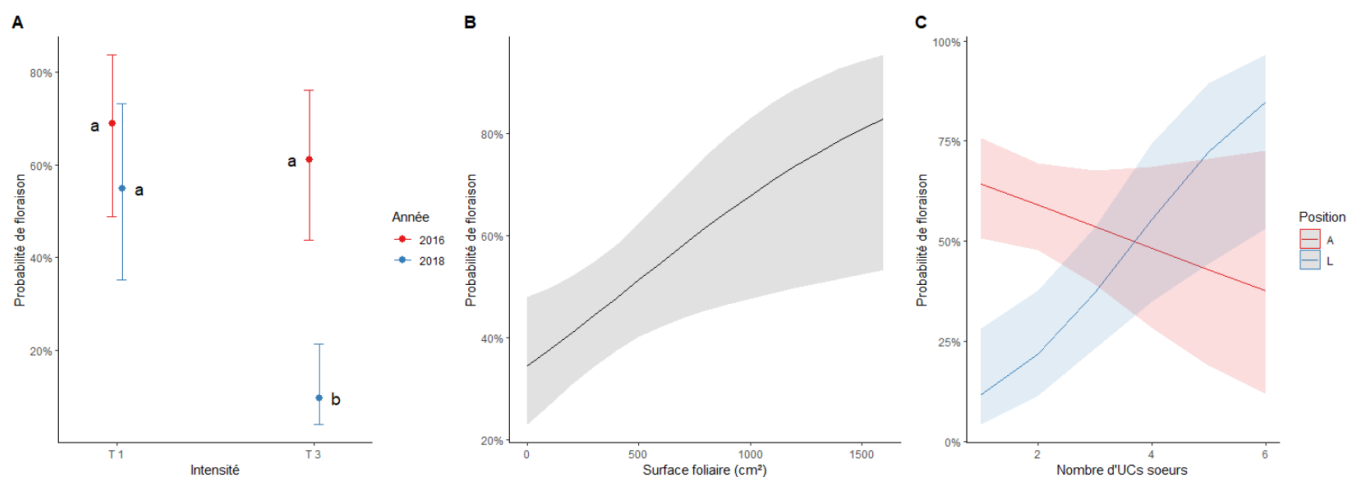


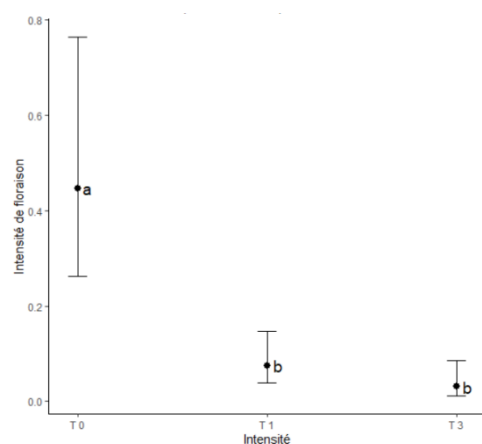
FIGURE 7 : EFFETS MARGINAUX DES FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE CONCERNANT LA POPULATION UCNT-F A L'ECHELLE DE L'UC TERMINALE SUR LA PROBABILITE DE FLORAISON

Résumé probabilité de floraison

Pour résumer, la taille du manguier impacte négativement la probabilité de floraison de ses UCs (échelle de l'arbre, Figure 3). La probabilité de floraison est impactée globalement par le facteur *intensité* de taille, cependant cela ne concerne que les UCs non taillées à l'échelle de l'UC initiale (Figure 4A) et terminale (Figure 7). La probabilité de floraison est également influencée par des facteurs locaux. Parmi ces facteurs locaux, la *sévérité* de taille impacte négativement la probabilité de floraison des UCs initiales et terminales. Plus un axe est sévèrement taillé, moins celui-ci a de chance de fleurir (Figure 6C et Figure 10A). Les autres facteurs locaux sont d'ordre morphologiques et structuraux. Le *diamètre* impacte positivement la probabilité de floraison des UCs initiales (Figure 4D), tout comme le *nombre de filles* quand la réponse végétative est prise en compte dans le modèle (Figure 5C). Pour l'échelle de l'UC terminale, la *surface foliaire* ainsi que le *nombre d'UCs sœurs* sont les facteurs locaux qui impactent positivement la probabilité de floraison que ce soit pour la population UCt-f ou UCnt-f. (Figure 6C et 7C). De plus, un effet *année* est significatif, l'année 2016 ayant globalement été meilleure en termes de probabilité de floraison.

B) Intensité de floraison

L'échelle de l'arbre



On s'intéresse seulement aux UCs qui ont fleuri, soit un total de 773 UCs pour l'échantillonnage qui correspond à l'échelle de l'arbre.

FIGURE 8 : EFFET DE L'INTENSITE DE TAILLE SUR L'INTENSITE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'UC L'ARBRE

L'intensité de taille a un effet très significatif sur l'intensité de floraison (Chisq=29.09, P-value<0.001). Les arbres non taillés (T0) ont une intensité de floraison plus importante que les arbres taillés (T1 et T3) et il n'y a pas de différences entre ces intensités de taille (Figure 8).

L'échelle de l'UC initiale

Modèle global

On s'intéresse à l'intensité de floraison des UCs initiales qui ont fleuri. Premièrement un modèle global est réalisé sur l'ensemble de ces UCs. L'échantillonnage comprend 509 UCs (140 UCs taillées et 369 UCs non taillées).

	Chisq	Df	P-Value
(Intercept)	9.113	1	0.003
intensite	10.774	2	0.005
severite	27.175	3	0.000
annee	5.460	1	0.019
diam	25.160	1	0.000
intensite:annee	16.013	2	0.000
intensite:diam	22.319	2	0.000

TABLEAU 6 : FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE A L'ECHELLE DE L'UC INITIALE SUR L'INTENSITE DE FLORAISON

Un certain nombre d'effets sont significatifs (Tableau 6). Cependant, les résidus du modèle ne sont pas normaux. En effet le modèle s'ajuste très mal aux données (résidus non normaux, $R^2=0.27$). Les variables explicatives utilisées dans le modèle ne semblent pas suffisantes pour expliquer correctement la variance des données. L'interprétation des effets significatifs du modèle n'est dans ce cas pas possible.

Sous modèle en prenant en compte la réponse végétative

On introduit à présent le nombre d'UCs filles en variable explicative et on ne considère que les UCs initiales ayant débouffées durant la croissance végétative.

TABLEAU 7 : FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE A L'ECHELLE DE L'UC INITIALE SUR L'INTENSITE DE FLORAISON

	Chisq	Df	P-Value
(Intercept)	68.863	1	0
severite	26.468	3	0
nbr filles	130.264	1	0
severite:nbr filles	38.985	3	0

Pour ce modèle, les résidus de Pearson du modèle ont un profil qui se rapproche d'une loi normale et le modèle a une meilleure qualité d'ajustement ($R^2=0.51$ avec et sans effet aléatoire). L'ajout de la variable *nbr fille* est donc important dans l'explication de la variabilité de l'intensité de floraison (Tableau 7). L'intensité de floraison augmente avec le nombre d'UCs filles de l'UC initiale, mais de façon différenciée en fonction de la *sévérité* de taille. Plus la sévérité est forte, moins l'effet *nbr fille* est important (Figure 9).

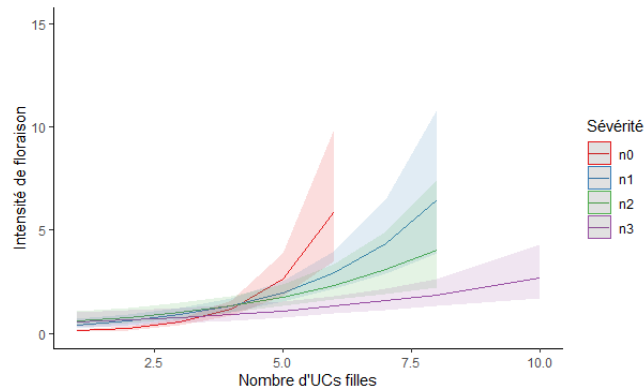
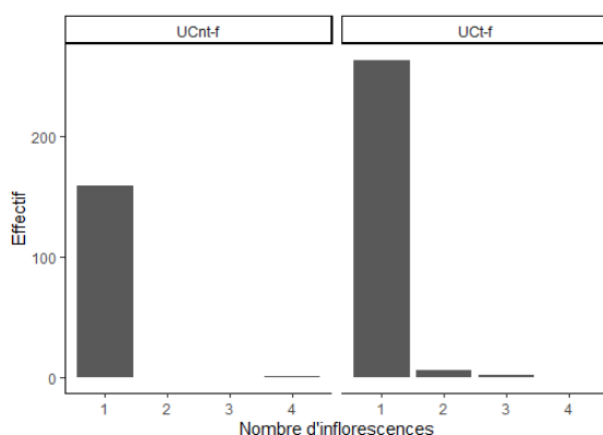


FIGURE 9 : EFFETS MARGINAUX DES FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE A L'ECHELLE DE L'UC INITIALE SUR L'INTENSITE DE FLORAISON

L'échelle de l'UC terminale



Il est difficile de réaliser des modèles à cette échelle. On observe peu de variabilité dans les données, la quasi-totalité des UCs filles ne donnant qu'une inflorescence (Figure 10, UCt-f et UCnt-f). Les deux populations ne seront pas analysées.

FIGURE 10 : REPRESENTATION DE LA DISTRIBUTION DE L'INTENSITE DE FLORAISON POUR LES SOUS POPULATIONS D'UCs FILLES TERMINALES

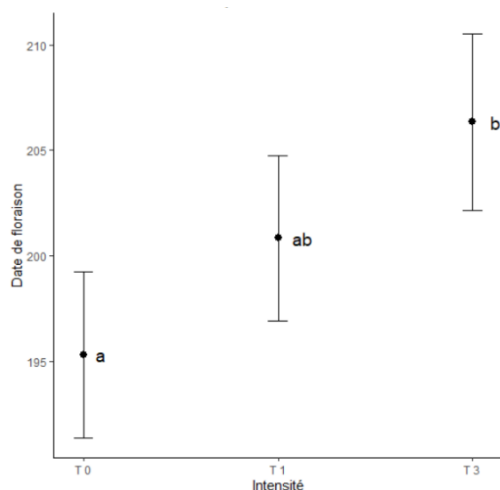
Résumé intensité florale

Pour résumer, la taille du manguiier impacte négativement l'intensité de floraison (échelle de l'arbre, Figure 8). L'effet au niveau global du facteur *intensité* de taille ne ressort pas à l'échelle de l'UC initiale et terminale. Cependant, les facteurs locaux comme la *sévérité* de taille et le *nombre d'UCs filles* sont significatifs. Le *nombre d'UCs filles* est un facteur important expliquant fortement la variabilité de l'intensité de floraison : celui-ci étant positivement corrélé avec le nombre d'inflorescences produites. Cependant, plus l'UC est sévèrement taillée, moins l'effet de ce facteur est fort. (Figure 9). Il n'a pas été possible d'analyser l'échelle de l'UC terminale, car il n'y a quasiment pas de variabilité dans la réponse de l'intensité de floraison pour ces UCs. Quand les UCs terminales filles fleurissent (UCt-f, UCnt-f), elles ne le font qu'une fois (Figure 10). Contrairement à la probabilité de floraison, le facteur année n'a pas d'effet significatif.

C) Dynamique de floraison

L'échelle de l'arbre

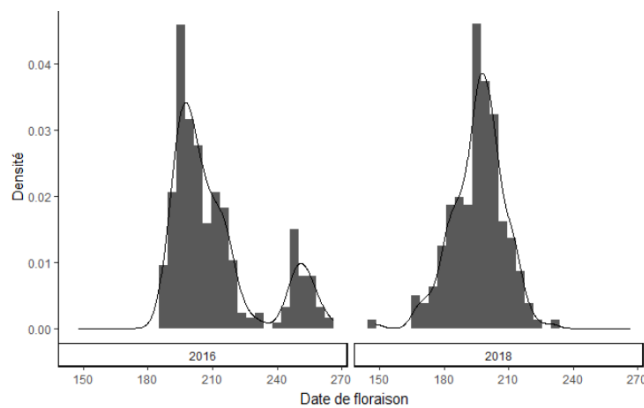
Un seul pic de floraison est observé les deux années. L'analyse se fait sur l'ensemble de l'échantillonnage de 773 UCs.



L'*intensité* de taille a un effet très significatif sur la dynamique de floraison ($\text{Chisq} = 14.25$, $P\text{-value} < 0.001$). Les arbres non taillés (T0) fleurissent en moyenne plus tôt que les arbres faiblement taillés (T1) qui, eux-mêmes, fleurissent plus tôt que les arbres fortement taillés (T3, Figure 11). La différence de temps entre les modalités T0 et T1 ainsi qu'entre T1 et T3 est d'environ 5-6 jours.

FIGURE 11 : EFFET DE L'INTENSITE DE TAILLE SUR LA DYNAMIQUE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'ARBRE

L'échelle de l'UC initiale



L'année 2016 se caractérise par deux pics de floraison (Figure 12). Le pic principal aux alentours du 200^{ème} jour après la taille (correspondant au pic de floraison de l'année 2018) et un pic secondaire, plus petit environ 50 jours plus tard. Les analyses se feront seulement sur le premier pic, plus important (459 UCs) et représentant la réalité agronomique observée la plupart du temps.

FIGURE 12 : REPRESENTATION DE LA DYNAMIQUE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'UC INITIALE EN 2016 ET EN 2018

Modèle global

TABEAU 8: FACTEURS SIGNIFICATIFS DU MODELE GLOBAL SUR LA DYNAMIQUE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'UC INITIALE

	Chisq	Df	P-Value
(Intercept)	31983.98	1	0
intensite	19.52	2	0
annee	15.86	1	0
diam	32.54	1	0

Trois effets simples sont très significatifs : l'*intensité*, l'*année* et le *diamètre*. Le modèle a un R^2 de 0.44 (0.33 sans l'effet aléatoire *arbre*). On retrouve le même effet positif de l'*intensité* de taille sur la date de floraison qu'à l'échelle de l'arbre (Figure 13 A). On observe une relation positive entre le *diamètre* de l'UC initiale et la date de floraison de l'UC (Figure 13 B). Les UCs initiales de l'*année* 2018 fleurissent en moyenne environ 8 jours plus tôt que celles de 2016 (Figure 13 C).

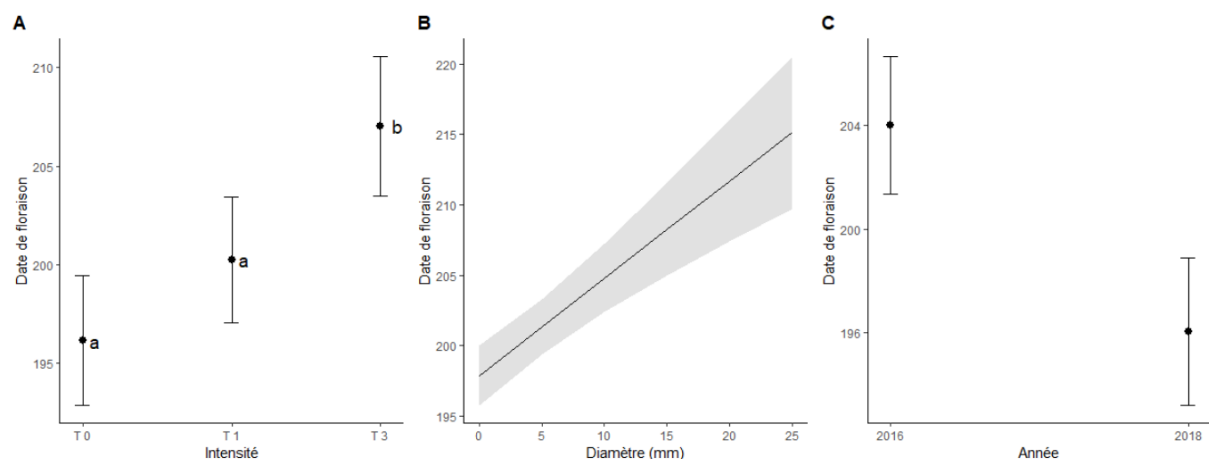


FIGURE 13 : EFFETS MARGINAUX DES FACTEURS SIGNIFICATIFS DU MODELE GLOBAL SUR LA DYNAMIQUE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'UC INITIALE

Sous modèle en prenant en compte la réponse végétative

On ne considère que les UCs initiales ayant débourré après la taille et on introduit le nombre d'UCs filles (UCf) en variable explicative.

TABEAU 9 : FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE SUR LA DYNAMIQUE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'UC INITIALE

	Chisq	Df	P-Value
(Intercept)	62739.67	1	0.00
intensite	2.46	1	0.12
severite	21.46	3	0.00
annee	16.57	1	0.00
intensite:annee	4.95	1	0.03

Le sous-modèle n'explique que peu la variabilité de la variable réponse ($R^2=0.24$ et 0.23 sans l'effet aléatoire). L'effet aléatoire arbre est très faible, avec une variance de 0.76 (variance résiduelle de 76.00). L'interaction *intensité : année* est significative (Tableau 9). Les arbres de la modalité T3 ont significativement fleuri plus tard en 2016 qu'en 2018 (Figure 14 A). Les UCs non taillées (n0) fleurissent significativement plus tôt d'environ 10 jours que les UCs taillées. Il n'y a cependant pas de différence entre les axes faiblement (n1), moyennement (n2) ou fortement taillés (n3) (Figure 14 B).

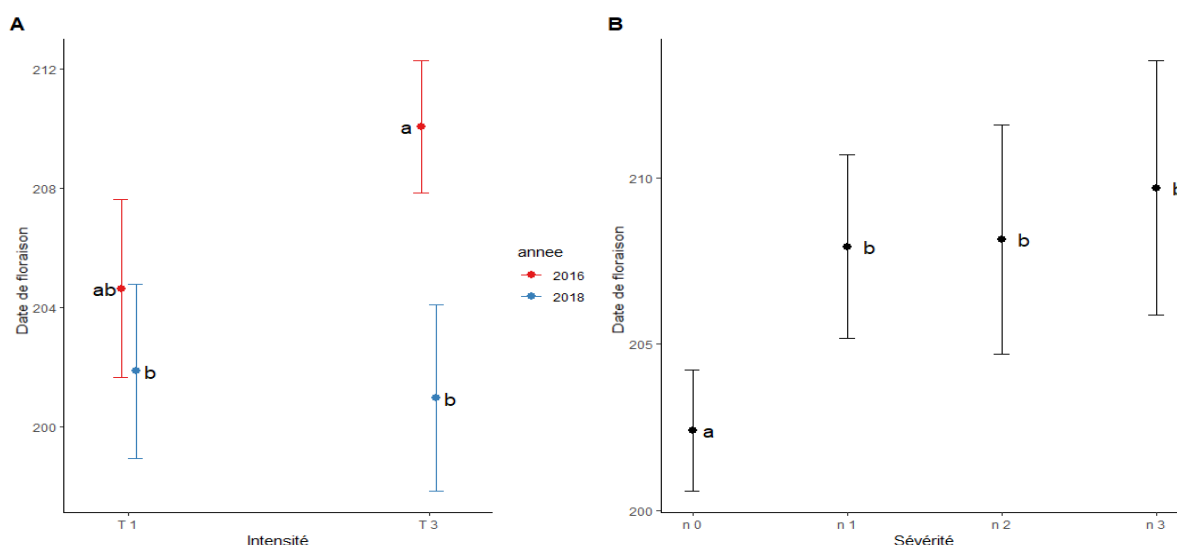


FIGURE 14 : EFFETS MARGINAUX DES FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE SUR LA DYNAMIQUE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'UC INITIALE

L'échelle de l'UC terminale

Comme pour les UCs initiales, on observe deux pics de floraison en 2016 pour les UCs terminales. Les analyses sont réalisées seulement sur le premier pic.

UCt-f

La population des UCs terminales filles issues d'UC taillées comprend 204 UCs.

TABLEAU 10 : FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE RELATIF A LA POPULATION UCT-F SUR LA DYNAMIQUE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'UC TERMINALE

	Chisq	Df	P-Value
(Intercept)	15427.811	1	0.000
intensite	12.053	1	0.001
annee	12.380	1	0.000
sfol	3.991	1	0.046
intensite:annee	6.719	1	0.010

Le modèle explique très bien la variable réponse avec un R^2 de 0.89. Cependant, c'est l'effet aléatoire de l'UC *initiale* qui est responsable en grande partie de ce bon ajustement ($R^2=0.41$ sans l'effet UC *initiale* ; variance de 49.94 pour l'effet UC *initiale* et de 15.40 pour la variance résiduel). L'interaction *intensité : année* est significative (Tableau 10). Les arbres de la modalité T3 ont fleuri significativement plus tard en 2016 qu'en 2018 (Figure 15 A). La surface foliaire est tout juste significative (Tableau10). Plus la surface foliaire d'une UC terminale est élevée, plus elle fleurit tôt en moyenne (Figure 15B).

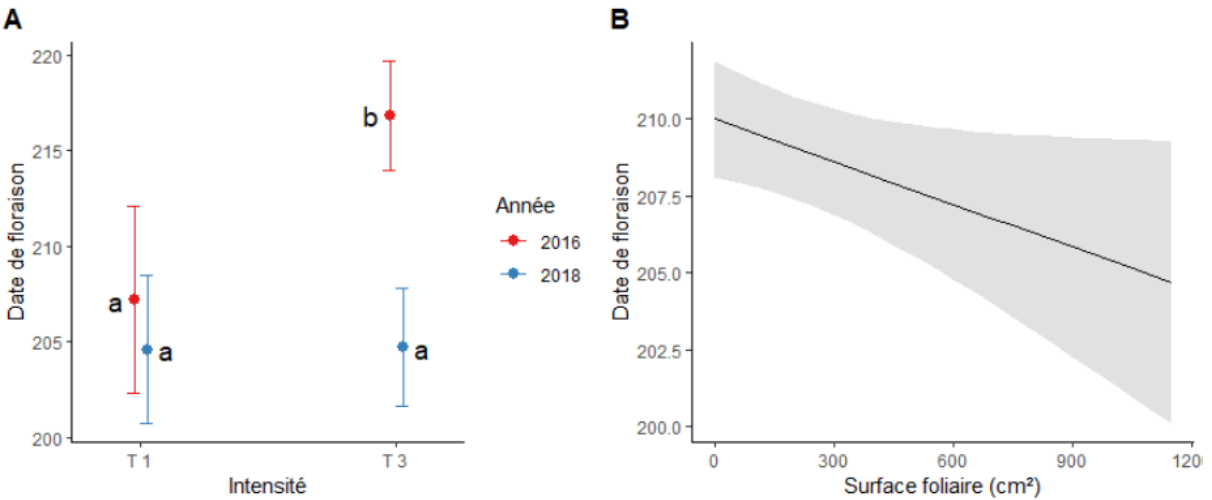


FIGURE 15 : EFFETS MARGINAUX DES FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE RELATIF A LA POPULATION UCT-F SUR LA DYNAMIQUE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'UC TERMINALE

UCnt-f

La population des UCs terminales filles issues des UCs non taillées dénombre 136 individus. La modalité T0 n'est pas représentée par cette population, elle ne sera donc pas comprise dans l'analyse.

	Chisq	Df	P-Value
(Intercept)	2679.356	1	0.000
intensite	6.784	1	0.009
position	7.091	1	0.008
sfol	15.304	1	0.000
ddeb	5.545	1	0.019
position:ddeb	5.857	1	0.016

TABLEAU 11 : FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE RELATIF LA POPULATION UCNT-F SUR LA DYNAMIQUE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'UC TERMINALE

Comme pour la population UCt-f, le modèle explique bien la variable réponse ($R^2=0.86$) dû à un effet aléatoire UC *initiale* très important ($R^2= 0.22$ sans effet aléatoire, variance de l'effet aléatoire UC *initiale* = 46.63 et variance résiduelle du modèle = 27.28). On retrouve l'effet de la modalité T3

d'intensité de taille qui retarde la floraison, sans interaction avec l'année contrairement à la population UCt-f (Figure 16 A). La *surface foliaire* a le même effet négatif sur la date de floraison que pour la population UCt-f (Figure 16 C). L'interaction *position* : *ddeb* est significative. On remarque que plus les UCs en *position* apicale sont apparues tôt après la taille de l'arbre, plus elles fleurissent également tôt. Au contraire, la date de floraison des UCs filles en *position* latérale n'est pas affectée par leur *date d'apparition* après la taille. (Figure 16 C).

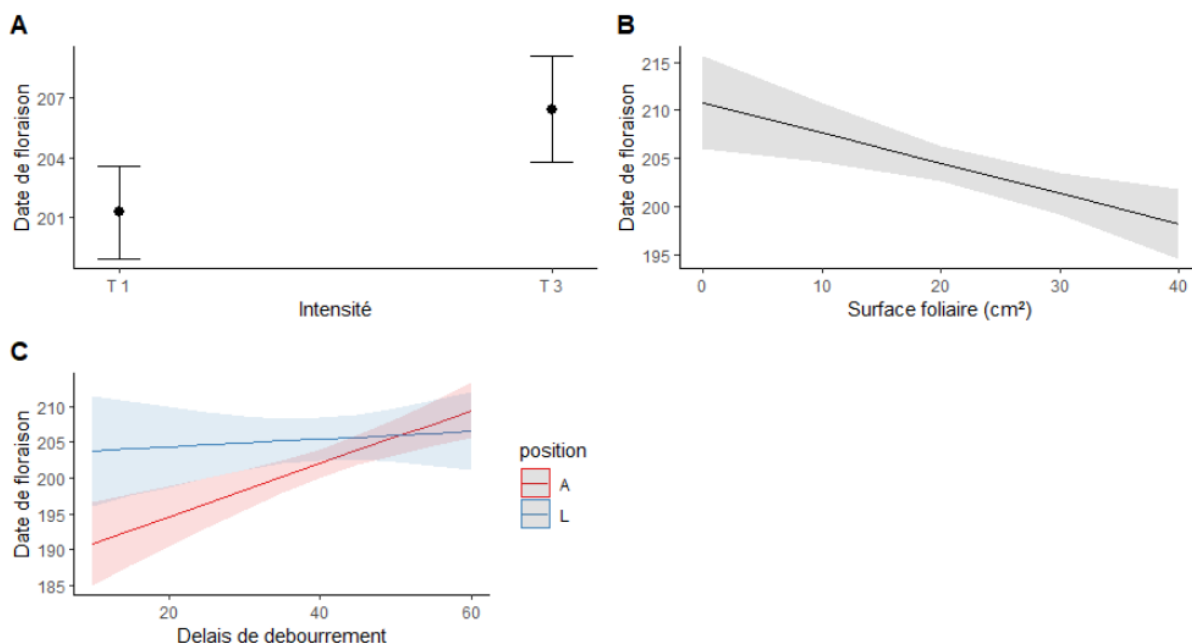


FIGURE 16 : EFFETS MARGINAUX DES FACTEURS SIGNIFICATIFS DU SOUS MODELE RELATIF LA POPULATION UCNT-F SUR LA DYNAMIQUE DE FLORAISON A L'ECHELLE DE L'UC TERMINALE

Résumé dynamique florale

Pour résumer, la taille du manguier impacte la dynamique de floraison, en retardant la floraison (échelle de l'arbre, Figure 11). L'effet global du facteur *intensité* ressort également aux échelles de l'UC initiale et de l'UC terminale (Figure 13A, 14A et 15A). Plus l'*intensité* est forte, plus les arbres vont avoir tendance à fleurir tardivement. Pour les UCs filles, cet effet n'est observé qu'en 2016. Pour les effets des facteurs locaux, ce sont principalement les facteurs morphologiques et structuraux, comme le *diamètre* pour les UCs initiales et la *surface foliaire* pour les UCs terminales filles, qui ont un effet significatif. Le *diamètre* est corrélé positivement (Figure 13B) et la *surface foliaire* négativement avec la date de floraison (Figure 15B et 16B). Pour la population UCnt-f, il existe une corrélation positive entre date de floraison et *date de débourrement* quand ces UCs sont en *position* apicale (Figure 16C). Les UCs de la population UCt-f ne sont qu'en *position* latérale (suite à la suppression du bourgeon apicale de leur UC mère), il est donc logique de ne pas retrouver l'effet significatif pour cette population. La *sévérité* de taille n'est significative qu'une seule fois, à l'échelle de l'UC initial avec le sous-modèle prenant en compte la réponse végétative (seules les UCs ayant débourré végétativement sont analysées, Figure 14B). Dans ce cas, les UCs non taillées (n0) fleurissent significativement plus tôt que celles taillées (n1, n2, n3).

L'année 2016 s'est vu être représentée par deux pics de floraison (Figure 12). Le facteur année, traduisant sans doute l'effet des différents facteurs environnementaux, semble pouvoir jouer un rôle important dans la dynamique de floraison. De plus, dans des analyses non présentées dans cette étude, il semblerait que la sévérité de taille impacte la probabilité d'appartenance au second pic observé lors de l'année 2016 (Figure 12). Plus les axes sont sévèrement taillés, plus l'UC a des chances de fleurir lors du second pic de floraison (environ 50 jours plus tard).

IV) Discussion

La taille impacte la floraison de manguiers sur les différents aspects étudiés : la probabilité, l'intensité et la dynamique de floraison. Selon le type d'UCs, taillées ou non, apparues depuis la taille (fille) ou non, la réponse peut être variable et affectée par des facteurs différents. L'effet de la taille est présent à deux niveaux :

- Un effet global, traduit par le facteur de taille *intensité*. Ce facteur, à l'échelle de l'arbre, impacte négativement la probabilité de floraison pour les UCs non taillées à l'échelle initiale et terminale. L'intensité de taille impacte également la dynamique de floraison en rallongeant le temps nécessaire à la floraison de l'ensemble des UCs d'un arbre, effet observé sur les UCs présentes avant et après la taille (échelles initiale et terminale).
- Un effet local de la taille traduit par le facteur *sévérité*. Ce facteur, à l'échelle de l'axe, impacte spécifiquement les axes concernés. Par exemple, plus la sévérité de taille est importante, plus la probabilité de floraison des UCs initiales et terminales diminue. Elle modifie également la dynamique de floraison des axes taillés, ceux-ci fleurissant plus tard que les axes non taillés.

De nombreux effets morphologiques et structurels ont été mis en avant également à travers cette étude. Le *diamètre* des UCs initiales et la *surface foliaire* des UCs filles terminales impactent les trois aspects étudiés de la floraison. Les variables traduisant la réponse végétative, tels le *nombre de filles* pour les UCs initiales et le *nombre de sœurs* pour les UCs terminales, jouent un rôle important dans la probabilité et l'intensité de floraison, celles-ci étant corrélées positivement aux variables réponses étudiées.

Il a été montré dans une étude précédente que la *sévérité* de taille impacte ces variables morphologiques et structurelles (Persello et al., 2019). Le *diamètre* important d'une UC initiale est la conséquence d'une taille profonde dans l'axe (forte sévérité). De plus, une UC initiale sévèrement taillée produit un plus grand *nombre d'UCs filles* et leur *surface foliaire* est plus importante.

La *sévérité*, en impactant positivement la croissance végétative, a donc un effet indirect sur la floraison. Cet effet indirect, qui augmente la probabilité et l'intensité de floraison, est antagoniste à l'effet global de la taille. Comme vu précédemment, la *sévérité* a un effet significatif sur la probabilité et la dynamique de floraison et ce malgré la prise en compte de des variables morphologiques et structurelles. Cela peut refléter un effet direct de la *sévérité*, effet dû au traumatisme que l'axe taillé a subi.

La variabilité de réponse inter-arbres à la taille n'est pas la même en fonction de la variable réponse étudiée. Cette variabilité est grande pour la probabilité de floraison mais beaucoup plus faible pour l'intensité et la dynamique. On remarque également une variabilité intra-arbres avec l'effet aléatoire *UC initiale* très importante pour la dynamique de floraison avec les populations d'UCs filles (UCt-f et UCnt-f).

Le nombre d'années considérées étant limité, il rend difficile l'évaluation de la variabilité de la réponse florifère à la taille dans le temps. Mais il semblerait que, selon les cas, la *sévérité* de taille puisse réduire l'effet *année*. Par exemple, la probabilité de floraison des UCs non taillées est plus élevée en 2016 alors qu'elle n'est pas significativement différente entre les deux années pour les UCs taillées (Figure 4). Et à l'inverse, l'*intensité* de taille semble augmenter les différences interannuelles, comme pour la dynamique de floraison des UCs terminales (Figure 14A et 15A). Un suivi sur un plus grand nombre d'années permettrait de répondre davantage à cette question. De plus, il serait intéressant de suivre les arbres taillés plusieurs années afin d'observer et de quantifier un possible effet sur le long terme de la taille sur les arbres.

V) Bibliographie

- Bawa, K.S. (1983). Patterns of flowering in tropical plants. In Handbook of Experimental Pollination, (New York: Jones CE, Little RJ), pp. 394–410.
- Capelli, M., Lauri, P.-É., and Normand, F. (2016). Deciphering the costs of reproduction in Mango – vegetative growth matters. *Front. Plant Sci.* 7.
- Dambreville, A., Lauri, P.-É., Normand, F., and Guédon, Y. (2015). Analysing growth and development of plants jointly using developmental growth stages. *Ann. Bot.* 115, 93–105.
- Dambreville, A., Lauri, P.-É., Trottier, C., Guédon, Y., and Normand, F. (2013a). Deciphering structural and temporal interplays during the architectural development of mango trees. *J. Exp. Bot.* 64, 2467–2480.
- Davenport, T.L. (2009). Reproductive physiology. In *The Mango: Botany, Production and Uses*, 2nd Edition, (Wallingford: Litz RE), pp. 97–169.
- Elkhishen, M.A. (2015). Effect of pruning severity on flowering and fruiting of mango (*Mangifera indica*) cv. Alphonso in off-year season. *Egypt. J. Hortic.* 42, 10.
- Ferree, D.C., and Schupp, J.R. (2003). Pruning and training physiology. In *Apples: Botany, Production, and Uses*, (New York, NY: CABI Pub), pp. 319–343.
- Hoarau, I., Michels, T., and Vincenot, D. (2009). Le marché de la mangue. In *Guide de Production Intégrée de Mangues à La Réunion*, (Cirad et chambre d’agriculture de la Réunion, Saint-Pierre: Vincenot.D et Normand F.), pp. 39–44.
- Ims, R.A. (1990). The ecology and evolution of reproductive synchrony. *Tree* 5, 135–140.
- Issarakraisila, M., Considine, J.A., and Turner, D.W. (1997). Vegetative and reproductive growth aspects of mango growing in a mediterranean climate in western Australia. *Acta Hortic.* 56–63.
- Lauri, P.-E., and Trottier, C. (2004). Patterns of size and fate relationships of contiguous organs in the apple (*Malus domestica*) crown. *New Phytol.* 163, 533–546.
- Marini, R.P. (2003). Physiology of pruning fruit trees. Virginia Cooperative Extension Publication no. 422-025, Blacksburg, Virginia, USA
- Nordey, T. (2014). Analyse expérimentale et modélisation de l’hétérogénéité de la qualité et de la maturité des mangues. Thèse. Université d’Avignon.
- Normand, F. (2009). Le manguier. In *Guide de Production Intégrée de Mangues à La Réunion*, (Cirad et chambre d’agriculture de la Réunion, Saint-Pierre: Vincenot. D et Normand F.), pp. 45–58.
- Oosthuysen, S.. (1994). Pruning of Sensation mango trees to maintain their size and effect uniform and later flowering. *South Afr. Grow. Assoc. Yearb.* 14, 1-6.
- Persello, S., Grechi, I., Boudon, F., Normand, F. (2019). Nature abhors a vacuum: deciphering the vegetative reaction of the mango tree to pruning. *Eur. J. Agron.* 104, 85-96.9
- Schaffer, B., and Gaye, G.O. (1989). Effects of pruning on light interception, specific leaf density and leaf chlorophyll content of mango. *Sci. Hortic.* 41, 55–61.

Schaffer, B., Urban, L., Lu, P., and Whiley, A.W. (2009). ecophysiology. In *The Mango: Botany, Production and Uses*, 2nd Edition, (CAB International, Wallingford: Litz,R.E), pp. 170–209.

Sharma, R.R., Singh, R., and Singh, D.B. (2006). Influence of pruning intensity on light penetration and leaf physiology in high-density orchards of mango trees. *Fruits* 61, 117–123.

Vincenot, D., and Normand, F. (2009). *Guide de production intégrée de mangues à la Réunion*.

Whiley, A.W., Rasmussen, T.S., Saranah, J.B., and Wolstenholme, B.N. (1989). Effect of temperature on growth, dry matter production and starch accumulation in ten mango (*Mangifera indica* L.) cultivars. *J. Hortic. Sci.* 64, 753–765.

 agriculture • alimentation • environnement	Diplôme : M2 Spécialité : Master Spécialisation / option : Data science pour la biologie Enseignant référent : Marie Pierre Etienne	
Auteur(s) : Mathis Cambreling Date de naissance* : 07 / 12 / 1996	Organisme d'accueil : CIRAD Adresse : 7 chemin de l'Irat, 97410 Ligne Paradis,	
Nb pages : 25 Annexe(s) : 0	La Réunion France	
Année de soutenance : 2020	Maître de stage : Isabelle Grechi	
Titre français : Analyse des effets de la taille sur la floraison du manguier Titre anglais : Analysis of the effects of pruning on the flowering of the mango tree		
Résumé (1600 caractères maximum) : La taille est une pratique culturale importante et courante pour la conduite des arbres fruitiers. Cependant, la réaction des arbres à la taille est difficile à prévoir et notamment la réponse florale qui est l'une des étapes clés pour l'élaboration du rendement du manguier. L'objectif de cette étude est de décrypter l'impact de la taille sur les processus relatifs à la floraison. La taille a été caractérisée par deux facteurs : l'intensité de la taille, définie à l'échelle de l'arbre comme la quantité de biomasse fraîche retirée par unité de volume de la canopée, et la sévérité de la taille, définie à l'échelle de l'axe comme la profondeur de la taille le long de l'axe. La floraison a été décomposée en variables structurelles et temporelles, et les effets de la taille ont été évalués sur la base de ces variables à un niveau local sur les axes élagués et à un niveau global sur les axes non élagués. Les résultats de cette étude montrent que la taille impacte la réponse florale de l'arbre aux niveaux local et global. La taille influant sur la morphologie des axes taillés et la structure de la canopée, des effets indirects liés à la taille s'ajoutent. Cette étude met en avant la complexité de la réponse florifère du manguier à cette pratique culturale.		
Abstract (1600 caractères maximum) : Pruning is an important and common cultural practice for the management of fruit trees. However, the response of trees to pruning is difficult to predict, especially the floral response which is one of the key steps in the development of mango yield. The objective of this study is to decipher the impact of pruning on flowering processes. Pruning was characterized by two factors: the intensity of pruning, defined at the tree scale as the amount of fresh biomass removed per unit volume of the canopy, and the severity of pruning, defined at the axis scale as the depth of pruning along the axis. Flowering was decomposed into structural and temporal variables, and the effects of pruning were assessed on the basis of these variables at a local level on pruned axes and at a global level on unpruned axes. The results of this study show that pruning impacts the floral response of the tree at the local and global levels. As pruning affects the morphology of pruned axes and the structure of the canopy, indirect effects related to pruning are added. This study highlights the complexity of the mango tree's floriferous response to this cultural practice.		
Mots-clés : Taille, Manguier, Floraison, rendement, GLMM Key Words: Pruning, Mango tree, Flowering, yield, GLMM		

* Elément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires