

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

و البحث العلمي وزارة التعليم العالي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mustapha STAMBOULI

Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي

معسكر

Faculté des sciences de la nature et de la vie

Département des sciences agronomiques

Laboratoire Géo-Environnement et Développement des Espaces

THESE de DOCTORAT

Spécialité : Production végétale et Protection des végétaux

Intitulé :

**Etude écologique et agronomique d'un système
«culture fruitière – bioagresseur» : cas d'un verger de
pommiers dans la région de Mascara**

Présentée par : BENZINA Sabrina

Le...../...../2025

Devant le jury :

Président	SOUIDI Zahira	Professeur	Université Mustapha Stambouli Mascara
Examineur	ACHEUK Fatma	Professeur	Université M'Hamed Bougara Bumerdes
Examineur	RIGHI Kada	Professeur	Université Mustapha Stambouli Mascara
Examineur	GHOULAMALLAH Amine	MCA	Université Abdelhamid ibn Badis Mostaganem
Directeur de thèse	HARIZIA Abdelkader	Professeur	Université Mustapha Stambouli Mascara
Co-directeur de thèse	ELOUISSI Abdelkader	Professeur	Université Mustapha Stambouli Mascara

Année universitaire 2024-2025

Remerciements

J'exprime ma gratitude principalement au Dieu tout-puissant pour m'avoir béni avec la santé, la volonté, et la patience nécessaires pour terminer mes longues années d'études et arriver là où je suis aujourd'hui.

Je souhaite particulièrement exprimer ma gratitude au Professeur Abdelkader HARIZIA, mon directeur de thèse, pour avoir accepté de m'accompagner dans la réalisation de cette thèse. Je suis reconnaissante pour son soutien constant, son encouragement et sa patience tout au long de ce voyage. Ses conseils et son aide ont été déterminants pour la réussite de cette thèse, et je suis reconnaissant(e) de toutes les connaissances et expériences d'enseignement et de recherche que j'ai pu acquérir sous sa direction.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements au Professeur ELOUISSI Abdelkader, mon co-directeur de thèse pour ses conseils perspicaces, son soutien et son aide précise tout au long de ce processus. Sa collaboration a été déterminante dans la réussite de cette recherche.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à M^{me} SOUIDI Zahira, Professeur à l'université de Mascara, pour avoir accepté de présider ce jury. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma très haute considération.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à M^{me} ACHEUK Fatma, Professeur à l'université de Boumerdes, M. GHELAMALLAH Amine, maître de conférences à l'université de Mostaganem, et M. RIGHI Kada, Professeur à l'université de Mascara, pour leur participation à ce jury. Je suis convaincu que leur expertise et leur contribution ont été essentielles dans l'amélioration de cette thèse.

Je suis reconnaissante envers M. BENAMINA Mohammed, arboriculteur dans la région de Mascara, pour son soutien indéniable et sa générosité en me permettant un accès facile à son champ. Je tiens également à exprimer ma gratitude pour l'offre de la parcelle expérimentale, qui a été déterminante pour la réalisation de cette thèse. Je tiens également à exprimer ma gratitude aux docteurs BONAL Raoul et CANELO Tara, de l'université Extramadura (Espagne) pour leur contribution dans l'analyse des données de cette thèse.

Je suis également reconnaissante envers le personnel de la ferme expérimentale et du laboratoire Géo-Environnement et Développement des Espaces de l'université de Mascara, pour leur soutien constant. J'espère que cette thèse témoigne de ma très grande gratitude envers eux.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents et à toute ma famille pour leur soutien et leur encouragement inconditionnels tout au long de ce parcours. En outre, je voudrais exprimer ma gratitude au personnel administratif de la faculté SNV de l'université de Mascara, pour leur aide précieuse et leur soutien constant.

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux	I
Liste des figures	III
Liste des abréviations, sigles et acronymes	VII
Résumé	IX
Abstract	X
ملخص	XI
Introduction	1
Chapitre 1	
Concept de la production fruitière intégrée « PFI » et interactions « plantes hôtes-bioagresseurs »	5
1.1. Concept de la Production Fruitière Intégrée « PFI »	5
1.1.1. Définition et objectifs	5
1.1.2. Aperçu historique sur la PFI	6
1.1.3. Problématique des pesticides chimiques	6
1.1.4. Importance agroécologique de la PFI	7
1.1.5. L'approche système en PFI	8
1.1.6. Les principes clés de la PFI	10
1.1.7. Les méthodes culturales en PFI : la taille d'hiver et la fertilisation azotée	12
1.1.8. Aperçu sur le processus de normalisation de la PFI	13
1.1.9. La recherche scientifique et le concept de la PFI	14
1.2. Interactions « plantes hôtes-bio agresseurs »	14
1.2.1. La sélection des plantes hôtes par les insectes phytophages	14
1.2.2. Défenses des plantes et mécanismes de résistance	15
1.2.3. Interactions plante- insectes phytophages : cas des pucerons	16
1.2.4. Effets des pratiques culturales	19

Chapitre 2

Le système biologique « pommier – puceron cendré »	21
2.1. La plante hôte : le pommier <i>Malus domestica</i> L.	21
2.1.1. Position taxonomique et description générale	21
2.1.2. Caractéristiques biologiques et système de conduite	22
2.1.3. Caractéristiques végétatives et développement physiologique	23
2.1.4. Phénologie	26
2.1.5. Importance économique dans le monde et en Algérie	27
2.1.6. Exigences édapho-climatiques	30
2.1.7. Techniques de conduite culturale	30
2.1.8. Principaux ennemis du pommier en Algérie	36
2.2. Le puceron cendré <i>Dysaphis plantaginea</i>	37
2.2.1. Position systématique et caractères morphologiques	38
2.2.2. Cycle biologique	39
2.2.3. Importance économique et dégâts	40
2.2.4. Moyens de lutte	42

Chapitre 3

Matériels et méthodes	46
3.1. Objectifs spécifiques et démarche expérimentale	46
3.2. Présentation de la zone d'étude : Mascara	47
3.2.1. Principales caractéristiques de l'agroécosystème	47
3.2.2. Climat	48
3.3. Dispositifs expérimentaux	53
3.3.1. Étude des interactions du système « pommier - <i>D. plantaginea</i> » avec les pratiques culturales	53
3.3.2. Élevage de <i>D. plantaginea</i>	54
3.3.3. Effet de la taille d'hiver	55
3.3.4. Effet de la fertilisation azotée	64

3.3.5. Étude des interactions du système « pommier - <i>D. plantaginea</i> » avec les paramètres écologiques	68
3.4. Méthodes d'analyse statistique des résultats	69
3.4.1. Effet de la taille d'hiver	70
3.4.2. Effet de la fertilisation azotée	71
3.4.3. Effet des températures sur le système « pommier- <i>D. plantaginea</i> »	71
Chapitre 4	
Analyse des résultats	72
4.1. Effet de l'intensité de la taille d'hiver sur le système « pommier - <i>D. plantaginea</i> »	72
4.1.1. Dynamique des populations de <i>D. plantaginea</i>	72
4.1.2. Effet de l'infestation sur l'enroulement des feuilles	75
4.1.3. Effet de l'intensité de la taille et de l'infestation par les pucerons sur la croissance végétative	79
4.1.4. Effet de l'intensité de la taille et de la croissance végétative sur la dynamique des pucerons.	87
4.1.5. Effet de l'intensité de la taille et de l'infestation par les pucerons sur le rendement en fruits	90
4.2. Effet de la fertilisation azotée (N) sur le système « pommier- <i>D. plantaginea</i> »	92
4.2.1. Effet du traitement N sur la croissance végétative	92
4.2.2. Effet du traitement N sur la réponse des pucerons	96
4.2.3. Effet du traitement N sur les interactions « pucerons - croissance végétative »	99
4.3. Effet de la température sur les interactions « pommier - <i>D. plantaginea</i> »	100
4.3.1. Effet des températures sur les populations	100
4.3.2. Effet des températures sur les interactions « pommier - pucerons »	106
Chapitre 5	
Discussion	110
5.1. Dynamique des effectifs de <i>D. plantaginea</i>	110

5.2. Effet de l'intensité de la taille sur la croissance végétative et la dynamique des pucerons	113
5.3. Effet de l'infestation de pucerons sur la croissance végétative et le rendement en fruits	115
5.4. Effet de la fertilisation azotée sur le système « pommier-puceron cendré »	118
5.4.1. Effet sur la croissance végétative et la croissance du tronc	118
5.4.2. Effet sur l'infestation	119
5.4.3. Interactions entre le traitement N avec la croissance et l'infestation	120
5.5. Effet des températures sur le système « pommier - puceron »	123
Conclusion générale et perspectives	126
Références bibliographiques	129
Annexes	

Liste des Tableaux

Tableau 1 Liste des parasitoïdes et des prédateurs de <i>D. plantaginea</i> recensés dans les vergers de pommiers en Algérie	44
Tableau 2 Données climatiques moyennes mensuelles de la région de Mascara pour la période 2010-2020	50
Tableau 3 Données climatiques moyennes mensuelles, minimales et maximales dans la région de Mascara, pour l'année 2019	51
Tableau 4 Estimation du modèle de regression linéaire polynomial d'ordre 3	57
Tableau 5 Caractéristiques des différentes modalités de taille d'hiver pratiquées sur la rangée d'arbres expérimentale, en 2019	58
Tableau 6 Intensité de la taille (IP %) calculée pour chacun des 15 arbres expérimentaux	61
Tableau 7 Dispositif de fertilisation azotée en randomisation totale avec 4 répétitions	66
Tableau 8 Évolution hebdomadaire des effectifs de <i>D. plantaginea</i> (moyenne $\pm$ SE) par pousse végétative du pommier Gala	74
Tableau 9 Effet de l'infestation par <i>D. plantaginea</i> sur l'enroulement des feuilles par pousse feuillée du pommier Gala (moyenne $\pm$ SE)	76
Tableau 10 Importance relative des dégâts sur feuilles (moyenne/pousse $\pm$ SE) selon la classification de Rat Morris, 55 jours après l'infestation artificielle par <i>D. plantaginea</i>	79
Tableau 11 RGR Ln et RGR absolu (moyen/jour $\pm$ SE) des modalités de traitement AI et NAI, selon l'intensité de la taille (HP, MP et LP)	81
Tableau 12 Effet de l'infestation par <i>D. plantaginea</i> sur le nombre de feuilles/pousse (moyen $\pm$ SE), selon l'intensité de taille, 70 jours après l'infestation artificielle	87
Tableau 13 Variation temporelle de l'indice d'infestation de <i>D. plantaginea</i> (IF moyen $\pm$ SE) de la modalité AI selon les intensités de taille (HP, MP, LP)	89

Tableau 14 Moyennes ($\pm$ SE) de : FL, FD, FW/FD et production/arbre des modalités infestée (AI) et non infestée (NAI)	91
Tableau 15 Evolution temporelle de l'accroissement des pousses (moyenne $\pm$ SE, mm), RGR Ln et LPR % pour la modalité AI.	93
Tableau 16 Evolution temporelle du nombre de feuilles par pousse (moyenne $\pm$ SE), pour la modalité AI	95
Tableau 17 Effet du traitement de N sur l'évolution temporelle des effectifs de <i>D. plantaginea</i>	97
Tableau 18 Effet de la fluctuation des températures ambiantes ($^{\circ}$ C, moyenne hebdomadaire, et intervalle, 2019) sur le taux intrinsèque d'accroissement (r) et l'accroissement fini (λ) des populations de <i>D. plantaginea</i> , à partir du 7 ^e jours de l'infestation	103
Tableau 19 Coefficients de corrélation et valeurs de p (signification bilatérale) des températures minimales et maximales journalières avec le taux intrinsèque d'accroissement (r) des populations de <i>D. plantaginea</i>	103
Tableau 20 Evolution temporelle du taux de mortalité naturelle (%) de <i>D. plantaginea</i>	105
Tableau 21 Equations des modèles linéaires de prédictions de la croissance temporelle des pousses en fonction des températures ambiantes	107

Liste des Figures

Figure 1 L'approche systémique du concept de la production fruitière intégrée (PFI).	9
Figure 2 Représentation simplifiée des interactions trophiques dans un verger fruitier et des moyens d'action pour limiter le développement des ravageurs (Laget <i>et al.</i> , 2015 ; modifié).	10
Figure 3 Principaux leviers agronomiques et écologiques utilisés en production fruitière intégrée (Laget <i>et al.</i> , 2015).	11
Figure 4 Représentation schématique du mode alimentaire d'un puceron (Guerrieri et Digilio, 2008 ; modifié).	18
Figure 5 Cycle de développement holocyclique des pucerons (Saguez, 2007 ; modifié).	18
Figure 6 Typologie des rameaux de pommier selon la terminologie horticole, en fonction du caractère végétatif (A) ou inflorescentiel (B) du bourgeon terminal (Lauri et Laurens, 2005).	25
Figure 7 Pousse végétative et reproductrice chez le pommier (cultivar Gala). (A) pousse végétative (B) inflorescence+ pousse de bourse.	25
Figure 8 Différents types de pousses (axes longs, axes courts et axes moyens) sur un rameau de pommier.	26
Figure 9 Chronologie des principaux stades repères du pommier "cultivar Gala " dans la région de Mascara.	28
Figure 10 Superficie récoltée et production de pommes. (A) dans le monde depuis 1999 à 2021 ; (B) part de la production par régions ; (C) en Algérie depuis 2000 à 2020 (FAOSTAT, 2021).	29
Figure 11 Représentation schématique d'une haie fruitière adulte (8ème à 15ème année), en axe vertical, adaptée au palissage du pommier (Roche, 2017).	31
Figure 12 Exemple de taille de formation d'un arbre fruitier	33
Figure 13 Importance relative (%) des catégories de pesticides homologuées sur les rosacées à pépins en Algérie.	36
Figure 14 Exemples des principaux ravageurs du pommier en Algérie (originale).	37
Figure 15 Les principaux stades de développement de <i>D. plantaginea</i> . I : jeune larve; II :larve âgée; III :Adulte; IV : fondatrigène.V :adulte ailé (Androuin, 2021)	39
Figure 16 Schéma du cycle de développement holocyclique dioécique annuel de <i>Dysaphis plantaginea</i> (Dib, 2010).	40

Figure 17 Colonies et dégâts de <i>D. plantaginea</i> sur pommier (Gala). (A) colonie et enroulement des feuilles (B) feuilles saines (originale).	42
Figure 18 Descriptif synthétique des principaux leviers d'action de lutte contre les insectes ravageurs clés des vergers à mettre en œuvre en production fruitière intégrée.	45
Figure 19 Les ensembles naturels de la région de Mascara et la géolocalisation des sites d'expérimentation.	48
Figure 20 Diagramme ombrothermique de la région de Mascara. (A) : période 2010-2020 ;(B) : 2019.	52
Figure 21 Position de la région de Mascara sur le Climagramme d'Emberger	53
Figure 22 Élevage des colonies de <i>D. plantaginea</i> sur pommiers sous serre	54
Figure 23 Aperçu sur le verger expérimental de pommiers (variété Gala), conduit en intensif	56
Figure 24 Les différentes intensités de taille d'hiver pratiquées sur les arbres expérimentaux.	58
Figure 25 Schéma du dispositif expérimental randomisé de la taille d'hiver, sous tunnel insect-proof.	60
Figure 26 Pousse terminale du pommier Gala marquée.	62
Figure 27 Différents types d'enroulement des feuilles de pommier dû aux attaques de <i>D. plantaginea</i> (originale).	64
Figure 28 Dispositif en randomisation totale relatif à l'effet de la fertilisation azotée sur le système « pommier-puceron cendré » en conditions contrôlées.	67
Figure 29 Localisation de la station météorologique de Matmore par rapport au verger expérimental de pommiers	69
Figure 30 Régression linéaire, exprimée en logarithme, entre le nombre de pucerons par pousse et le nombre de pucerons par jour pour la modalité infestée AI.	74
Figure 31 Dynamique hebdomadaire des populations de <i>D. plantaginea</i> (nombre moyen $\pm$ SE) : (a) : formes aptères + ailées ;(b) : formes ailées.	75
Figure 32 Distribution du nombre de feuilles enroulées de la modalité AI selon l'indice d'infestation maximale (IF) par <i>D. plantaginea</i> .	76
Figure 33 Régression linéaire entre le nombre moyen de feuilles enroulées par pousse et l'indice maximal d'infestation par <i>D. plantaginea</i> ($R^2 = 0.876$, $p < 0.005$).	77
Figure 34 Variation de la proportion (%) de feuilles de pommiers enroulées suite à l'infestation par <i>D. plantaginea</i> (régression linéaire : $R^2 = 0.59$; ddl =1, $F=23.15$; $p = 0.013$).	78

- Figure 35 Nombre moyen de feuilles enroulées par pousse, de la modalité AI, selon les intensités de taille HP, MP et LP. 79
- Figure 36 Régression linéaire entre le taux de croissance des pousses du pommier (RGR final) et l'intensité de taille (IP %). (a) : RGR absolu ; (b) : RGR logarithme népérien (Ln).
Chaque point représente un arbre. Point plein : modalité NAI ; point vide : AI. 82
- Figure 37 Diagramme des fréquences des variables de RGR Ln (a) et RGR absolu (b) selon la qualité de l'intensité de taille (HP, MP, LP) pour chacun des 9 arbres de la modalité AI (1) et NAI (2) (moyenne des 90 pousses : à raison de 10 pousses/arbres). 83
- Figure 38 Boîtes à moustache comparatives de la distribution de la variable moyenne RGR Ln par jour selon l'intensité de la taille (IP %) et les modalités de traitement, (a) : AI et (b) : NAI. 84
- Figure 39 Evolution temporelle de la longueur moyenne des pousses (cm; moyenne $\pm$ SE) des pommiers, (a): infestés par *D. plantaginae* (AI), (b): arbres non infestés par le puceron (NAI) soumis aux différentes intensités de taille : faible (LP), moyenne (MP) et forte (HP). 85
- Figure 40 Evolution temporelle du nombre de feuilles par pousse (moyenne $\pm$ SE) (moyenne de 10 pousses par arbre) des pommiers. 86
- Figure 41 Evolution temporelle du nombre moyen de feuilles/pousse de la modalité AI. 86
- Figure 42 Evolution temporelle de l'abondance moyenne par pousse des populations de *D. plantaginea* sur les pommiers en fonction de l'intensité de taille (LP, MP et HP) 88
- Figure 43 Régression linéaire entre l'indice d'infestation maximal (IF) et les valeurs de l'intensité de taille 90
- Figure 44 Effet du traitement N sur la croissance relative des pousses par jour (RGR Ln moyen final) pour la modalité AI. 94
- Figure 45 Effet du traitement N sur la croissance relative des pousses par jour (RGR Ln moyen final) pour la modalité saine NAI. 94
- Figure 46 Nombre de feuilles/pousse (moyenne $\pm$ SE) des modalités AI (a) et NAI (b) en fonction du traitement N. 95
- Figure 47 Effet temporel du traitement N sur l'accroissement du tronc des pommiers (moyennes marginales du diamètre du tronc (moyenne mm $\pm$ SE) (modalité AI). 96
- Figure 48 Relation entre les effectifs de *D. plantaginea* (variable transformé en logarithme) et les différentes doses du traitement N (régression linéaire ; $R^2 = 0.994$; $p > 0.05$). 98
- Figure 49 Variation temporelle de l'indice d'infestation (IF) de *D. plantaginea* en fonction du traitement N (0, 50,75 et 100 %). 98

Figure 50 Effet du traitement N sur l'interaction « <i>D. plantaginea</i> – croissance végétative »	99
Figure 51 Evolution temporelle du taux intrinsèque d'accroissement (r) (a) et du taux	101
Figure 52 Variation temporelle des températures au sein du verger expérimental de pommiers Gala en 2019 (du 13/05 au 30/06).	102
Figure 53 Evolution du taux de mortalité de <i>D. plantaginea</i> en fonction du temps (relation polynomiale d'ordre 3).	105
Figure 54 Relation linéaire entre la température maximale et le taux de mortalité hebdomadaire des populations de <i>D. plantaginea</i> .	106
Figure 55 Modèles linéaires de la croissance des pousses en fonction du temps (a) et des températures journalières ($T^{\circ}C$) (b) moyennes, (c) minimales et (d) maximales en fonction de la croissance des pousses.	108
Figure 56 Régression polynomiale (ordre 3) entre la température minimale et le taux intrinsèque d'accroissement des populations de <i>D. plantaginea</i> .	109

Liste des abréviations, sigles et acronymes

AI : Aphid Infestation

IP : Intensity of Pruning

LP : Low Pruning

MP : Medium Pruning

HP : High Pruning

NAI : Aphid-free tree (Non Aphid infestation)

DAI : Day After Artificial Infestation

IPM : Integrated Pest Managment

OILB : Organisation Internationale de Lutte Biologique

PEHD : Polyéthylène à Haute densité

L (l) : Litre

Min : Minute

Ha : Hectare

DF : Diamètre du fruit

PF : Poids Frais

FW : Fresh Weight

FL : Fruit Load

PLSH : Pulsed Stress Hypothesis

PSH : Plant Stress Hypothesis

PVH : Plant Vigor Hypothesis

Résumé

Etude écologique et agronomique d'un système « Culture fruitière – bioagresseur » : Cas d'un verger de pommiers dans la région de Mascara

En Algérie, la production fruitière intensive subit un usage excessif de pesticides et d'engrais chimiques, perturbant ainsi l'équilibre de l'écosystème. C'est pourquoi, le concept de la production fruitière intégrée (PFI) constitue une alternative à l'usage exclusif des intrants chimiques. Ainsi, la question de recherche centrale de cette thèse vise à clarifier les effets de deux méthodes culturales clés (la taille d'hiver et la fertilisation azotée) sur les interactions du système pommier- *Dysaphis plantaginea*. Les effets des températures environnantes sur le système y sont également évalués. Nous avons principalement examiné les effets de deux pratiques culturales sur la croissance végétative, la dynamique des populations du puceron et la production de fruits. Les expérimentations se sont déroulées en 2019 et en 2020 respectivement au champ pour la taille et en conditions contrôlées pour la fertilisation azotée. Nos travaux nous ont permis d'apporter beaucoup d'éléments nouveaux. Au champ, la dynamique de *D. plantaginea* décrivait une forme parabolique typique avec une phase optimale d'abondance (fin mai - mi-juin 2019) suivie d'une phase de déclin (mi-juin - début juillet). La croissance végétative des pommiers et l'indice d'infestation étaient proportionnels à l'intensité de taille pratiquée. Les niveaux élevés d'infestation ont affecté la croissance des pousses, en fin de saison. La croissance du fruit était liée à l'intensité de la taille et au degré d'infestation. Le rendement en fruits a augmenté lorsque l'intensité de la taille et l'infestation par les pucerons diminuent. En conditions contrôlées, les doses croissantes d'azote ont amélioré la croissance des pousses, y compris la production de nouvelles feuilles, en fin de saison. Les meilleures performances de croissance ont été obtenues par la dose d'azote intermédiaire de 75 % N. La croissance des pucerons était proportionnelle aux doses d'azote, corrélée avec une croissance importante des pousses. Les températures environnantes maximales ont induits une mortalité naturelle significative des pucerons (15. 61%). L'accroissement des effectifs du puceron était significativement favorisé que par les températures minimales. Néanmoins, la température minimale a affectée beaucoup plus la croissance des pousses que celle des pucerons. Les résultats obtenus fournissent une base solide pour améliorer notre compréhension des interactions entre *D. plantaginea* et le pommier et les pratiques culturales. Cependant, il existe encore certaines questions de recherche qui méritent d'être élucidées et étudiées en détail.

Mots clés : fertilisation azotée, interactions, Mascara, pommier, puceron cendré, taille d'hiver.

Abstract

Ecological and agronomic study of a "Fruit crop-Pest" system: the case of an apple orchard in Mascara.

In Algeria, intensive fruit production is subject to excessive use of pesticides and chemical fertilizers, thereby disrupting the ecosystem's balance. This is why the concept of integrated fruit production (IFP) constitutes an alternative to the exclusive use of chemical inputs. Therefore, the central research question of this thesis aims to clarify the effects of two key cultural methods (winter pruning and nitrogen fertilization) on the interactions of apple tree - *Dysaphis plantaginea* system. The effects of ambient temperatures on the system are also evaluated. We have primarily examined the effects of cultural practices on tree vegetative growth, aphid dynamics, and fruit production. The experiments took place in 2019 and 2020, respectively, in the field for pruning and in controlled conditions for nitrogen fertilization. Our research work has allowed us to contribute many new elements. The dynamics of *D. plantaginea* described a typical parabolic shape with an optimal abundance phase (late May to mid-June 2019) followed by a decline phase (mid-June to early July). The vegetative growth of apple trees and the infestation index were proportional to the intensity of pruning practiced. High levels of infestation affected shoot growth at the end of the season. Fruit growth was related to pruning intensity and aphid infestation. Fruit yield increased when pruning intensity and aphid infestation decreased. In controlled conditions, increasing nitrogen doses improved shoot growth, including the production of new leaves, at the end of the season. The best growth performances were achieved with the intermediate nitrogen dose 75 % N. The growth of aphids was proportional to nitrogen doses, correlated with significant shoot growth. Maximum ambient temperatures induced significant natural mortality of aphids (15. 61%). The aphid intrinsic rate of increase was significantly favoured only by daily minimum temperatures. However, daily minimum temperature affected shoot growth much more than aphid growth. The results obtained provide a solid foundation for improving our understanding of the interactions between *D. plantaginea* and apple trees, and cultural practices. However, there are still certain research questions that merit detailed study.

Keywords: Nitrogen treatment, interactions, Mascara, apple tree, rose apple aphid, winter pruning.

مُلخَص

"دراسة بيئية وزراعية لنظام "زراعة الفاكهة – الآفات": حالة بستان تفاح بمنطقة معسكر"

في الجزائر، يعاني الإنتاج المكثف للفواكه من الاستخدام المفرط للمبيدات والأسمدة الكيماوية، مما يخل بتوازن النظام البيئي. ولهذا السبب يشكل مفهوم الإنتاج المتكامل للفواكه (PFI) بديلاً للاستخدام الحصري للمدخلات الكيميائية. وبالتالي، فإن سؤال البحث المركزي في هذه الأطروحة يهدف إلى توضيح آثار طريقتين زراعتين رئيسيتين (التقليم الشتوي والتسميد النيتروجيني) على تفاعلات نظام التفاح-*Dysaphis plantaginea*. ويتم أيضاً تقييم تأثيرات درجات الحرارة المحيطة على النظام. لقد درسنا بشكل رئيسي آثار ممارستين ثقافيتين على النمو الخضري وديناميكيات تجمعات المن وإنتاج الفاكهة. أجريت التجارب في عامي 2019 و2020 على التوالي في حقل التقليم وتحت ظروف خاضعة للرقابة للتخصيب النيتروجيني. لقد سمح لنا عملنا بجلب العديد من العناصر الجديدة. في الميدان، وصفت ديناميكيات *D. plantaginea* شكلاً مكافئاً نموذجياً مع مرحلة الوفرة المثالية (نهاية مايو - منتصف يونيو 2019) تليها مرحلة الانخفاض (منتصف يونيو - بداية يوليو). كان النمو الخضري لأشجار التفاح ومؤشر الإصابة متناسبين مع شدة التقليم الممارس. أثرت مستويات الإصابة العالية على نمو البراعم الخضريّة في نهاية الموسم. وارتبط نمو الثمار بكثافة التقليم ودرجة الإصابة.

يزداد إنتاج الثمار عندما تتخفّف شدة التقليم وتقل الإصابة بحشرة المن. وفي ظل ظروف خاضعة للرقابة، أدت الجرعات المتزايدة من النيتروجين إلى تحسين نمو البراعم، بما في ذلك إنتاج أوراق جديدة، في نهاية الموسم. تم الحصول على أفضل أداء للنمو من خلال جرعة النيتروجين المتوسطة البالغة 75٪ N. وكان نمو حشرات المن متناسباً مع جرعات النيتروجين، المرتبطة بنمو كبير في البراعم. تسببت درجات الحرارة المحيطة القصوى في حدوث وفيات طبيعية كبيرة لحشرات المن (15.61٪). وكانت الزيادة في أعداد المن مفضلة بشكل كبير فقط من خلال درجات الحرارة الدنيا. ومع ذلك، فإن درجة الحرارة الدنيا أثرت على نمو البراعم أكثر بكثير من حشرات المن. توفر النتائج التي تم الحصول عليها أساساً متيناً لتحسين فهمنا للتفاعلات بين *D. plantaginea* وأشجار التفاح والممارسات الثقافية. ومع ذلك، لا تزال هناك بعض الأسئلة البحثية التي تستحق التوضيح والدراسة التفصيلية.

الكلمات المفتاحية: التسميد النيتروجيني، التفاعلات، معسكر، شجرة التفاح، المن الأشيب، التقليم الشتوي.

Introduction

En arboriculture, les systèmes conventionnels de culture intensive sont particulièrement vulnérables aux bioagresseurs. Ils sont soumis à une utilisation systématique et excessive de pesticides chimiques, ce qui a engendré des conséquences nocives pour l'environnement et la santé de l'homme (Aubertot *et al.*, 2005). Selon Hallmann *et al.* (2017), il y a eu une réduction préoccupante de la biodiversité dans les vergers fruitiers intensifs (en Suisse), avec une diminution de 75% de la biomasse des insectes, notamment des pollinisateurs, qui sont directement associée à l'utilisation de pesticides organiques. De plus, les nitrates provenant des engrais sont également considérés comme la principale source de pollution des eaux (souterraines et de surface) et des sols (Justes *et al.*, 2012).

Par conséquent, des alternatives aux produits chimiques et des méthodes innovantes de gestion des bioagresseurs sont nécessaires, tout en étant attentif à l'ensemble des interactions au sein du verger et aux exigences de production (Rousselin *et al.*, 2017). Ainsi, la connaissance de la relation entre les bioagresseurs et leurs effets sur la croissance et la production des cultures est utile pour concevoir des méthodes visant à minimiser les effets de l'infestation, tout en préservant les agro écosystèmes (Bardner et Fletcher, 2009). Bien que les interactions entre les plantes et les bioagresseurs soient complexes, elles dépendent fortement de la qualité de l'hôte, qui est liée à des facteurs biotiques et abiotiques, tous ayant une influence sur les performance des insectes phytophages (López-Carretero *et al.*, 2014).

Ces dernières années, les études se sont focalisées sur de nouvelles approches dans lesquelles le verger occupe un rôle central dans l'agro écosystème, notamment le concept de production fruitière intégrée (PFI). Ce concept est perçu comme la solution la plus favorable pour des méthodes agricoles durables dans les vergers modernes de production. Il s'appuie sur des méthodes écologiques et agronomiques. En effet, cette approche holistique examine les interactions entre les composantes du système « culture fruitière -bioagresseur » et leurs liens avec l'environnement et les pratiques culturales, sans affecter la rentabilité de la production (Damos *et al.*, 2015). Des pratiques culturales clés comme la taille, la fertilisation minérale azotée, pris en consécration dans la présente thèse, et l'irrigation constituent une composante majeure de la gestion intégrée des vergers, qu'il convient de reconsidérer dans le cadre de la PFI (Grechi *et al.*, 2008).

Les recherches sur les effets des principales pratiques culturales se sont jusqu'à présent concentrées sur les interactions du système agrumes -*Aphis spiraecola* Patch (Hemiptera : Aphididae) (Braham et Amor ,2018) et pêcher - *Myzus persicae* (Sulzer) (Homoptera : Aphididae) (Grechi *et al.*, 2008 ; Rousselin *et al.*, 2016). Ces études ont révélé que l'intensité de la taille, le régime azoté et le statut hydrique affectent les interactions entre la culture fruitière et les pucerons.

En Algérie, les travaux de recherche portant sur les aspects de la PFI ont été initiés par le laboratoire Géo-Environnement et développement des Espaces (GEDE) de l'université de Mascara dès 2018. Ces études ont porté sur l'analyse agronomique et écologique du système « olivier -insectes ravageurs » dans la région de Mascara (Houacine, 2023). Cet auteur a notamment abordé l'effet de la fertilisation azotée et de la taille d'hiver sur la relation tritrophique olivier- ravageurs-ennemis naturels (Houacine *et al.*, 2022). La seconde étude a porté sur les interactions du système pommier - *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera : Tortricidae) dans la région de Sidi Bel Abbés, en se concentrant sur l'effet du paysage sur la dynamique spatiale des populations larvaires (Mahi *et al.*, 2021 ; Mahi , 2022).

L'essor de l'arboriculture fruitière Algérienne (dont les rosacées à pépins) à partir de l'année 2000 grâce à des mesures de soutien mises en place par l'État, a conduit à une extension des superficies dédiées, ainsi que l'intégration de nouvelles méthodes de gestion, comme les vergers de pommiers intensifs (2000 plants par hectare) et super intensifs (plus de 3000 plants par hectare). Toutefois, la gestion des vergers n'a connu aucune amélioration des pratiques culturales, notamment la taille et la nutrition hydrominérale. Cette extension des vergers intensifs a favorisé l'installation et le développement de certains ravageurs spécifiques comme les pucerons, affectants le rendement aussi bien au niveau quantitatif que qualitatif.

Parmi les rosacées dominantes, le pommier occupe une superficie de 32 989 ha soit 18.6 % de la superficie totale des espèces à pépins et à noyaux. La production a atteint les 5 588 297 tonnes en 2019 enregistrant un accroissement de 11% par rapport à l'année 2018 (MADR, 2021). Dans la plupart des situations, cette production remarquable entraîne une utilisation excessive de pesticides, dont les impacts sur l'environnement n'ont jusque-là pas été évalués. Des résidus de pesticides plus élevés ont été détectés dans les pommes et les poires en raison d'une utilisation inappropriée (Abdessemed *et al.*, 2022 ; Mebdoua *et al.*, 2017).

Les principaux bioagresseurs du pommier qui causent régulièrement des dégâts importants, vers lesquels une lutte chimique intensive est déployée, sont la tavelure (*Venturia inaequalis* Cooke et *Venturia pirina*), le psylle (*Cacopsylla pyri*), le carpocapse des pommes et des poires et le puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea* Passerini) (Lombarkia *et al.*, 2013, Mahi *et al.*, 2021). Ce dernier est considéré comme la plus dangereuse espèce de pucerons qui attaque le pommier (Blommers *et al.*, 2004).

Il convient de rappeler que cette thèse fait partie d'un projet PRFU (Projet de Recherche Formation-Universitaire-2018-2022) ayant pour thème la "Conception de systèmes de Production Fruitière Intégrée (PFI) dans les vergers arboricoles du Nord-Ouest Algérien".

La présente étude s'intéresse au système « culture fruitière- bioagresseurs » dans le contexte de la production fruitière intégrée. La question centrale de recherche est celle de la gestion, par des pratiques culturales, des interactions entre les arbres fruitiers, leurs bioagresseurs et les conditions écologiques. En raison de son importance économique en Algérie, nous avons opté pour le système « pommier (*Malus domestica* Borkh.) - puceron cendré». Pour répondre à cette question de recherche, nous avons optés pour deux méthodes culturales, la taille d'hiver et la fertilisation azotée. De plus, nous avons cherché à mieux comprendre l'impact des conditions écologiques (températures) sur le système étudié.

Pour examiner l'hypothèse centrale de la présente recherche, l'étude se concentre d'abord, au champ, sur l'effet de différentes intensités de la taille des pommiers âgées et des températures ambiantes sur le système. Par la suite, l'étude se penche sur l'impact, dans des conditions contrôlées, d'un régime de fertilisation minérale azotée appliquée à des jeunes plants de pommiers (Gala) sur le système.

Les objectifs spécifiques du présent travail sont :

- (i) Apporter de nouvelles connaissances sur l'effet de la taille d'hiver et de la nutrition minérale azotée sur les interactions entre le pommier et le puceron cendré.
- (ii) Etudier le pouvoir de régulation naturelle du puceron cendré par les variables environnementales notamment les températures.
- (iii) Modéliser quelques paramètres influençant le système pommier-puceron cendré.

La thèse en question est divisée en cinq chapitres. Le premier chapitre est dédié aux aspects liés au concept de la Production Fruitière Intégrée et aux interactions « plantes hôtes-bio agresseurs ». Nous y présentons les multiples principes et méthodes utilisés en production fruitière intégrée en verger. Il y sera également question des bases fonctionnelles des interactions plante hôte-bioagresseurs. Le second chapitre est consacré à la plante hôte : le pommier et à son principal puceron ravageur *D. plantaginea*. Nous y aborderons notamment l'importance économique du pommier, ses exigences agro-environnementales et sa physiologie. Un aperçu sera également donné sur les principales caractéristiques biologiques et écologiques de *D. plantaginea*. Le troisième chapitre est dédié à la présentation de la zone d'étude et de la méthodologie. Dans un premier temps, nous abordons les caractéristiques agroécologiques de la zone d'étude et la description des sites expérimentaux. Ensuite, nous décrivons les méthodes utilisées pour les différentes expérimentations ainsi que celles relatives à l'exploitation des résultats et aux analyses statistiques. Le quatrième chapitre est centré sur les résultats obtenus dans les différentes études. Nous abordons d'abord les résultats relatifs à l'étude de l'impact de la taille et de la fertilisation azotée sur les interactions entre le pommier et le puceron cendré *D. plantaginea*. Ensuite, nous présentons les résultats concernant l'influence des variables environnementales sur le système pommier - *D. plantaginea*.

Enfin, un cinquième chapitre est consacré à la discussion des résultats obtenus pour les différentes études. A l'issue des cinq chapitres, la conclusion générale synthétise les principaux acquis de cette thèse et présente les perspectives de recherche.

CHAPITRE 1 :

*Concept de la production Fruitière Intégrée
« PFI » et interactions « plantes hôtes-
bioagresseurs*

CHAPITRE 1. Concept de la production Fruitière Intégrée « PFI » et interactions « plantes hôtes-bioagresseurs »

Dans ce premier chapitre nous allons avant tout rappeler ce que représente le concept de la Production Fruitière Intégrée (PFI) en citant ses objectifs ainsi que son importance. Des notions sur les interactions « plantes-bioagresseurs » seront ensuite développées, en particulier celles du « pommier-puceron cendré ».

1.1. Concept de la Production Fruitière Intégrée « PFI »

La production fruitière intégrée est une approche durable de l'agriculture qui combine différentes méthodes pour lutter contre les bioagresseurs tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement. Il s'agit d'une approche en constante évolution qui nécessite une adaptation et une amélioration constante basée sur de nouvelles recherches et les meilleures pratiques.

1.1.1. Définition et objectifs

L'organisation Internationale de Lutte Biologique définit le concept de la PFI comme étant un "système de production économique de fruits de haute qualité donnant la priorité aux méthodes écologiquement plus sûres, minimisant les effets secondaires indésirables de l'utilisation de produits agrochimiques afin d'améliorer la protection de l'environnement et la santé humaine"(El Titi *et al.*, 1993).

La PFI vise à satisfaire simultanément trois exigences. D'une part, des exigences environnementales qui consistent à réduire les impacts négatifs des pratiques agricoles comme la pollution par les pesticides et la fertilisation minérale au sein des vergers fruitiers et par conséquent, augmenter les performances de l'environnement. D'autre part, la PFI doit garantir la production de fruits de qualité, en particulier sur le plan sensoriel et nutritionnel. Enfin, il s'agit de proposer aux arboriculteurs des techniques de production fruitière répondants aux exigences suscitées et économiquement viables (Rousselin *et al.*, 2017 ; Simon *et al.*, 2018) (Fig.1) et qui s'appuient sur la régulation de l'agro écosystème et la préservation des ressources naturelles (Boller *et al.*, 2004).

1.1.2. Aperçu historique sur la PFI

L'agriculture conventionnelle utilise exclusivement des engrais et des pesticides. Ces intrants offrent des avantages à court terme en assurant notamment la sécurité de la production.

Ils peuvent engendrer à long terme des effets secondaires graves sur l'ensemble des compartiments de l'environnement (sol-eau-air) et sur la santé de l'homme (Sheahan *et al.*, 2017). Cette situation a engendré plusieurs problèmes de pollution de l'eau, de l'air et de l'atmosphère, et une perte de la biodiversité utile (notamment les insectes) (Burdon *et al.*, 2019 ; Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019). Elle a également fait apparaître des phénomènes de résistance aux produits phytopharmaceutiques. C'est pourquoi et pour y faire face, de nouveaux moyens de production durable ont été développés. Ainsi, vers la fin des années 1950, l'Organisation Internationale de Lutte Biologique (OILB) a développé le concept de la protection intégrée des cultures (IPM) (Boller *et al.*, 2004).

L'IPM est une approche holistique de lutte contre les bioagresseurs qui combine diverses techniques, telles que la lutte biologique, les pratiques culturales et l'utilisation rationnelle des pesticides (Damos *et al.*, 2015). Le recours aux pesticides ne se justifie que si le seuil de nuisibilité est dépassé. Néanmoins, les seuils économiques établis pour les bioagresseurs ne prennent pas en compte les effets collatéraux des pesticides sur l'environnement et la faune auxiliaire.

C'est pourquoi, à partir des années 1990 et pour des raisons liées à la performance et à la rentabilité économique de la production fruitière (Horlings et Marsden, 2011), le concept général et l'IPM devient un élément indispensable d'une nouvelle approche systémique holistique spécifique aux vergers fruitiers. Cette approche dite « Production Fruitière Intégrée » (PFI) initiée en Europe, s'est étendue à d'autres continents, comme l'Amérique du Nord à partir de l'année 2001 (Chouinard, 2001 ; Valiushkaitė *et al.*, 2017).

1.1.3. Problématique des pesticides chimiques

En Europe, la diminution du nombre de substances actives disponibles a favorisé l'émergence de résistances.

En effet, sur les 1000 substances actives homologuées, sur insectes et champignons pathogènes, en 2001, seulement 250 sont actuellement autorisées à l'usage et la tendance est à la baisse (Jensen, 2015). Cette situation étant favorable renforce la recherche de moyens de lutte écologiques vis-à-vis des bioagresseurs.

En Algérie, 437 pesticides soit 33.6 % du total homologuées (insecticides : 43.80 % ; fongicides : 41.61% ; acaricides : 5.84 et herbicides 8.76%) sont homologués à l'usage sur les rosacées à pépins (pommier et poirier), la part des pesticides de synthèse, d'origine chimique est de 94.05 % contre seulement 5.95 % de produits d'origine biologique (MADRP, 2017).

Bien que 23 matières actives aient été retirées du marché en 2022 (suite à leur interdiction en Europe), les études de sélectivité des substances autorisées en Algérie, sur les rosacées en particulier, demeurent très rares. En plus de l'utilisation des pesticides chimiques sélectifs, le renforcement de la lutte devrait rechercher des solutions biologiques complémentaires ou alternatives (auxiliaires, entomopathogènes extraits de plantes,...).

La PFI encourage l'utilisation de pesticides sélectifs (faible impact sur l'environnement et les organismes non ciblés) comme option de dernier recours lorsque les autres méthodes sont inefficaces. L'utilisation appropriée des produits phytosanitaires en PFI doit être justifiée économiquement (seuil économique atteint par le bioagresseur cible). Elle nécessite d'abord une surveillance régulière des ravageurs au sein du verger et doit utiliser une combinaison de méthodes telles que l'observation des symptômes, les pièges à phéromones, le suivi de la dynamique des populations des ravageurs et de leurs ennemis naturels (Audemard, 1987).

1.1.4. Importance agroécologique de la PFI

En raison de son importance économique sur le marché mondial et du développement de l'agriculture intensive, l'arboriculture fruitière se caractérise par une utilisation accrue et souvent abusive de pesticides et de fertilisants chimiques (Simon *et al.*, 2011). En effet, malgré le développement de nouveaux concepts agroécologiques de lutte phytosanitaire, la dépendance aux pesticides n'a fait qu'augmenter à travers le monde en raison notamment du non-respect des cahiers de charges de production (Matyjaszczyk, 2019) et du changement climatique qui a modifié le comportement des insectes ravageurs (Bonato *et al.*, 2023).

Selon la FAO, l'usage des pesticides au niveau mondial a quasiment doublé entre 1990 et 2018, passant de 1.7 à 2.7 millions de tonnes (FAOSTAT, 2020). En Europe, en moyenne 350000 tonnes (entre 2011-2020) de pesticides sont utilisés annuellement pour la protection des cultures (Eurostat, 2022).

Parmi les espèces fruitières, le pommier est l'une des cultures fruitières les plus traitées. À titre indicatif, en France, en moyenne 30 à 40 traitements chimiques annuels sont utilisés pour lutter contre les principaux bioagresseurs du pommier contre 20 à 25 traitements pour le pêcher et 12 à 13 pour le prunier (Sauphanor *et al.*, 2009 ; Mercier *et al.*, 2016). C'est pourquoi la démarche PFI a d'abord été adoptée pour le pommier (Toubon *et al.*, 2001), puis s'est élargie aux autres espèces fruitières, afin de réduire l'intensité de l'utilisation des produits phytosanitaires en verger.

S'appuyant sur le concept de la protection intégrée, la PFI vise ainsi à réduire l'intensité des applications chimiques au sein des vergers par la prise en considération, entre autres, des seuils de nuisibilité et des niveaux d'infestation des bioagresseurs. Plusieurs leviers peuvent être mis en œuvre pour maintenir les ravageurs à des niveaux justifiés du point de vue économique, en adoptant une logique d'adaptation des pratiques à chaque situation parcellaire et non systématique. Ces pratiques complémentaires intègrent des méthodes génétiques, agroécologiques, biologiques, chimiques et culturales, qui doivent veiller à perturber le moins possible l'agro écosystème et encourager les mécanismes naturels de lutte contre les populations nuisibles (Deguine et Penvern, 2014).

1.1.5. L'approche système en PFI

La PFI englobe l'ensemble des vergers ainsi que leur environnement. L'IFP et IPM constituent un cadre pour une production fruitière économique et de haute qualité, tout en mettant l'accent sur le respect de l'environnement. Cette approche privilégie des méthodes plus sûres, telles que les méthodes biologiques et culturales, tout en limitant les effets secondaires indésirables des pesticides et en réduisant les risques pour la santé humaine (Boller *et al.*, 2004 ; Bazoche *et al.*, 2014). Un nombre croissant de chercheurs s'intéressent à cette nouvelle approche (Damos *et al.*, 2015).

Dans l'ensemble, les principes clés de la PFI visent à établir un équilibre entre rentabilité économique, durabilité environnementale et responsabilité sociale dans la production fruitière. Ainsi, l'utilisation de différentes méthodes de lutte phytosanitaire, y compris chimique, doit être envisagée dans le cadre d'une approche systématique pour soutenir les objectifs de production du verger. Le verger doit donc être considéré comme un système « arbre-bioagresseur » dans lequel les approches agronomiques et écologiques sont privilégiées.

L'approche écologique se focalise sur les interactions entre la plante, les bioagresseurs, les auxiliaires et le milieu, en tenant compte des propriétés écologiques et biologiques (bioagresseurs, auxiliaires et plante). En revanche, l'approche agronomique vise à manipuler ces interactions grâce à des actes techniques (ex : taille, fertilisation, irrigation) dans le système de verger (Fig.2) (Laget *et al.*, 2015). Bien que l'IPM et la PFI abordent différemment les aspects liés au processus de production agricole, elles sont considérées comme des approches complémentaires pour promouvoir l'agriculture durable et protéger l'environnement.

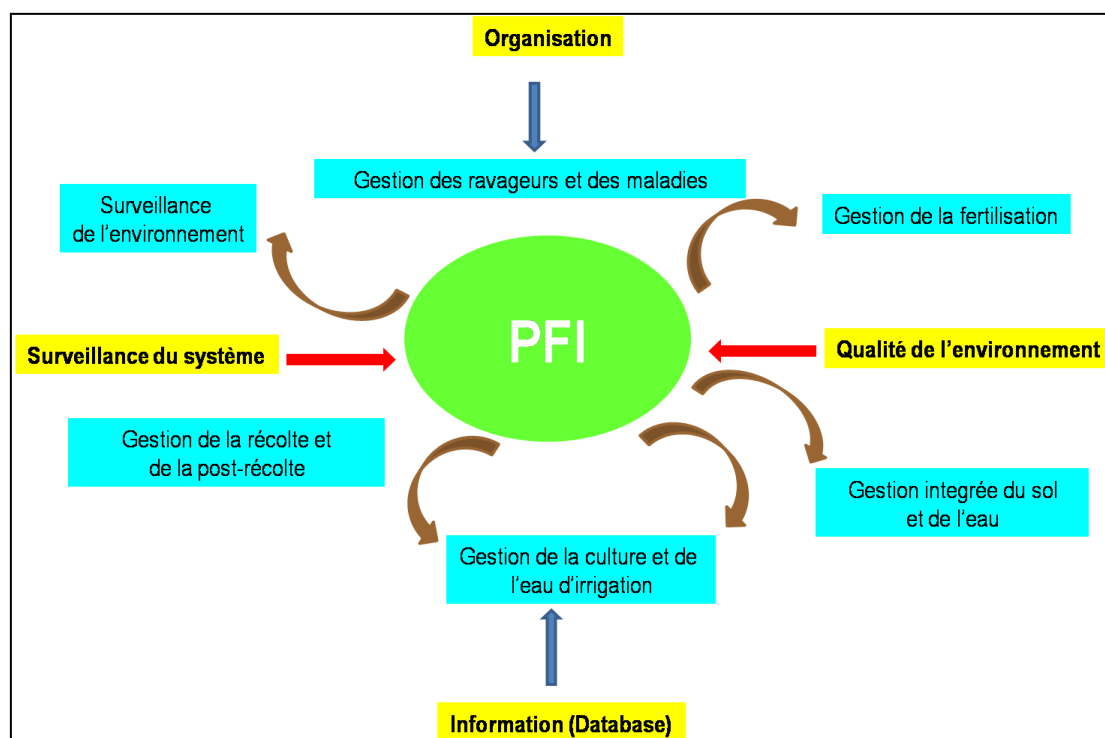


Figure 1 L'approche systémique du concept de la production fruitière intégrée (PFI).

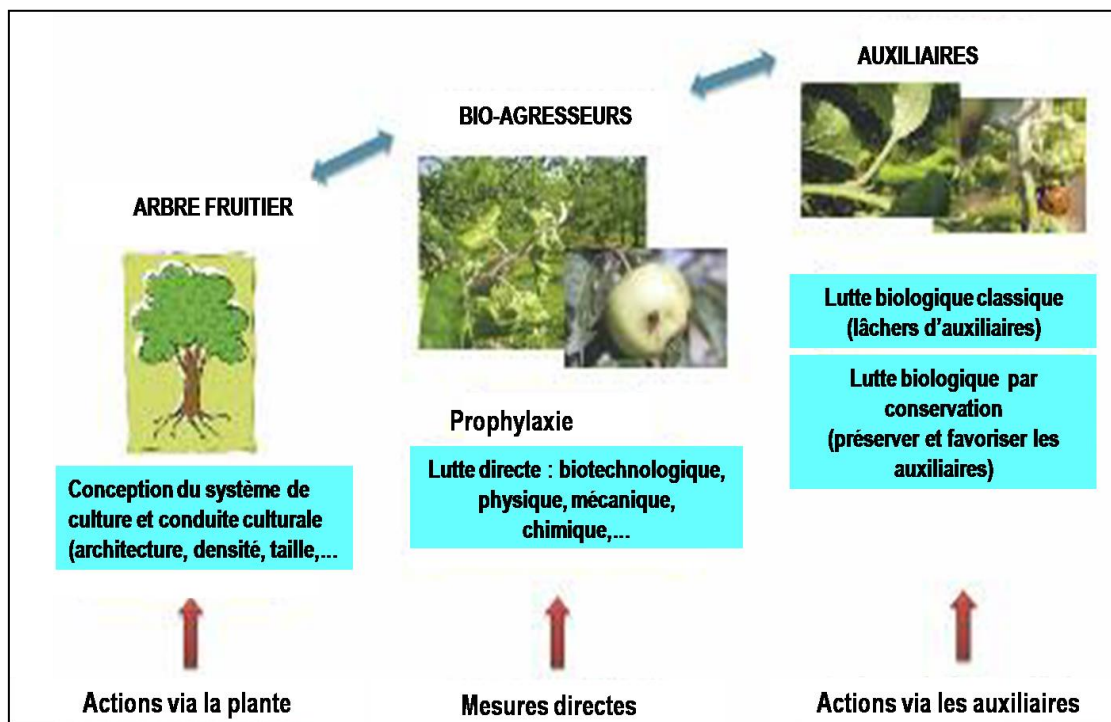


Figure 2 Représentation simplifiée des interactions trophiques dans un verger fruitier et des moyens d'action pour limiter le développement des ravageurs (Laget *et al.*, 2015 ; modifié).

1.1.6. Les principes clés de la PFI

La combinaison adéquate des méthodes culturales avec les autres méthodes de lutte (c.à.d. : chimiques, biologiques, génétiques) peuvent non seulement contribuer à limiter les dégâts engendrés par les bioagresseurs, mais aussi assurer la durabilité de l'agro écosystème des vergers. Ainsi, la PFI s'appuie sur des leviers agronomiques et écologiques pour la mise en place d'une gestion des bioagresseurs adaptée à chaque verger fruitier. Selon plusieurs auteurs (Boller *et al.*, 2004 ; Petit et Lescourret, 2019 ; Barzman *et al.*, 2015 ; Yadav *et al.*, 2023), la PFI (Fig.3) s'appuie sur les principes clés suivants :

- Gestion des bioagresseurs par la mise en œuvre de mesures préventives et de lutte biologique.
- Gestion et conservation des sols par la protection vis-à-vis de l'érosion, la réduction du travail du sol, l'utilisation des matières organiques et l'utilisation des cultures de couverture en inter-rang des vergers.

- Des méthodes culturales par le choix judicieux du type de conduite du verger, du désherbage et par l'optimisation de la fertilisation minérale.
- Gestion de l'eau par le biais d'une utilisation rationnelle et réfléchie et tenant compte des besoins de la plante.
- Développement de la biodiversité au sein du verger fruitier en utilisant des moyens qui favorisent l'équilibre de l'écosystème (haies, pièges à insectes et oiseaux utiles,...).
- Protection de l'environnement grâce à une utilisation rationnelle des ressources et des facteurs de production (eau, énergie, pesticides, engrais).

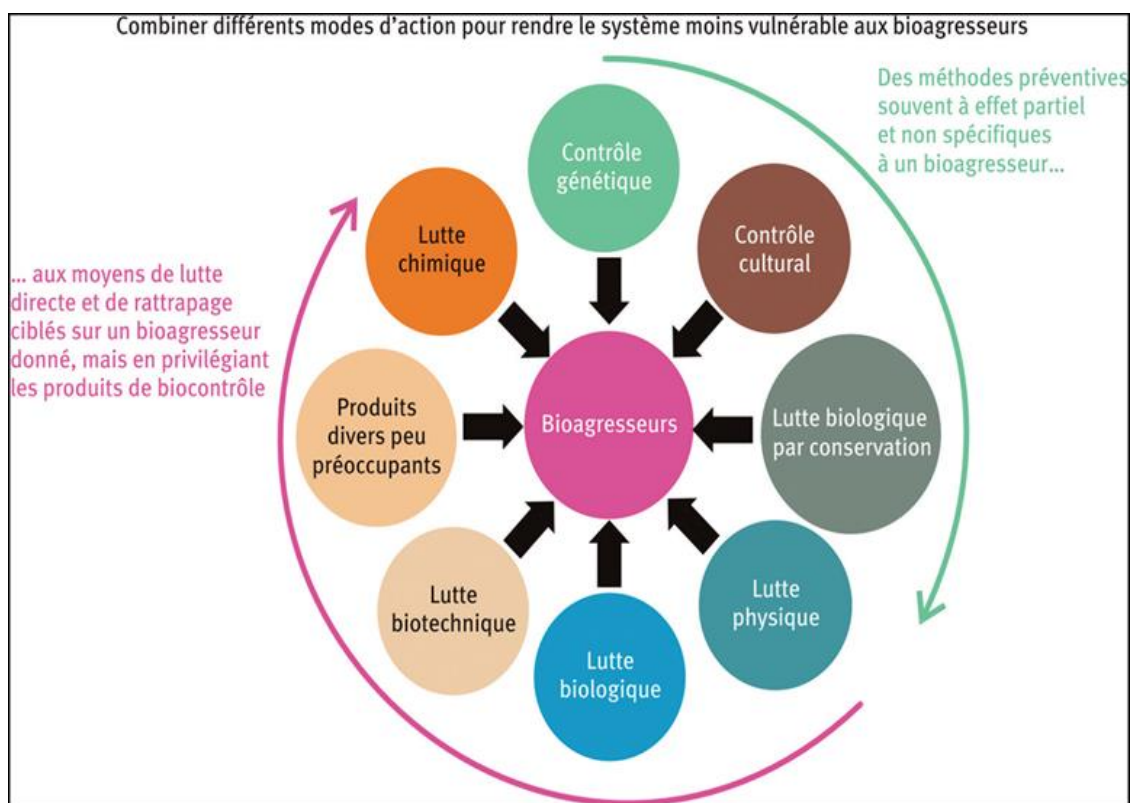


Figure 3 Principaux leviers agronomiques et écologiques utilisés en production fruitière intégrée (Laget *et al.*, 2015).

1.1.7. Les méthodes culturales en PFI : la taille d'hiver et la fertilisation azotée

Plusieurs auteurs s'accordent sur le fait que les méthodes ou techniques culturales (fertilisation, irrigation, taille, conduite de l'arbre) constituent un levier important de la PFI.

En effet, elles sont capables d'agir sur le système fruitier et de contribuer ainsi à limiter le développement des bioagresseurs. Ce sont essentiellement des méthodes préventives qui s'inscrivent dans le raisonnement agronomique global de la gestion des cultures et qui reposent sur la combinaison de techniques ayant une efficacité partielle sur les bioagresseurs (Laget *et al.*, 2015).

En production fruitière intensive, les techniques culturales telles que la gestion de l'irrigation, la fertilisation et la conduite culturale (taille, densité, architecture) ont un impact significatif sur la vigueur des arbres. Cela influence le développement des bioagresseurs par la modification du microclimat au sein de la frondaison (ex : éclaircissement, aération), la dynamique de croissance de la végétation et la composition biochimique des organes de l'arbre (ex : teneur en azote, acides aminés, carbone, sucres) (Schellhorn *et al.*, 2000 ; Simon *et al.*, 2018).

La taille d'hiver et la fertilisation azotée sont deux pratiques culturales majeures utilisées dans les vergers pour contrôler les performances des cultures. En même temps, ils affectent indirectement les performances des pucerons (Grechi *et al.*, 2010). La fertilisation azotée en particulier, en agissant sur la composition biochimique des arbres et sur la croissance des organes végétatifs, affecte l'attractivité de la plante pour certains bioagresseurs (Laget *et al.*, 2015). En effet, un excès de vigueur de la plante, résultant d'une fertilisation excessive, crée des conditions favorables au développement des insectes notamment piqueurs suceurs (pucerons, acariens), comme l'ont démontré les travaux de Sauge *et al.* (2010) et de Grechi *et al.*, (2010) sur la culture du pêcher. Ces études ont montré une corrélation positive entre le statut azoté, le développement végétatif et le développement des populations du puceron du pêcher *Mysus persicae* (Sulzer) (Homoptera: Aphididae).

La taille est une intervention cruciale dans la gestion du verger. Elle sert à contrôler la taille des arbres, la pénétration de la lumière au sein de la canopée de l'arbre et l'équilibre entre la croissance végétative et reproductive (Fumey *et al.*, 2011). La taille peut également influencer la hauteur et la stabilité des arbres ainsi que la qualité du rendement (Almeida et Fioravanço 2018 ; Grechi *et al.*, 2008 ; Mészáros *et al.*, 2017).

Les interventions de taille peuvent également être un levier d'action directe contre les ravageurs, en créant des conditions défavorables au développement de ceux-ci, comme les acariens et les pucerons (Rousselin *et al.*, 2017).

En modifiant la répartition et la disponibilité des ressources au sein de l'arbre, la taille peut aussi influencer les interactions tritrophiques « arbre fruitier-insecte, ravageurs-ennemis naturels (Martinez et Wool, 2003).

De nombreuses études ont démontré que la taille affecte le développement des ravageurs et maladies (Holb *et al.*, 2001 ; Grechi *et al.*, 2008 ; Mdellel *et al.*, 2015 ; Braham et Amor., 2018 ; Hoque *et al.*, 2022). Cependant, les effets spécifiques peuvent varier en fonction de la culture, de l'espèce du ravageur et de la méthode de taille.

1.1.8. Aperçu sur le processus de normalisation de la PFI

En Europe, l'intégration des arboriculteurs dans la démarche du concept de la production fruitière intégrée est conditionnée par l'adhésion au système de certification des produits en PFI et à la souscription d'un cahier des charges et d'une charte de production comportant en particulier des critères agronomiques, écologiques et de qualité de production (Bellon *et al.*, 2006). La première demande de certification relative à la PFI est déposée, en France, fin 1992, par le Comité de valorisation pour la production fruitière intégrée (COVAPI), agréé par l'OILB. Cette dernière, a établi les lignes directrices d'une mise en œuvre concrète des principes de la production intégrée, de l'application à la labellisation en passant par le contrôle, rendant ainsi accessible la différenciation des produits par la production intégrée. Ce processus a été adopté surtout pour la filière pomme qui domine en Europe, puis s'est élargi aux autres filières arboricoles et viticoles (Cazals, 2009).

L'application stricte des normes de la PFI a permis dans certains pays de l'Europe de l'Ouest d'engendrer une réduction substantielle (environ 30 %) de l'utilisation de pesticides (Cross *et al.*, 1996).

1.1.9. La recherche scientifique et le concept de la PFI

Une analyse très récente effectuée par Wyckhuys *et al.* (2023) rapportent que 80 % des 3 407 publications scientifiques réalisées dans le domaine de la protection des cultures dans 65 pays abordent les méthodes de lutte de manière isolée, avec une attention limitée accordée aux interactions insectes ravageurs-culture.

Afin de répondre aux objectifs du développement agricole durable, les mêmes auteurs soutiennent que les travaux de recherche devraient intégrer la complexité des systèmes de culture en y intégrant les études sur les interactions des plantes hôtes avec l'ensemble des facteurs intervenant dans l'agro écosystème. En Algérie, les travaux sur le concept de la production fruitière sont très rares, voire inexistantes à l'exception de ceux réalisés sur la culture de l'olivier par Houacine (2023) et partiellement sur le pommier et le poirier par Mahi (2022).

1.2. Interactions « plantes hôtes-bio agresseurs »

Les interactions plante-insectes sont influencées directement ou indirectement par plusieurs facteurs de stress d'ordre biotique et abiotique. Ces interactions peuvent avoir des conséquences écologiques et économiques, dans la mesure où les infestations de bioagresseurs peuvent entraîner d'importantes pertes de rendement. Comprendre la complexité des interactions plantes hôte-bioagresseurs est essentiel au développement de pratiques agricoles durables et au maintien d'un écosystème sain.

1.2.1. La sélection des plantes hôtes par les insectes phytophages

La sélection de plantes hôtes par les insectes phytophages est en grande partie déterminée par les insectes adultes qui choisissent le lieu de développement des descendants. Chez de nombreuses espèces, les stades immatures ne changent pas de plantes hôtes ou de localisation au sein de la plante hôte durant leur développement. Par conséquent, la quantité et la qualité de la nourriture disponible pour leur développement, mais aussi les conditions écologiques environnantes résultent du choix des parents (Sauvion *et al.*, 2013).

La spécialisation trophique des insectes phytophages implique plus précisément la vision, l'olfaction, la mécano-sensation, la gustation et les composés volatiles émis par la partie aérienne de la plante (Verdugo *et al.*, 2016).

Ces derniers semblent être principalement impliqués dans la discrimination interspécifique (Bernays, 2001). En effet, les composés volatiles de la plante sont généralement responsables du choix des plantes hôtes par les insectes phytophages qui peuvent être soit spécialistes (monophages stricts) soit généralistes (polyphages). C'est le cas, par exemple, du puceron vert du pêcher *M.persicae* qui est un phytophage généraliste ayant comme hôte principal le pêcher et comme hôte secondaire environ 400 plantes appartenant à différentes familles (Blackman et Eastop, 2000). Par contre, le puceron cendré *D. plantaginea* est spécialiste sur le pommier (Blommers *et al.*, 2004).

La spécialisation des insectes phytophages vis-à-vis de leurs plantes hôtes n'est pas seulement alimentaire, mais les plantes constituent également un site de survie, de reproduction et de développement des différents stades biologiques (Forister *et al.*, 2015).

1.2.2. Défenses des plantes et mécanismes de résistance

Les plantes sont constamment attaquées par divers ravageurs et agents pathogènes. Pour se défendre contre diverses invasions, elles utilisent une série de mécanismes de défense induits directement ou indirectement selon le ravageur et son degré d'attaque. Cependant, le succès des défenses des plantes dépend de la reconnaissance rapide et spécifique de la menace phytophage (Santamaria *et al.*, 2018).

Beaucoup de ces mécanismes sont régulés par des voies de signalisation dans lesquelles les phytohormones jouent un rôle important. Dans le même temps, les insectes développent également des stratégies pour surmonter les barrières végétales, conduisant à une coévolution intéressante des relations plante-insectes (Rustagi *et al.*, 2021). Les réponses de la plante hôte peuvent varier depuis des changements dans l'activité métabolique et le modèle d'expression des gènes des plantes jusqu'à des changements dans leur croissance et leur développement global (Malik *et al.*, 2021).

La résistance et la tolérance sont les deux principales formes de défense des plantes contre les attaques des ravageurs phytophages (Kariñho-Betancourt et Nuñez-Farfán, 2015). Les plantes ont développé une vaste gamme de mécanismes de résistance pour compenser le stress biotique causé par les insectes herbivores.

C'est le cas par exemple du pommier, où les deux cultivars Gala et Golden Delicious sont sensibles aux dégâts du puceron cendré *D. plantaginea* (Miñarro et Dapena, 2007) tandis que le cultivar Florina est résistant (Qubbaj *et al.*, 2005).

La vigueur des plantes peut également jouer un rôle dans la résistance aux ravageurs, mais cette relation peut être complexe et dépendre de nombreux facteurs, notamment les interactions spécifiques entre les plantes et les bioagresseurs et les conditions environnementales.

1.2.3. Interactions plante- insectes phytophages : cas des pucerons

1.2.3.1. Principaux facteurs impliqués

Les facteurs biotiques et abiotiques auxquels sont exposées les plantes affectent leur physiologie, leur composition biochimique et leur croissance. Les interactions plante-ravageurs sont modulées par ces changements et dépendent fortement de la qualité de l'hôte, elle-même liée à des facteurs qui affectent toutes les performances des insectes (King *et al.*, 2006 ; López-Carretero *et al.*, 2014). En effet, ces interactions peuvent être altérées par un manque ou un excès de nutriments (azote, eau) et par des facteurs de stress (excès de températures, rayonnement) (Lobell et Gourdj, 2012). En réponse aux situations de stress climatique ou de déficit nutritionnel, les insectes phytophages ont la capacité d'adapter leur cycle biologique (croissance, temps de survie et nombre de générations) (Mullins, 2015). Le comportement alimentaire des insectes (piqueur-suceur ou broyeur) est un facteur crucial dans la réponse de défense de la plante et les mécanismes utilisés pour percevoir les insectes provenant de différents groupes alimentaires peuvent être distincts (Bonaventure, 2012).

1.2.3.2. Cas de la production fruitière et des pucerons

Parmi les insectes piqueurs suceurs, les pucerons sont des ravageurs économiquement importants en agriculture et sont considérés comme les plus nuisibles sous les climats tempérés et méditerranéens (Rousselin *et al.*, 2017). Ces insectes phytophages utilisent leurs pièces buccales pour percer les tissus végétaux et aspirer la sève élaborée riche en nutriments qu'ils détournent à leur profit, affectant directement la croissance et la production des plantes-hôtes (Fig.4). Durant la phase d'alimentation, ces ravageurs injectent de la salive qui peut être phytotoxique et peuvent transmettre de nombreux virus (Katis *et al.*, 2007).

Ils produisent également du miellat qui favorise la fumagine qui entrave la photosynthèse et compromet par conséquent la croissance végétative, réduisant ainsi le rendement (Varn, 1987).

En production fruitière, ils peuvent induire principalement un retard de croissance végétative, des déformations foliaires et une mauvaise fructification (Quisenberry et Ni, 2007). Ces effets peuvent induire une diminution des réserves en carbone et ainsi modifier la croissance de l'arbre à long terme (Zvereva *et al.*, 2010). L'intensité des dégâts dépend du stade phénologique, de la sensibilité de la plante hôte, du niveau d'infestation et du cycle biologique du puceron.

En effet, les pucerons se caractérisent par des cycles de développement qui diffèrent selon les espèces. Certaines espèces sont monoïques et demeurent sur la plante hôte toute l'année, alors que d'autres sont dioïques qui alternent au cours de l'année entre un hôte primaire d'hiver (l'arbre fruitier) et un hôte secondaire estival (plante herbacée) (Rousselin *et al.*, 2017). Les pucerons ont un cycle de développement complexe qui implique à la fois une reproduction sexuée et asexuée (parthénogénétique).

Le cycle, dit holocyclique est caractérisé par une alternance entre la reproduction parthénogénétique et sexuée (Fig.5), c'est le cas du puceron vert *Aphis pomi* (Hemiptera : Aphididae) et du puceron cendré du pommier *D. plantaginea* (Saguez, 2007). Tandis que le cycle anoholocyclique implique uniquement la parthénogenèse, c'est le cas pour le puceron lanigère du pommier *Eriosoma lanigera* (Hemiptera : Eriosomatidae). Le mode de reproduction par parthénogenèse favorise la multiplication et la prolifération rapide des pucerons qui peuvent ainsi envahir leurs hôtes.

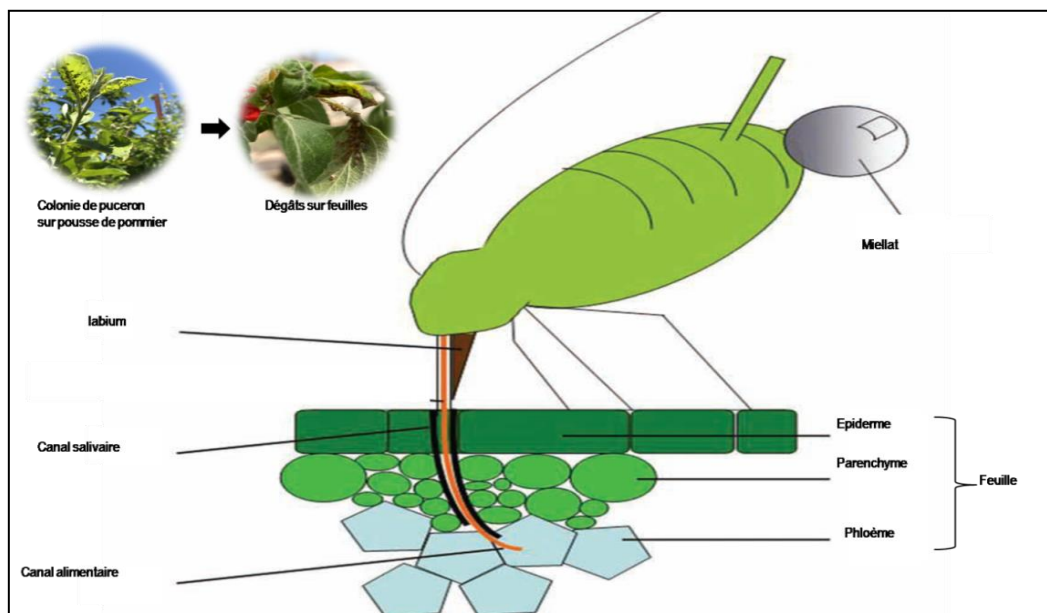


Figure 4 Représentation schématique du mode alimentaire d'un puceron (Guerrieri et Digilio, 2008 ; modifié).

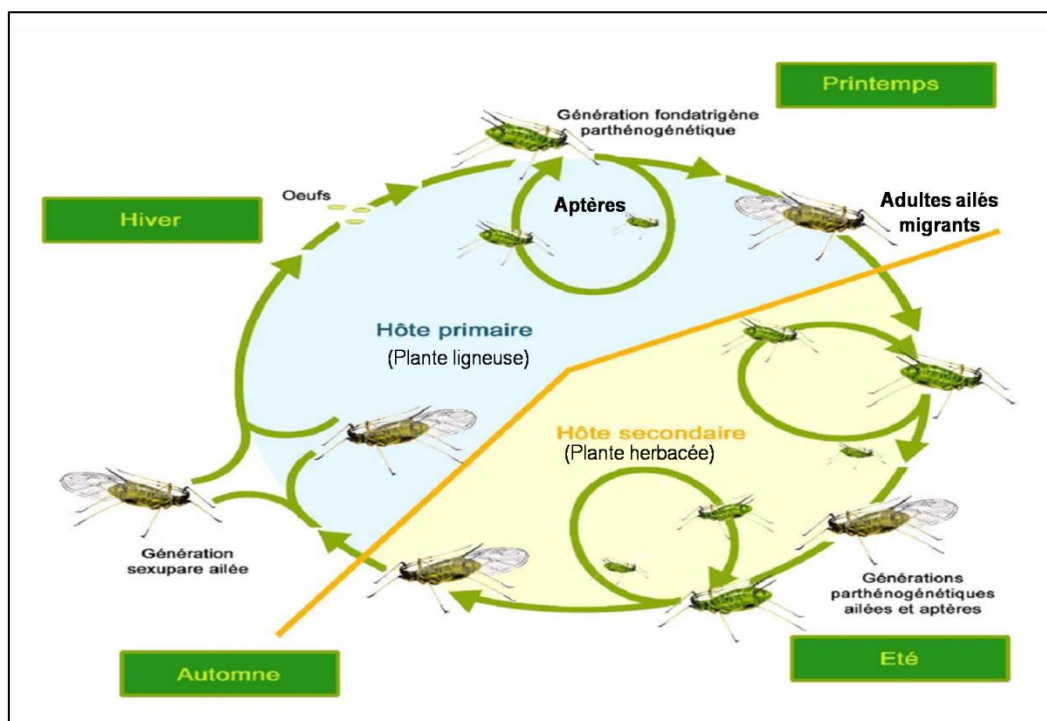


Figure 5 Cycle de développement holocyclique des pucerons (Saguez, 2007 ; modifié).

1.2.4. Effets des pratiques culturales

La taille d'hiver et la fertilisation azotée sont deux pratiques cruciales en production fruitière. La fertilisation modifie l'équilibre nutritif des plantes, améliore l'état nutritionnel des tissus végétaux et influence la synthèse des composés de défense (Awmack et Leather, 2002). De même, l'irrigation souvent associée à la fertilisation (fertirrigation) contrôle la vigueur des plantes ainsi que la qualité nutritionnelle et la viscosité du phloème, régulant éventuellement l'abondance des ravageurs (Han *et al.*, 2019). Quant à la taille d'hiver, elle assure l'équilibre entre la croissance végétative et reproductive. Le niveau de la fertilisation azotée peut également avoir un effet sur l'abondance des ravageurs (Bussi *et al.*, 2006) et sur les interactions tri trophiques plantes hôte-ravageurs-auxiliaires (Banfield-Zanin *et al.*, 2012).

La taille d'hiver et la fertilisation azotée peuvent être respectivement modulées par le type de coupe pratiquée (intensité de la taille) et par le fractionnement (dose et période d'apport) et peuvent être utilisées pour le contrôle des populations des bioagresseurs, les pucerons en particulier (Lobit *et al.*, 2001). En effet, de nombreuses études menées sur différentes espèces fruitières ont montré que l'intensité de la taille (Bussi *et al.*, 2005 ; Grechi *et al.*, 2008 ; Kaith *et al.*, 2011 ; Albarracín *et al.*, 2017 ; Choudhary *et al.*, 2020 ; Lodolini *et al.*, 2019 ; Lodolini *et al.*, 2023), et la fertilisation azotée (Lobit *et al.*, 2001 ; Pole *et al.*, 2017 ; Cocco *et al.*, 2021) favorisent la croissance végétative.

Pour ce qui est de l'effet de la fertilisation azotée sur les interactions arbres fruitiers-pucerons, des travaux menés sur le pêcher et les agrumes ont montré respectivement que les apports d'azote affectent les performances du puceron vert *M. persicae* (Sauge *et al.*, 2010 ; Rousselin *et al.*, 2016 ; Iagħfiri *et al.*, 2017) et la mouche *Bactrocera oleae* (Diptera : Tephritidae) (Rodrigues *et al.*, 2019). Les effets de l'intensité de la taille d'hiver sur les interactions arbres fruitiers- pucerons ont été très peu abordés par la recherche, à l'exception des travaux effectués par Grechi *et al.* (2008) sur pêcher et de Braham et Amor (2018) sur agrumes.

Cependant, l'effet du statut nutritif des plantes sur la croissance des populations de ravageurs demeure assez ambigu et soutenu par deux hypothèses diamétralement opposées. D'un côté, l'hypothèse de la vigueur des plantes (plant vigour hypothesis : PVH) stipule qu'une plante peut influencer ses interactions avec les ravageurs et les maladies.

Cette hypothèse affirme que les populations de ravageurs devraient augmenter plus rapidement sur les plantes vigoureuses puisqu'elles fournissent plus de ressources (Price, 1991). D'un autre côté, l'hypothèse du stress végétal (plant stress hypothesis : PSH) soutient que les ravageurs se comportent mieux sur des plantes stressées qui n'auraient pas de ressources pour déployer des défenses et/ou dont la qualité nutritionnelle pourrait être améliorée (White, 1984).

CHAPITRE 2 :

Le système biologique

« pommier – puceron cendré »

Chapitre 2. Le système biologique « pommier – puceron cendré »

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que, selon les principes de la PFI, le verger fruitier doit donc être considéré comme un système « arbre-bioagresseur » dans lequel les approches agronomiques et écologiques sont privilégiées. Dans le cadre de ce travail de recherche, le choix s'est porté sur l'étude du système biologique constitué du pommier *Malus domestica* et du puceron cendré comme bioagresseur. La sélection de ces deux composantes biologiques est appropriée pour répondre à notre question de recherche, en raison des interactions étroites entre les arbres fruitiers et les pucerons (voir section 1.2.3. ; Chap.1) et leur importance économique justifient le choix de ces deux modèles biologiques.

2.1. La plante hôte : le pommier *Malus domestica* L.

2.1.1. Position taxonomique et description générale

Le pommier appartient à l'ordre des rosales, à la famille des rosacées, la sous famille des Maloideae et au genre *Malus*. Originaire du Caucase et d'Asie Mineure (Bretaudeau, 1978), il est largement répandu dans le monde, notamment dans les zones tempérées (Giraud *et al.*, 2014). Il existerait plus d'une quarantaine d'espèces du genre *Malus*, appartenant à la famille des rosacées (Robinson *et al.*, 2001). On dénombrerait aujourd'hui plus de 7500 cultivars de pommier dont une centaine est actuellement cultivée commercialement dans le monde (Dulov, 2022). Le pommier cultivé est considéré comme un hybride interspécifique, généralement désigné par *Malus x domestica* Borkh (Korban et Skirvin, 1984) ou *Malus pumila* Mill. (Mabberley *et al.*, 2001). *M. domestica* Borkh reste la dénomination de référence est la plus utilisée (Qian *et al.*, 2010).

Malus domestica est une espèce pérenne hermaphrodite à feuilles caduques dont la longévité est déterminée par le génotype du greffon et du génotype du porte-greffe (Trillot *et al.*, 2002). Les pommiers cultivés atteignent habituellement une hauteur de 2 à 5 m. La taille et la forme dépendent principalement du porte-greffe et du mode de conduite adopté. Les feuilles sont alternées simples, caduques et de forme elliptique. Les rameaux portent les yeux à bois (30-40 cm de long) et les boutons à fleurs (Bretaudeau, 1978).

Les inflorescences (4 à 6 fleurs hermaphrodites) apparaissent souvent au bout de dards. Le fruit, de couleur variable (selon le cultivar) a une forme ellipsoïde à obovoïde et se compose de cinq carpelles soudées (Trillot *et al.*, 2002 ; Bretaudeau, 1978).

Chaque carpelle contient habituellement deux graines. Les graines sont lisses, luisantes, brun noisette (Jackson, 2003 ; Rieger, 2006).

La maturation des pommes a lieu en moyenne 120 à 150 jours après la floraison, mais les pommes de certains cultivars peuvent parvenir à ce stade en seulement 70 jours, alors que celles d'autres cultivars peuvent nécessiter jusqu'à 180 jours (Rieger, 2006). C'est pourquoi on parle de variétés hâtives (ex : Gala) et de variétés tardives (ex : Golden). Pour la plupart des variétés, les fruits à maturité pèsent en moyenne de 150 à 350 grammes (Rieger, 2006).

2.1.2. Caractéristiques biologiques et système de conduite

Le pommier traverse deux périodes principales : la dormance hivernale et la végétation (ou croissance) active. La période de croissance active (du débourrement à la chute des feuilles) et la dormance hivernale varient en fonction de la variété et des conditions environnementales. La floraison a lieu au printemps et marque la transition entre les phases végétative et reproductive. Elle peut être influencée par plusieurs facteurs biotiques (ex : bioagresseurs) et abiotiques (ex : pratiques culturales, températures, lumière et hygrométrie) (Jackson, 2003).

La croissance des fruits noués s'étend sur plusieurs semaines (Benettayeb, 1993) et peut être affectée par l'ensoleillement, la taille, l'irrigation et la fertilisation. Environ 1 à 5 % des fleurs produisent des fruits mûrs, tandis que les fleurs restantes ne produisent pas de fruits à cause de l'absence de pollinisation, de la compétition entre les fruits et des pratiques culturales telles que la taille et l'éclaircissage.

Le pommier est soumis au phénomène de l'alternance de la production. Ce phénomène survient lorsqu'un rendement élevé inhibe la formation des boutons floraux, entraînant une réduction de la nombre de fleurs l'année suivante (Jackson, 2003). De plus, un excès de fruits entraîne des fluctuations de la production les années suivantes (Jonkers, 1979). Benettayeb (1993) souligne que la qualité de la fertilisation, de l'irrigation et de la taille sont également des facteurs déterminant le développement de l'arbre et la production.

Pour des considérations essentiellement économiques, la production fruitière a connu une évolution très importante ces dernières années, notamment grâce à l'évolution des systèmes de conduite des vergers.

Ainsi d'un système de conduite extensif (300-400 arbres/ha) basé uniquement sur l'utilisation systématique et annuelle d'une taille (de formation et de fructification), s'est développée le système intensif (ou commercial) (1666-3289 arbres/ha) basé sur la haute densité de plantation et la gestion de l'architecture de l'arbre, pour l'obtention d'une production élevée et constante. Cependant, l'intensification de la production s'est traduite par une utilisation accrue des intrants chimiques, engrais et pesticides (Lauri *et al.*, 2020).

Le système de conduite intensif est considéré comme une combinaison entre le cultivar, le porte-greffe, l'espacement, la formation ou l'architecture et la taille (kappel et Harvey, 1992). La modification de l'architecture de l'arbre peut avoir une répercussion directe sur ses capacités d'interception du rayonnement (Willaume *et al.*, 2004). En effet, la structure technique et le mode de conduite conditionnent étroitement la distribution de la lumière au sein de la couronne des arbres, et son optimisation est importante pour la maîtrise de la régularité de fructification sur les branches fruitières (Lauri et Lespinasse, 1999). Le mode de conduite de l'arbre peut également agir sur le développement des bioagresseurs à travers la modification du microclimat (Pincebourde *et al.*, 2007).

En Algérie, le développement de l'arboriculture intensive et celle du pommier en particulier, a été favorisé par les mesures incitatives initiées par l'état à partir des années 2000 par le biais du programme national de développement agricole (PNDA) et par l'initiative des particuliers. Actuellement, les principales zones de production de pommier intensif sont Khenchla (Bouhmama), Ain Oussara, Sidi Bel Abbes, Mascara, Tlemcen, Batna.

2.1.3. Caractéristiques végétatives et développement physiologique

Le pommier produit différents types de fructifications, ces dernières sont constituées par des organes de végétation (bourgeon à bois, bourgeon à fleurs) et des organes de fructification (dard, lambourde, brindille, bourse) (Fig.6). Au cours de sa croissance annuelle, il produit deux types de pousses, qu'elles soient issues du bourgeon apical du rameau ou d'un bourgeon axillaire : les pousses qui se développent à partir des bourgeons foliaires sont appelées pousses végétatives. Puis les inflorescences dont la base foliaire peuvent être lignifiée et gonflée. L'ensemble base et corymbe est nommé bourses (Lauri, 2007). Depuis la bourse, des pousses feuillées peuvent être émises, elles sont appelées pousses de bourse (Mehri et Crabbé, 2002) (Fig.7).

À la fois pour les pousses végétatives et les pousses de bourse, on peut distinguer deux types : des pousses courtes (< 5 cm), et des pousses longues (> 5 cm) (Mehri et Crabbé, 2002). Sur un rameau, on distingue trois types de pousses : les pousses courtes ou brachyblastes composées uniquement de métamères préformés, puis les pousses moyennes ou "brindilles" et enfin les pousses longues, composées d'une partie préformée, généralement suivie d'une partie néoformée (Fig.8).

D'une manière générale, la croissance végétative résulte de deux processus : l'acquisition du carbone par le biais de l'activité photosynthétique (croissance ; respiration et réserves) et la nutrition minérale (Le Roux *et al.*, 2001). Ces deux processus peuvent être affectés par le stress hydrique (Jie *et al.*, 2010) et le stress nutritionnel principalement azoté (Szűcs et Kállay, 2008). La photosynthèse est étroitement liée à la fois à la lumière et à l'azote. Durant tout le cycle végétatif, l'azote intervient essentiellement depuis la fin du débourrement (mars-avril) jusqu'à la floraison et la fin de la croissance foliaire (juin), il est alloué aux jeunes pousses foliaires et aux fleurs.

Depuis la fin de la croissance foliaire (début de l'été) jusqu'à la maturité foliaire (fin de l'été), la croissance de l'arbre est maximale et les stocks de réserves carbonées sont renouvelés. Puis depuis le début de sénescence foliaire (début de l'automne) jusqu'à l'entrée en dormance (fin de l'automne-début hiver), l'azote est véhiculé depuis les feuilles jusqu'aux organes de stockage (racines et écorce). Enfin, depuis la levée de la dormance (février) jusqu'à l'apparition des jeunes pousses foliaires (mars), l'azote stocké vers les nouveaux organes en croissance (bourgeons et feuilles).

La croissance vigoureuse des pousses végétatives induites par l'azote augmente la sensibilité des arbres fruitiers aux ravageurs et maladies. En effet, la défense des feuilles peut être affaiblie par des teneurs excessives d'azote (Rühmann *et al.*, 2002 ; Haltrich *et al.*, 2000 ; Bala *et al.*, 2018).

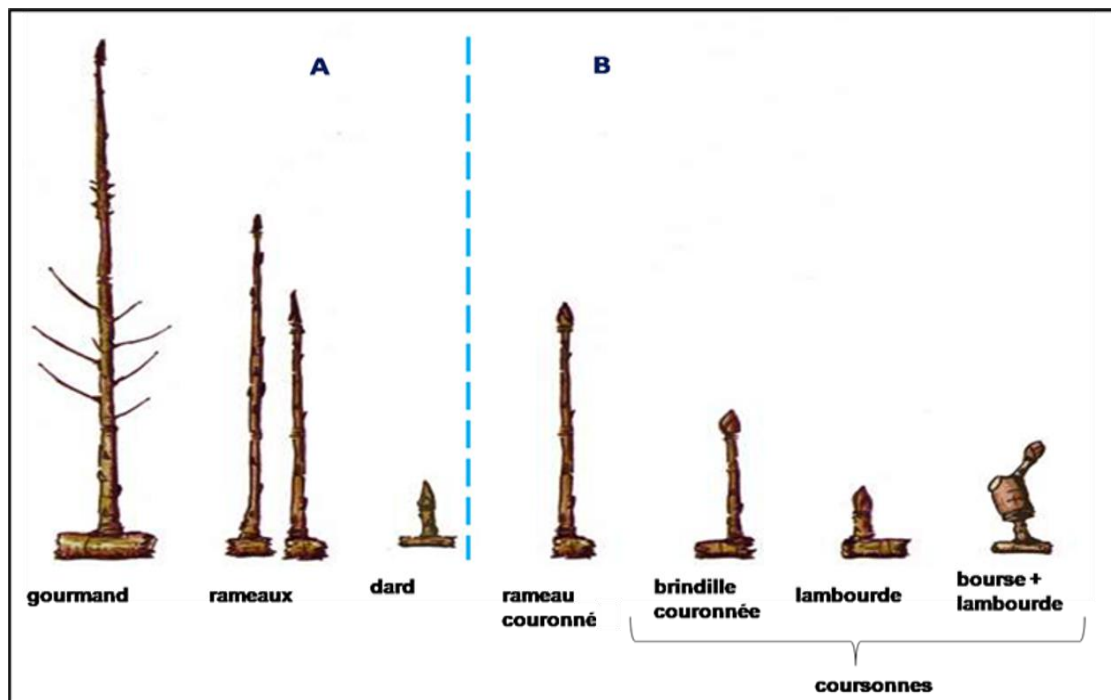


Figure 6 Typologie des rameaux de pommier selon la terminologie horticole, en fonction du caractère végétatif (A) ou inflorescentiel (B) du bourgeon terminal (Lauri et Laurens, 2005).

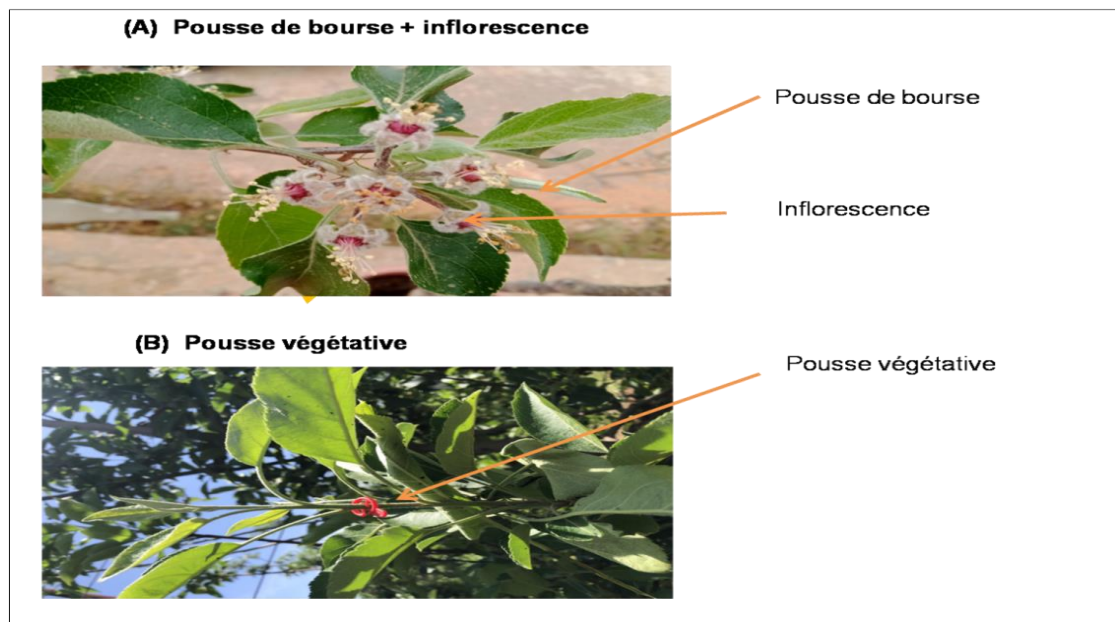


Figure 7 Pousse végétative et reproductrice chez le pommier (cultivar Gala). (A) pousse végétative (B) inflorescence+ pousse de bourse.

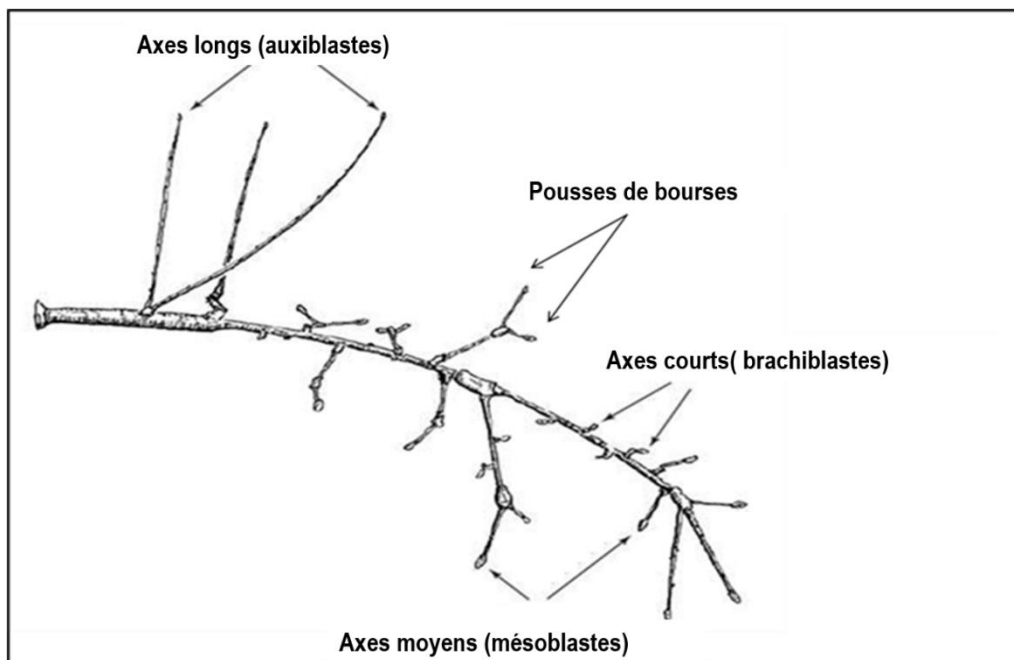


Figure 8 Différents types de pousses (axes longs, axes courts et axes moyens) sur un rameau de pommier.

2.1.4. Phénologie

Pour le codage du développement des fruits à pépins, l'échelle internationale BBCH retient cinq stades principaux, subdivisés en stades secondaires : le stade 0 : repos hivernal ; stade 5 : apparition de l'inflorescence ; Stade 6 : Floraison ; Stade 7 : développement des fruits et le stade 8 correspond à la maturation des fruits (Bloesch et Viret, 2013). Chaque étape ou stade est crucial pour une production fruitière optimale. Dans un système en PFI, la surveillance des événements phénologiques est considérée comme un outil d'aide à la décision pour la planification des différentes pratiques culturales, telles que la taille, la fertilisation, l'irrigation et la protection contre les bioagresseurs. La succession et l'apparition des différents stades sont étroitement liées aux conditions climatiques, en particulier aux températures, et aux caractéristiques des variétés.

Dans les zones ouest de l'Algérie, particulièrement la région de Sidi Bel Abbes, la floraison du pommier s'échelonne de la mi-mars à la mi-avril et la nouaison a lieu à partir de la mi-avril. Les fruits des variétés précoces (ex : Gala) mûrissent début août et ceux des variétés tardives plus tard en septembre (Golden) et en octobre (Granny Smith, Fuji) (Mahi, 2022).

La chronologie des principales étapes de la variété précoce Gala (objet de la présente étude) dans la région de Mascara se décline comme suit : le mois de janvier est marqué par la période de dormance, suivie du débourrement en février. La pleine floraison se produit en avril, suivie par la nouaison à la fin du mois d'avril et la maturité (récolte) se produit en août. (Fig.9).

2.1.5. Importance économique dans le monde et en Algérie

En 2021, la production mondiale de pommes s'est élevée à 93.14 millions de tonnes pour une superficie de 4.8 millions d'hectares (19.40 t/ha). En Algérie et la même année, la production a atteint 5.22 millions de tonnes pour une superficie récoltée de 31 171 ha (16.75 t/ha). L'analyse de l'évolution mondiale de la production de pommes révèle une tendance favorable concernant l'intensification de la production. En effet, la production augmente continuellement alors que la superficie récoltée a diminué depuis 1999, ce qui implique une évolution importante des rendements. (Fig.10 A).

La même tendance est observée pour l'Algérie, à la faveur de l'intensification de la production fruitière (Fig.10 C). En effet, les rendements ont évolué passant de 81.41 à 167.57 qx/ha respectivement en 2000 et en 2021.

La grande part de la production mondiale de pommes est détenue par l'Asie avec 61.33 %, suivie par l'Europe et les Amériques avec respectivement 22 et 12.7 %. Alors que l'Afrique et l'Océanie occupent respectivement 3.2 et 1.1. % de la production mondiale de pommes (Fig.10 B). Les cinq principaux pays producteurs de pommes sont la Chine (35.36 %), les États-Unis d'Amérique (4.87 %), la Turquie (3.05 %), la Pologne (2.90 %) et l'Iran (2.69 %).

Les variétés les plus cultivées dans le monde sont dominées par les variétés unicolores de type Golden Delicious (jaune), les rouges américaines (rouge), Granny Smith (verte) et par des variétés bicolores de type Gala et Fuji (Massonnet, 2004). Ces variétés représentent près de 60 % de la production mondiale (O'Rourke, 2003). En Algérie, plus de 30 variétés de pommiers sont autorisées à la production et à la commercialisation dont les plus cultivées seraient : Golden Delicious (80%), Starkrimson, Red Spur et Richard (INRAA, 2006).

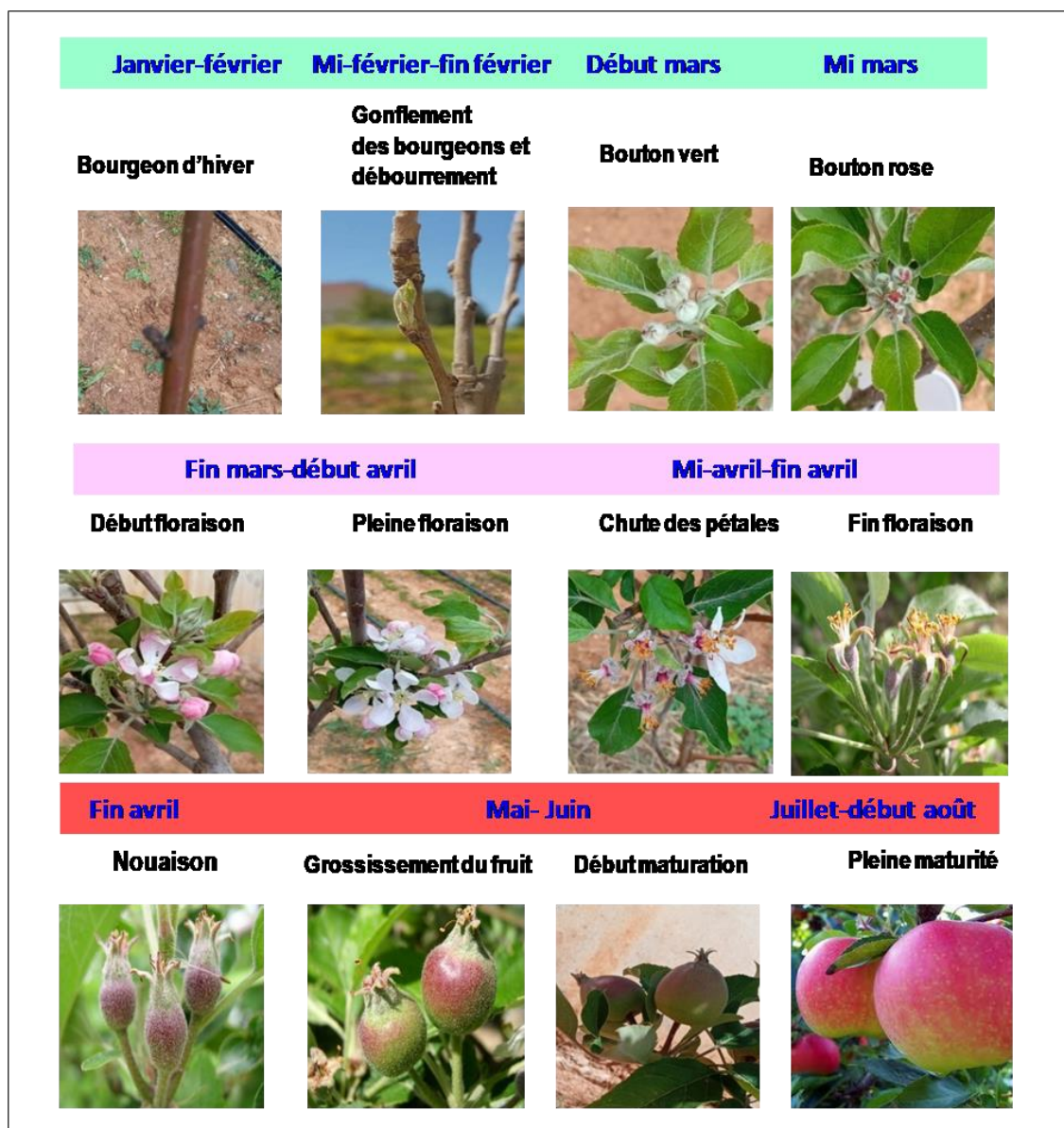


Figure 9 Chronologie des principaux stades repères du pommier “cultivar Gala “ dans la région de Mascara.

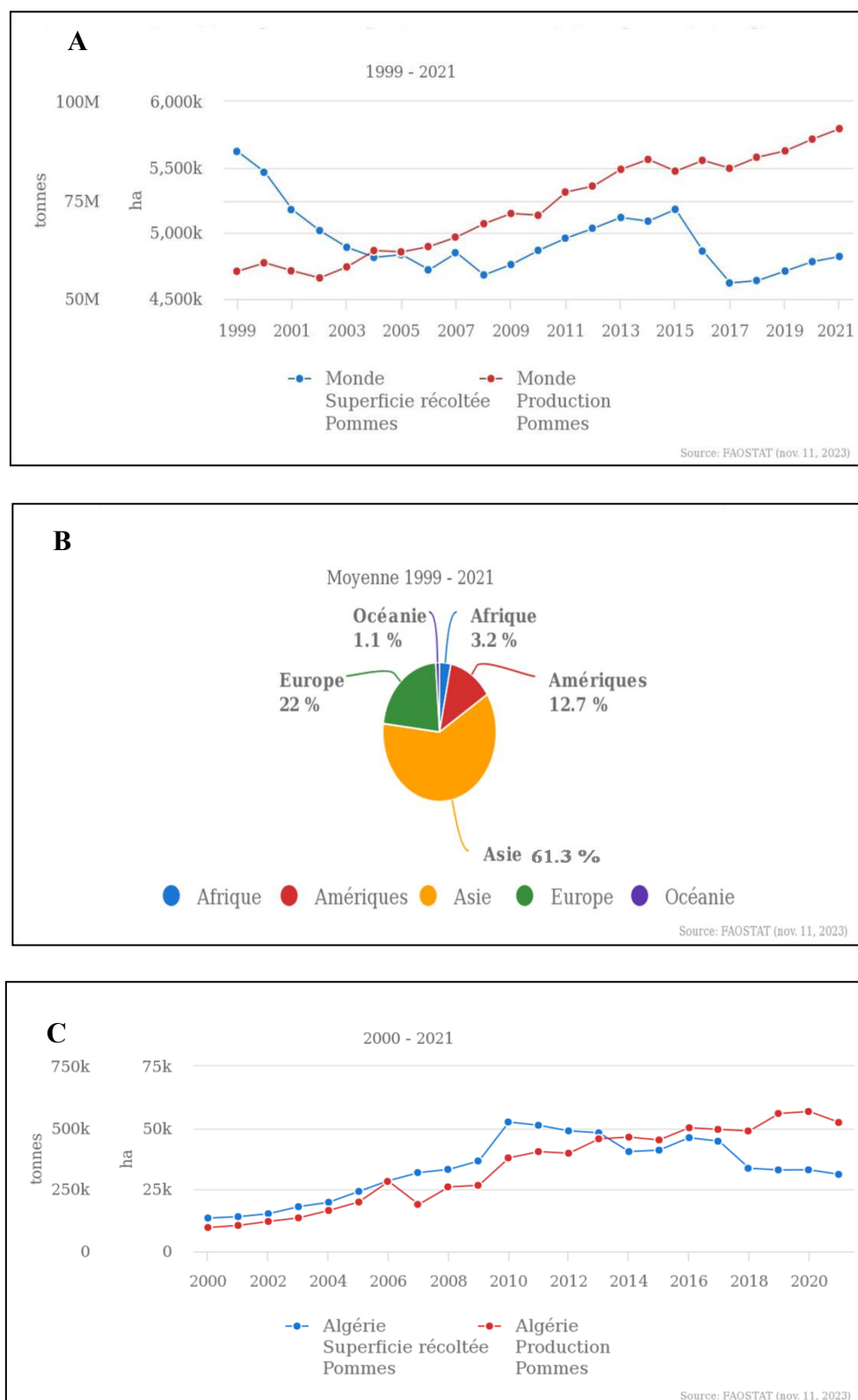


Figure 10 Superficie récoltée et production de pommes. (A) dans le monde depuis 1999 à 2021 ; (B) part de la production par régions ; (C) en Algérie depuis 2000 à 2020 (FAOSTAT, 2021).

2.1.6. Exigences édapho-climatiques

Le pommier est considéré comme une espèce dotée d'une vaste plasticité vis-à-vis des conditions climatiques. Bien qu'il convient principalement dans les zones à climat tempéré, il peut être cultivé sous différentes conditions climatiques (Bretaudeau, 1978). Pour satisfaire ses besoins en froid durant la phase de dormance, le pommier a besoin de 600 à 1600 h/an inférieurs à 7.2 °C. Durant la phase végétative, une température de 15°C suffit pour l'épanouissement des bourgeons et la floraison. Les températures comprises entre 21 et 26°C sont favorables à la fructification et à la maturation des fruits (Trillot *et al.*, 2002). Des températures élevées peuvent affecter le débourrement végétatif et la floraison et peuvent également inhiber la photosynthèse, au-dessus de 40°C (Zhao *et al.*, 2016). Le gel hivernal (T°C entre -10 et 0 C°), le manque de froid hivernal et le stress thermique en été sont les principales contraintes climatiques pouvant impacter la production (Jackson, 2003). L'intensité lumineuse ou le rayonnement doivent être également suffisants, notamment pour favoriser une bonne activité photosynthétique et stimuler l'induction florale et le développement des fruits (Dul *et al.*, 2019).

La pluviosité moyenne dans les régions propices à la culture des pommiers est comprise entre 500 et 700 mm/ha/an (Rieger, 2006). En Algérie, les zones où cette espèce peut prospérer reçoivent de 400 à 800 mm pendant la période hivernale. Des compléments d'irrigation, par goutte à goutte, se révèlent donc nécessaires de la fin du printemps jusqu'à la fin de l'été. Les doses recommandées sont de 2.000 à 3.000 m³/ha.

Sur le plan édaphique, le pommier peut croître et produire dans une gamme de sols aux caractéristiques physiques et chimiques très variables (Trillot *et al.*, 2002). Il s'accommode des sols limoneux, fertiles ou silico-argileux, argileux-sableux profonds, sains, aérés et bien drainés et sans excès d'humidité, avec un pH de 6.5 à 7.5 et une teneur maximale en calcaire actif comprise entre 12 à 15% (Gautier, 2001).

2.1.7. Techniques de conduite culturale

Sur le plan cultural, les principaux leviers agronomiques de conduite des vergers de pommiers sont le mode de conduite, la taille d'hiver, la fertigation et le contrôle des bioagresseurs majeurs.

2.1.7.1. Mode de conduite

En Algérie, le pommier est conduit en extensif et en intensif. Le mode de conduite intensif (en moyenne 2000 plants/ ha) et super intensif palissé (plus de 3000 plants/ha) est actuellement dominant dans les régions du centre de l'Algérie (Khemis Meliana, Blida), de l'ouest (Sidi Bel Abbés, Mascara) et de l'est (Batna, Khenchla). Le palissage vertical est une pratique courante dans les vergers intensifs qui facilite la gestion des arbres, l'accès pour la récolte et l'application des traitements, ainsi que l'exposition maximale des fruits aux rayons du soleil et à la lumière. Le palissage peut également aider à réduire la taille et la charge des fruits, ce qui peut améliorer leur qualité et leur valeur marchande des pommes.

La taille de formation en axe vertical est la forme de conduite la plus dominante dans les vergers de pommiers intensifs (Fig.11) Ce système de conduite permet aux arbres d'atteindre une hauteur de plus de 4 m, variable suivant les variétés et le type de porte-greffe. Comparativement à la forme libre, le mode de conduite en axe vertical favorise également un meilleur contrôle de la régularité de la production qui s'est développée pour des raisons à la fois techniques et économiques (Lepinasse, 1980).

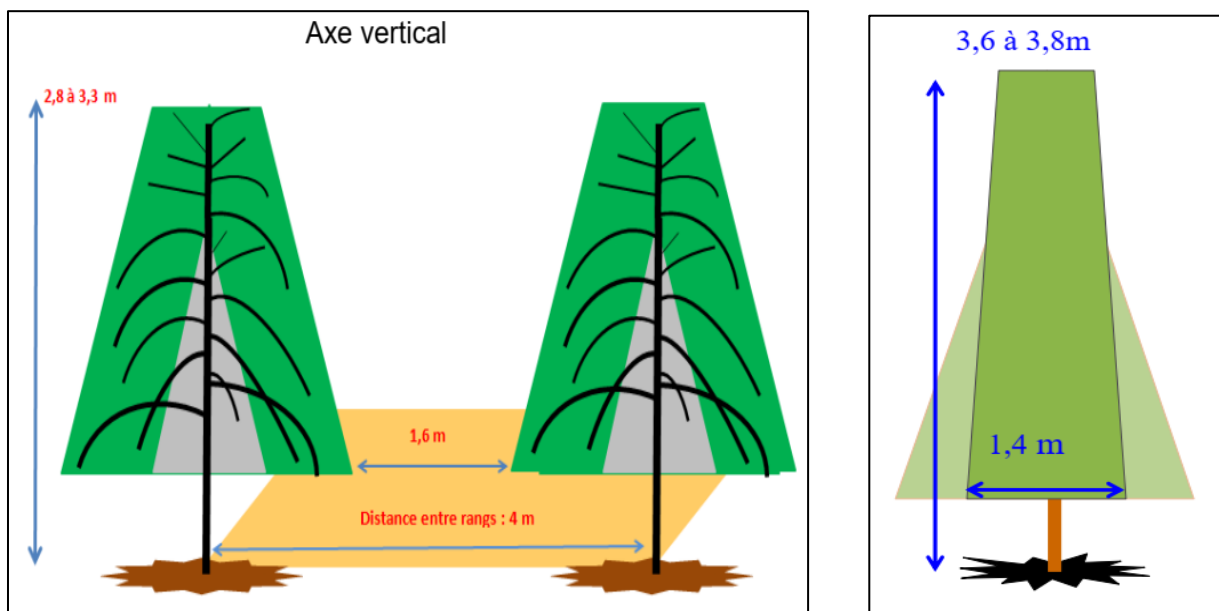


Figure 11 Représentation schématique d'une haie fruitière adulte (8ème à 15ème année), en axe vertical, adaptée au palissage du pommier (Roche, 2017).

2.1.7.2. Taille d'hiver

Les pratiques arboricoles, telles que la taille, sont des interventions cruciales dans la gestion des vergers et sont utilisées pour contrôler la taille des arbres, la pénétration de la lumière dans la canopée et l'équilibre entre la croissance végétative et reproductive (Fumey *et al.*, 2011). L'interception de la lumière par les feuilles est cruciale pour la croissance végétative à travers le processus de la photosynthèse. En effet, les produits issus de la photosynthèse (carbohydrates) sont requis pour la croissance végétative, l'initiation florale, la nouaison, la croissance et la couleur des fruits (Marini, 2014). Bretaudeau (1978) rajoute que la taille est pratiquée dans le but de provoquer la mise à fruit et d'équilibrer la répartition de la sève dans les différentes parties de l'arbre.

Dans les plantations commerciales (intensives) d'arbres fruitiers, la taille d'hiver constitue l'un des moyens de contrôle de la hauteur des arbres, leur structure et leur productivité. La taille peut également influencer la stabilité des arbres ainsi que la qualité du rendement (Almeida et Fioravanço 2018 ; Grechi *et al.*, 2008 ; Mészáros *et al.*, 2017) et peut créer des conditions défavorables au développement des ravageurs en réduisant les populations de plusieurs ravageurs, comme les acariens et les pucerons (Rousselin *et al.*, 2017a). Elle est, après le choix variétal et des porte-greffes, une condition déterminante pour l'obtention de résultats économiques favorables.

Différents types de taille peuvent être pratiqués. La taille de formation, réalisée en hiver, s'effectue de la chute des feuilles au débourrement, et sert à stimuler la croissance de l'arbre. Durant cette période l'arbre étant au repos n'est pas capable de refermer ses plaies de taille car le tissu ne peut pas, à cette période, se former. Seuls les pommiers et poiriers seront taillés à cette période de l'année car ils sont résistants au gel. En effet, la taille d'hiver donne généralement plus de vigueur aux arbres, c.-à-d qu'elle stimule la croissance annuelle alors que la taille d'été affaiblit la croissance. La taille est considérée également comme l'une des pratiques culturales (porte-greffes vigoureux, éclaircissage) permettant d'atténuer les effets de l'alternance de la production (Legave, 2021).

En Algérie, la taille d'hiver des pommiers se pratique traditionnellement durant le mois de décembre pour les variétés précoces (Gala) et en janvier jusqu'en février pour les variétés tardives (Golden, Granny Smith). L'assimilation des principes de taille nécessite l'observation des productions des branches charpentières.

En pratique, elle consiste à éliminer les gourmands, les branches mortes et les rameaux ou branches entravant le développement du tronc ou la croissance de l'arbre en général (Fig.12). Le fonctionnement global de l'arbre est conditionné par la stratégie de taille. Elle peut être pratiquée selon différentes intensités, selon les objectifs de vigueur, de conduite ou de production (Marquier et Balandier, 2000). Dans le cas d'une taille trop courte on provoque la naissance de rameaux à bois, difficilement transformables en coursonnes fertiles alors que pour une taille longue, les productions demeurent sans se développer et ensuite ce sont des branches dénudées de coursonnes qui se développent (Bretaudeau, 1978).

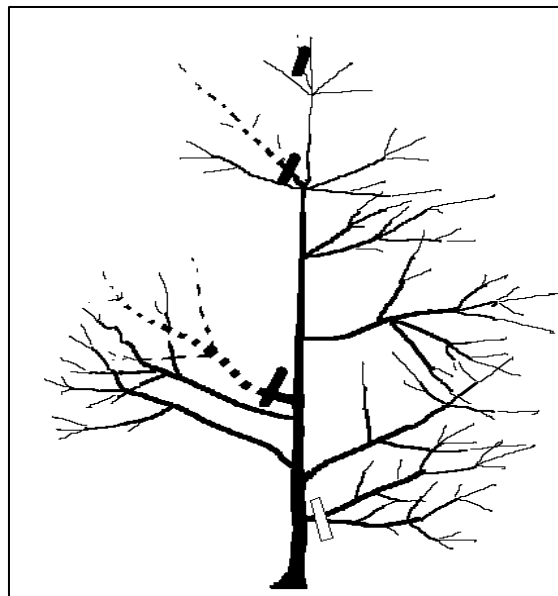


Figure 12 Exemple de taille de formation d'un arbre fruitier

2.1.7.3. La nutrition hydrominérale et le rôle de l'azote

La fertirrigation largement pratiquée dans les vergers fruitiers intensifs permet d'optimiser la disponibilité des éléments nutritifs dans la zone racinaire et limite par conséquent le lessivage. Dans les systèmes de production fruitière, les apports d'eau et d'éléments minéraux sont étroitement liés, et leur gestion raisonnée permet de contrôler la croissance de l'arbre (Nielsen *et al.*, 2002). Le maintien de l'équilibre nutritionnel de l'arbre fruitier nécessite la compensation des exportations à travers des analyses du sol et des feuilles.

L'obtention de rendements élevés et de fruits de qualité nécessite la mise à disposition à l'arbre de l'ensemble des éléments nutritifs dont il a besoin et au moment opportun, en tenant compte du processus de croissance et des besoins de l'arbre.

Kuster *et al.* (2017), précisent à ce propos que l'équilibre physiologique de l'arbre fruitier en cas de problèmes d'assimilation dépend également de la taille pratiquée, de l'irrigation et de la combinaison variété/portes greffes. Les mêmes auteurs ajoutent que la fertilisation du sol se fait donc en règle générale au printemps, au moment où la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol est limitée, alors que les besoins des arbres sont élevés.

L'azote constitue l'élément nutritif le plus indispensable pour le maintien de l'équilibre physiologique de l'arbre, nécessaire pour garantir un bon développement végétatif et une bonne qualité des fruits (Lobit *et al.*, 2001). Les travaux réalisés par Neilsen et Neilsen (2002) sur le pommier montrent que les applications hâtives d'azote vers la fin de l'hiver et au début du printemps, sont inefficaces puisque durant cette période les racines sont dans l'incapacité de l'absorber.

Au début du printemps, la croissance pendant la floraison est principalement soutenue par l'azote remobilisé lors du stockage hivernal dans les tissus ligneux (Neilsen *et al.*, 2022). C'est pourquoi et pour assurer une meilleure efficacité, il est recommandé de fractionner les apports d'azote à partir du printemps avec un apport important durant la croissance des pousses et des fruits et un apport modéré lorsque la croissance des arbres est la plus faible (Vaysse *et al.*, 2000 ; Kuster *et al.*, 2017). Pour ce qui est des besoins en eau, le pommier nécessite de 700 à 900 mm/an. Durant la phase de croissance et de production (mars-septembre) les besoins en eau d'irrigation sont de 2000 à 3000 mm/ha, avec une forte demande en juillet-août (Trillot *et al.*, 2002).

En Algérie, dans les vergers de pommiers intensifs, les applications d'engrais par fertirrigation sont fractionnées au cours de la saison. À titre indicatif, dans la région de Sidi Bel Abbès les apports d'engrais de fond se font en hiver à base de N.P.K (20 - 20-20, 17, 44-00 et 12 - 61-00) à raison de 100 kg à 200/ha. En cours de saison, les engrais de couverture sous forme d'urée 46 % sont apportés à raison de 100 kg/ha. D'autres applications sont également réalisées pour le développement des fruits à base d'engrais riches en nitrates de potasse (13-00-46) et en sulfates de potasse (00-00-50) à raison de 120 à 160 kg/ha (Mahi, 2022).

2.1.7.4. Contrôle des bioagresseurs

En Algérie, le contrôle des bioagresseurs du pommier, comme celui des autres espèces fruitières, se base exclusivement sur l'utilisation des pesticides de synthèse.

En effet, 95.05 % des pesticides autorisés sur les arbres fruitiers à pépins (pommier et poirier surtout) sont issus de la chimie de synthèse (voir chap.1 précédent, section 1.1.3). Les insecticides ayant une efficacité également aphicide dominant avec 43.80 % suivi par les fongicides avec un taux de 41.61 %. Cette tendance traduit la prédominance des insectes ravageurs et des maladies essentiellement fongiques. Les insecticides représentés par 206 spécialités commerciales sont constitués par 54 matières actives appartenant principalement à la famille des pyréthrinoïdes de synthèse (22.22 %) (Fig.13).

Les matières actives les plus dominantes sont l'abamectine, l'imidaclopride, la cyperméthrine et l'acétamipride. Ces derniers sont largement utilisés, entre autres, pour le contrôle des pucerons sur le pommier. Selon les services phytosanitaires nationaux, et les enquêtes effectuées par Mahi (2022), la fréquence des traitements sur pommier intensif, durant une saison, peut atteindre 20 à 30 applications chimiques (dont la majorité vise le carpocapse des pommes et des poires), toutes catégories de pesticides confondues. Le déclenchement des applications chimiques se fait généralement dès l'observation des premiers symptômes ou des insectes concernés, et par les avertissements déclenchés par les agents des services phytosanitaires de wilaya en cas de forte infestation.

Toutefois, la dépendance exclusive aux pesticides chimiques constitue un enjeu majeur pour la biodiversité, l'environnement et la santé de l'homme. La méconnaissance des bioagresseurs et des techniques de gestion adaptées des vergers sont également des facteurs limitant la protection de l'environnement en particulier, c'est ce qui a été mis en évidence par une étude récente menée à l'est de l'Algérie par Abdessemed *et al.* (2022). De plus, à cause de l'usage inapproprié des pesticides, des résidus de pesticides sont souvent détectés sur les fruits, ce qui constitue un risque pour la santé des consommateurs (Mebdoua *et al.*, 2017).

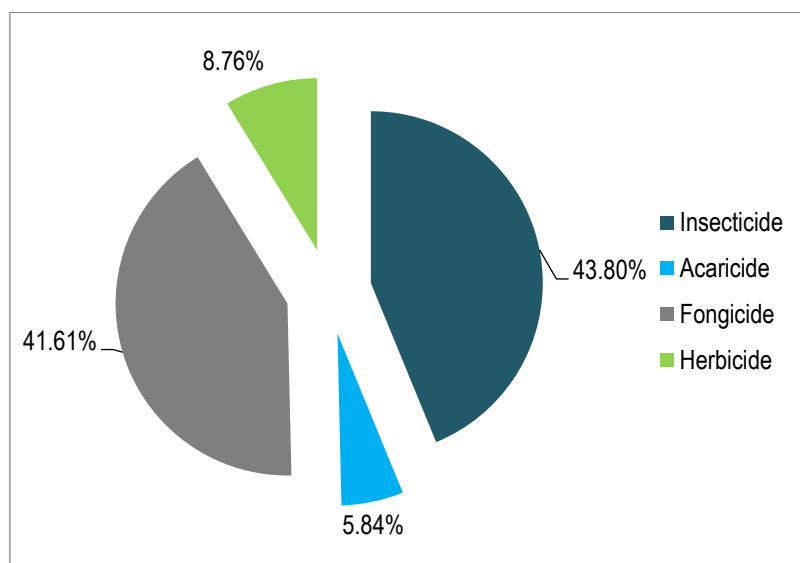


Figure 13 Importance relative (%) des catégories de pesticides homologuées sur les rosacées à pépins en Algérie.

2.1.8. Principaux ennemis du pommier en Algérie

Le pommier est sujet à diverses attaques de maladies et de ravageurs qui entraînent des dégâts importants et limitent par conséquent leurs productions dans les zones à climat méditerranéen. En Algérie, les bioagresseurs les plus fréquents sont la tavelure *Venturia inaequalis*, l'oïdium (*Podosphaera leucotricha*), les cochenilles (*Quadraspidiotus perniciosus* Comstock), les acariens (*Tetranychus urticae* et *Panonychus ulmi*), le carpocapse (*Cydia pomonella* L.) et les pucerons (*Aphis pomi*, *Eriosoma lanigerum*, *Dysaphis plantaginea*) (Fig.14) (Guettala, 2009 ; Aroun *et al.*, 2015 ; Mahi *et al.*, 2021). Parmi la faune aphidienne, le puceron cendré *D. plantaginea* est considérée comme la principale espèce inféodée aux vergers de pommiers (Laamari *et al.*, 2009).



Figure 14 Exemples des principaux ravageurs du pommier en Algérie (originale).

2.2. Le puceron cendré *Dysaphis plantaginea*

Parmi les ravageurs clés du pommier, le puceron cendré *D. plantaginea* et le carpocapse des pommes et des poires *C. pomonella* sont considérés comme les plus nuisibles pour le pommier, dans le monde comme en Algérie (Blommers *et al.*, 2004, Mahi *et al.*, 2021 ; Abdessemed *et al.*, 2022). Le puceron cendré est l'un des ravageurs les plus dangereux des pommes cultivées en Europe, en Amérique du Nord et en Afrique du Nord, y compris en Algérie (Aroun *et al.* 2015 ; Blommers *et al.*, 2004 ; Denoirjean *et al.*, 2021 ; Laamari *et al.*, 2009). Il engendre des pertes de rendement importantes même à faible densité de population (Guillemaud *et al.*, 2011). En effet, selon Hullé *et al.* (1998), *D. plantaginea* est le puceron le plus dommageable pour le pommier comparativement aux autres espèces de pucerons les plus rencontrées en verger telles que le puceron vert migrant, *Rhopalosiphum insertum*, *A. pomi* et *E. lanigerum*.

2.2.1. Position systématique et caractères morphologiques

Dysaphis plantaginea d'origine européenne est présent en Amérique du Nord, au Moyen-Orient, en Asie et en Afrique du Nord. (Blommers *et al.*, 2004). Il appartient à l'ordre des hémiptera et à la famille des aphididae :

Règne :	Animalia
Embranchement :	Arthropoda
Sous-embranchement :	Hexapoda
Classe :	Insecta
Sous-classe :	Pterygota
Ordre :	Hemiptera
Sous-ordre :	Homoptera
Famille :	Aphididae
Sous-famille :	Aphidinae
Genre :	Dysaphis

Espèce : *Dysaphis plantaginea* (Passerini, 1860)

L'adulte peut être ailé ou aptère. La forme aptère mesure de 1.5 à 3 mm de long, de couleur vert olive et de forme globuleuse, recouverte d'une cire grise-blanche. Alors que l'adulte ailé mesure entre 1.8 à 2.4 mm, vert foncé avec une tache marron sur l'abdomen et de longues ailes.

Les cornicules sont longues, marron foncé et la cauda très courte, fortement conique. Au début de leur développement, les larves sont beiges, puis deviennent gris-brun en passant par le rose. Les œufs se rencontrent seulement en hiver sur les bois, ils sont généralement déposés individuellement autour des bourgeons et des ramifications. Ils sont de forme elliptique, de couleur noir brillant et mesurent environ 0.5 mm de longueur (Bonnemaison, 1959)(Fig.15).

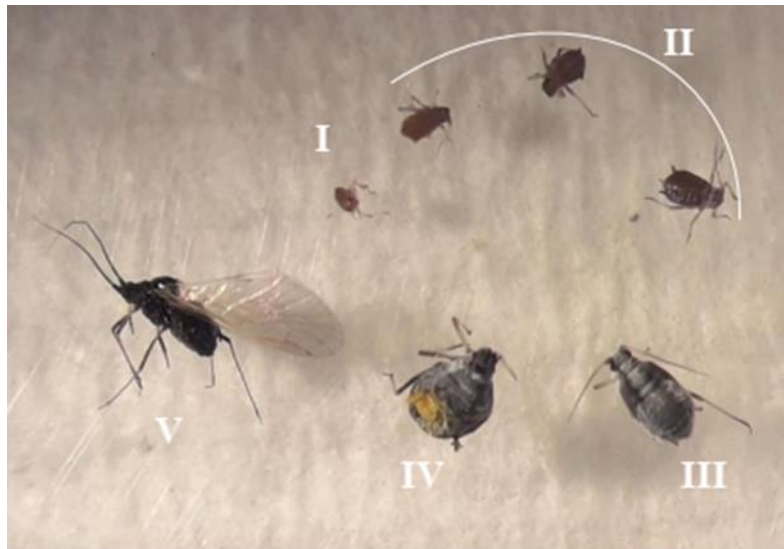


Figure 15 Les principaux stades de développement de *D. plantaginea*. I : jeune larve; II : larve âgée; III : Adulte; IV : fondatrigrène. V : adulte ailé (Androuin, 2021)

2.2.2. Cycle biologique

Dysaphis plantaginea a un cycle holocyclique dioécique. Son cycle de développement est dit holocyclique, car il comporte une alternance entre une génération sexuelle et des générations parthénogénétiques (Dixon, 1985). Ce ravageur spécialiste est dioécique, parce qu'il alterne successivement son développement entre deux plantes hôtes : le pommier (*Malus domestica* Borkh) étant l'hôte primaire en début d'automne et le plantain *Plantago sp* comme hôte secondaire ou estivale (Blommers *et al.*, 2004). Du printemps au début de l'été, *D. plantaginea* passe 5 à 7 générations sur les pommiers (Brown et Mathews, 2007), là où le taux de reproduction est très élevé et la majeure partie de la population est constituée de femelles aptères. Ces dernières se reproduisent par parthénogenèse associée à la viviparité, et sont responsables de la plupart des dommages sur les pommiers (Blommers *et al.*, 2004 ; Brown et Mathews, 2007 ; Guerrieri et Digilio, 2008).

Vers la fin du printemps, les individus ailés quittent les pommiers et migrent vers leur hôte secondaire, où sont produites 3 à 8 générations (du printemps au début de l'été) (Blommers *et al.*, 2004). Dans les conditions du sud méditerranéen, ce vol de migration s'échelonne, selon les années, de la fin avril à début juillet, il est plus intense durant le mois de juin (Dib, 2010) (Fig.16).

Le vol de retour vers le pommier se fait au début de l'automne et s'effectue par les gynopares ailés, produisant des femelles ovipares aptères, qui seront fécondées par les mâles ailés (issus du vol de retour). 24 h après l'accouplement, les femelles entament la ponte par le dépôt des œufs d'hiver (4 à 8 par femelle) sur le bois et à la base des bourgeons. L'éclosion intervient au début du printemps. La synchronisation entre l'éclosion des œufs et l'éclatement des bourgeons conditionne le succès ou l'échec de l'infestation (Miñarro et Dapena, 2007). Les larves se développent sur les bourgeons et deviennent des fondatrices, ce sont des femelles vivipares aptères qui donnent chacune 70 à 80 larves qui deviendront des femelles parthénogénétiques aptères (fondatrigenes). Les fondatrigenes ailés apparaissent au bout de la troisième génération pour effectuer le vol de migration vers le plantain (Bonnemaison, 1959 ; Blommers, 1999 ; Blommers *et al.*, 2004 ; Dib, 2010) (Fig.16).

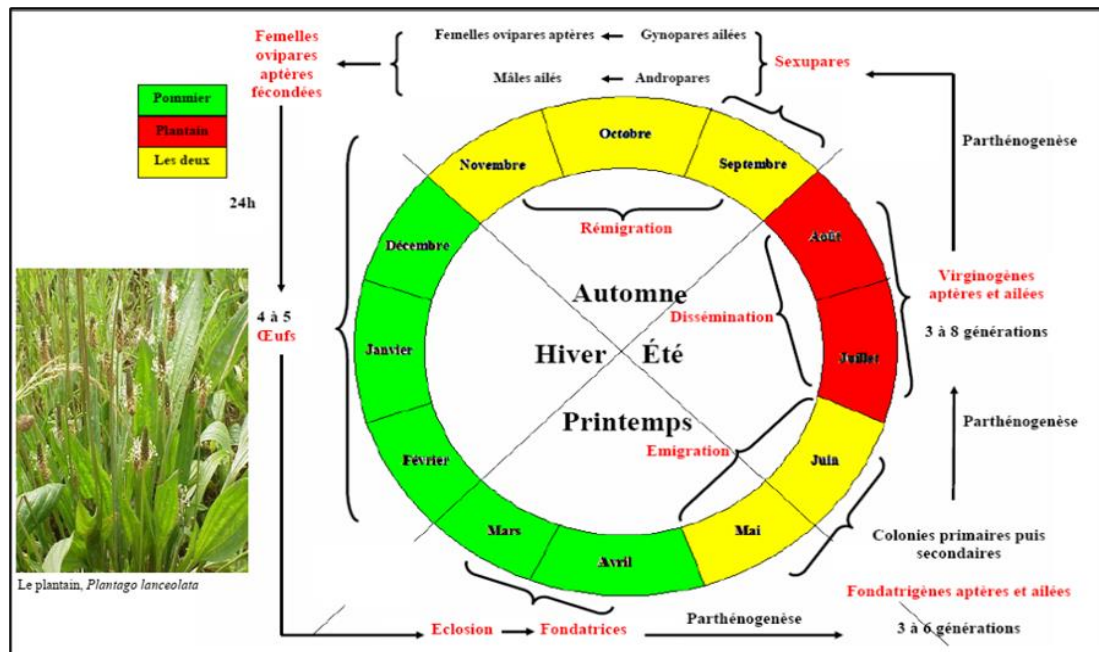


Figure 16 Schéma du cycle de développement holocyclique dioécique annuel de *Dysaphis plantaginea* (Dib, 2010).

2.2.3. Importance économique et dégâts

Dysaphys plantaginea, est considéré comme l'un des ravageurs les plus nuisibles sur pommier en raison de son seuil élevé des dégâts économiques évalué à une fondatrice sur 100 pousses ou 1 à 2% des pousses infestées (Bürgel *et al.*, 2005 ; Guillemaud *et al.*, 2011 ; Barbagallo *et al.*, 2007).

Ce puceron phytophage de type piqueur-suceur s'attaque, en début de saison, aux parties aériennes de la plante hôte (notamment les jeunes feuilles) en prélevant la sève élaborée, ce qui provoque des enroulements typiques et des déformations des feuilles, la chute des feuilles et rabougrissement des jeunes pousses (Blommers, 1999 ; Qubbaj *et al.*, 2005) (Fig.17). Ces prélèvements alimentaires affectent la photosynthèse et peuvent entraîner une diminution des réserves de carbone et ainsi altérer la croissance végétative à court comme à long terme (Zvereva *et al.*, 2010).

Sur les jeunes branches, les sécrétions salivaires de *D. plantaginea* provoquent des pseudo-galles (Forrest et Dixon, 1975). Lors des conditions favorables (printemps/été), les populations de pucerons, constituées par des femelles parthénogénétiques, sont généralement extrêmement abondantes et peuvent mener à l'exploitation complète de leurs hôtes herbacés (Guerrieri et Digilio, 2008). Chaque femelle peut donner entre 32 et 36 larves (Bloomer, 2004).

Les fortes infestations peuvent provoquer un arrêt de croissance des jeunes pousses et des déformations des fruits, compromettant ainsi la vigueur de l'arbre et la récolte (Blommers, 1999 ; Blommers *et al.*, 1994). Un modèle élaboré sur un jeune verger en production par De Berardinis *et al.* (1994), prédit que la croissance des fruits est réduite de plus de 25% pour n'importe quelle densité de *D. plantaginea*.

Les dégâts peuvent engendrer une diminution du rendement de la même année comme celui des années suivantes (Bonnemaison, 1959 ; Blommers *et al.*, 1994). En l'absence de lutte chimique, les pertes économiques peuvent varier de 30 à 80%, pour les variétés sensibles (Blommers *et al.*, 2004 ; Qubbaj *et al.*, 2005). Simon *et al.* (2011) précisent que les dégâts causés par *D. plantaginea*, dans un verger conduit en agriculture biologique, peuvent atteindre 21,4 % des fruits non commercialisables. D'autre part, les fortes infestations peuvent produire une grande quantité de miellat sur les feuilles et les fruits propices au développement de la fumagine, affectant ainsi la qualité commerciale des fruits (Tremblay, 1988).

L'infestation et les dégâts de *D. plantaginea* varient en fonction des variétés et des conditions de températures. En effet, les travaux de Miñarro et Dapena (2007) sur les variétés susceptibles indiquent des taux d'infestation et de dégâts beaucoup plus élevés pour les variétés précoces (exemple : Gala utilisée dans la présente étude) que pour les variétés tardives (Golden delicious).

Parmi les variétés de pommier tolérantes aux pucerons cendrés, l'on peut citer Golden orange et Florina querina (Angeli et Simoni, 2006). Le phénomène de tolérance peut être lié aux caractéristiques morphologiques des variétés, à l'état physiologique et aux mécanismes de défense de l'arbre.

Le taux de développement de *D. plantaginea* comme pour tous les pucerons, est directement lié aux températures. Les températures optimales de développement et leurs limites supérieures sont comprises respectivement dans l'intervalle de 20 à 25 °C et 25 à 30°C (Bale et Tatchell, 1995). Le seuil thermique de développement est bas, il est de 4.5 °C comparé à celui d'*A. pomi* (5.9 °C) (Graf *et al.*, 2006). Pendant la phase de reproduction, la température ne doit pas être inférieure à 15°C (Bloomer 2004), alors que les températures élevées (égales ou allant jusqu'à 30°C et au-delà) réduisent ou freinent la croissance du puceron cendré (Dixon, 1985).

En Algérie, à l'est et au centre du pays, les premières colonies de *D. plantaginea* s'observent, dans les vergers de pommiers, vers la fin floraison (avril-mai) (Aroun *et al.*, 2015 ; Lamari *et al.*, 2012 ; Gagui *et al.*, 2023). À l'ouest du pays, elles ont été signalées dans les vergers de pommiers respectivement durant le mois de mai et de juin à Sidi Bel Abbès et Tlemcen (Pérez *et al.*, 2012 ; Mahi *et al.*, 2021).



Figure 17 Colonies et dégâts de *D. plantaginea* sur pommier (Gala). (A) colonie et enroulement des feuilles (B) feuilles saines (originale).

2.2.4. Moyens de lutte

Les insecticides chimiques sont largement utilisés pour gérer les populations de pucerons dans les vergers de pommiers (Simon *et al.*, 2011).

Cependant, des applications répétées peuvent avoir un effet nocif sur l'environnement et les organismes utiles et peuvent entraîner une augmentation de la résistance aux insecticides. En effet, des phénomènes de résistance de *D. plantaginea* aux insecticides ont été relevés par Delorme *et al.*, (1997 pour la substance active pirimicarbe (carbamates). Par conséquent, des alternatives aux produits chimiques et des méthodes innovantes visant à minimiser les effets de l'infestation par les pucerons sont nécessaires, car elles peuvent avoir un impact sur le rendement et la qualité des fruits, ce qui est l'objectif ultime de l'agriculteur (Rousselin *et al.*, 2017a ;Bardner et Fletcher, 2009). Toutefois les différentes techniques et méthodes de lutte doivent être envisagées dans un cadre intégré, comme jusque-là aucune méthode prise d'isolement n'a été efficace pour le contrôle des populations de *D. plantaginea* (Dib, 2010).

Le degré d'infestation des arbres fruitiers par les bioagresseurs peut être influencé, entre autres, par l'état physiologique de l'arbre, lui-même peut être affecté par les différentes techniques culturales dont l'alimentation hydrominérale et la taille. Ces actes techniques peuvent être pilotés raisonnablement en tenant compte des exigences réelles de la plante, des conditions climatiques et des objectifs de production. Il est également possible de prévoir au sein du verger des leviers biotiques tels que la lutte biologique et la biodiversité fonctionnelle. C'est pourquoi l'ensemble de ces techniques ont fait l'objet de quelques travaux portant sur la compréhension des interactions au sein du système "arbre fruitier-puceron", en se référant au concept de la production fruitière intégrée (PFI). L'objectif clé de ces études converge vers la proposition des solutions complémentaires à la lutte chimique et la préservation de l'agro écosystème du verger.

Les méthodes principales de lutte contre les populations de *D. plantaginea* incluent la lutte génétique en utilisant des variétés tolérantes ou résistantes, ainsi que la conduite culturale, qui consiste à raisonner la taille, l'alimentation hydrique et la nutrition azotée (Grechi *et al.*, 2008 ; Laghrifi *et al.*, 2017) (Fig.18). Pour ce qui est de la lutte biologique, différentes stratégies de contrôle peuvent être mises en œuvre, notamment en utilisant des champignons entomopathogènes (ex: *Lecanicillium longisporum*, *Entomophthora planchoniana*) des prédateurs (Coleoptera, Neuroptera, Diptera) et des endoparasitoides (Hymenoptera) (Dib *et al.*, 2010 ; Miñarro et Dapena, 2001 ; Dib *et al.*, 2017).

Les principaux ennemis naturels de *D. plantaginea*, présents dans les vergers de pommiers en Algérie, appartiennent aux Coleoptera et aux Hymenoptera.

Le cortège présent est composé de quatre espèces prédatrices et aphidiphages appartenant aux Coccinellidae, ainsi que de cinq espèces endoparasites primaires appartenant aux Braconidae (Tab.1). En outre, la Biodiversité fonctionnelle est également une méthode de lutte efficace, elle consiste à stimuler la présence des ennemis naturels en modifiant le paysage, plus précisément en installant des bandes florales en bordure ou en inter-rang dans les vergers de pommiers (Brown et Mathews, 2007). Enfin, des travaux de recherche récents ont mis en évidence l'efficacité répulsive de quelques plantes aromatiques de la famille des Lamiaceae (*Mentha piperita* L., *Lavandula x intermedia* et *Salvia rosmarinus*) vis-à-vis des adultes de *D. plantaginea* (Dieudonné *et al.*, 2022).

Tableau 1 Liste des parasitoïdes et des prédateurs de *D. plantaginea* recensés dans les vergers de pommiers en Algérie

Ordre/famille	Espèce	Statut	Reference
Coleoptera Coccinellidae	<i>Adalia bipunctata</i>		
	<i>Adalia decimpunctata</i>	Prédateurs	Sahraoui et Gourreau (1998)
	<i>Hippodamia (Adonia) variegata</i>	aphidiphages	
	<i>Pullus subvillosus</i>	(Larves et adultes)	
Hymenoptera Braconidae	<i>Ephedrus persicae</i>		Laamari <i>et al.</i> (2012)
	<i>Aphidius matricariae</i>		
	<i>Trioxys angelicae</i>	Endo-parasitoïde	Gagui <i>et al.</i> (2023)
	<i>Lysiphlebus testaceipes</i>	primaire	
	<i>Ephedrus plagiator</i>		

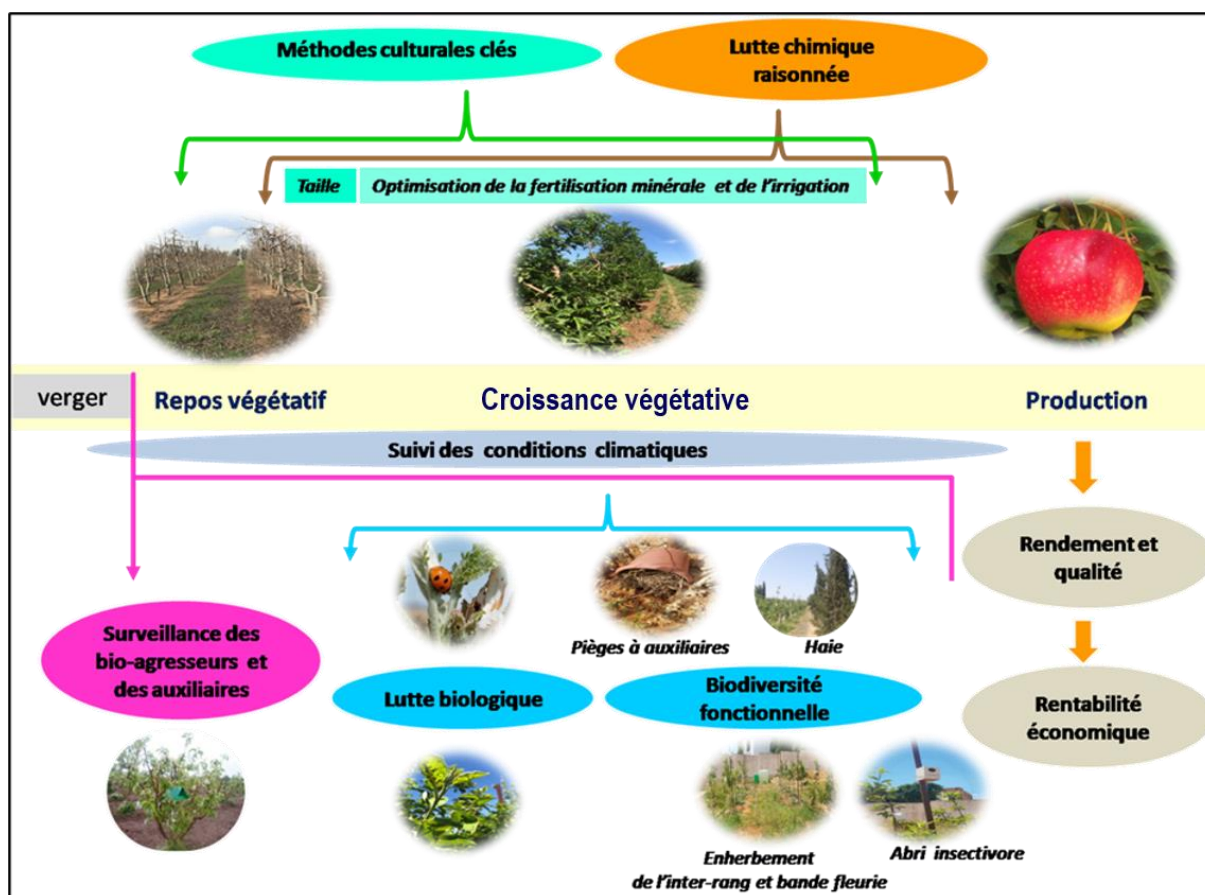


Figure 18 Descriptif synthétique des principaux leviers d'action de lutte contre les insectes ravageurs clés des vergers à mettre en œuvre en production fruitière intégrée.

Chapitre 3

Matériels et méthodes

Chapitre 3. Matériels et méthodes

Le présent chapitre s'intéresse à la présentation de la démarche méthodologique relative à la question centrale de recherche de la thèse, précisée en introduction et dont les fondements ont été présentés dans les chapitres précédents. Dans un premier temps, il est question des objectifs spécifiques déclinés de la question centrale de recherche et de la démarche expérimentale retenue. Puis une présentation de la zone d'étude et des sites expérimentaux est donnée. La méthodologie d'étude est ensuite détaillée.

3.1. Objectifs spécifiques et démarche expérimentale

Le système « arbre fruitier-bioagresseur » étudié, dans le présent travail, est constitué par trois principales composantes biologique, technique et environnementale : la composante biotique, ou modèles biologiques, est constituée par la variété du pommier précoce, variété Gala et le ravageur oligophage *Dysaphis plantaginea*. La composante technique comprend la taille d'hiver et la nutrition azotée, ces deux pratiques culturales étant cruciales pour la vigueur et la croissance de l'arbre et ayant par conséquent un effet sur le comportement du bioagresseur. Quant à la composante environnementale, elle est représentée notamment par les températures, étant donné ses effets sur le développement de l'arbre et sur la dynamique du bioagresseur. Ainsi le système d'étude choisi s'appuie sur les interactions potentielles qui peuvent exister entre le puceron cendré et le pommier englobant les effets directs et indirects des différentes composantes, et dans un environnement semi-aride favorable pour le développement des deux modèles biologiques étudiés.

Sur la base des objectifs spécifiques de l'hypothèse centrale de notre thèse (voir introduction), nous avons formulé les sous-hypothèses suivantes :

- (i) L'intensité de la taille d'hiver peut avoir un effet significatif sur la dynamique de la population du puceron cendré et la croissance végétative.
- (ii) Le niveau de nutrition azotée a une influence directe sur la dynamique des populations de pucerons et la croissance végétative.
- (iii) Les températures ambiantes peuvent avoir un effet significatif sur la survie des populations de pucerons.

Pour répondre à ces sous hypothèses, la démarche choisie se concentre sur deux principales phases expérimentales.

D'abord, une étude sur le terrain a été menée en 2019 à Mascara (plaine de Ghriss), dans un verger de pommiers intensif (variété Gala en production). L'objectif de cette expérimentation était d'analyser l'effet de l'intensité de la taille d'hiver sur les interactions existantes au sein du système "Pommier - puceron cendré" et d'évaluer l'impact des températures ambiantes sur la dynamique des populations du bioagresseur et la croissance végétative. Les données collectées sur le terrain ont été analysées pour créer des modèles de prédiction de l'infestation et de la croissance végétative.

La deuxième phase de l'expérimentation, menée en 2020 dans des conditions contrôlées dans une serre de la faculté des sciences de la nature et de la vie (Université de Mascara), a porté sur l'étude de l'effet d'un régime de fertilisation azotée sur les interactions entre de jeunes plants de pommiers Gala et le puceron cendré.

3.2. Présentation de la zone d'étude : Mascara

3.2.1. Principales caractéristiques de l'agroécosystème

La région de Mascara (35° 26' N et 2° 11' ; altitude moyenne de 600 m), située au Nord-Ouest du pays, s'étend sur une superficie de 5.135 Km². Elle est limitée à l'est par les Wilayas de Tiaret et Relizane, à l'ouest par la Wilaya de Sidi Bel Abbès, au nord par les Wilayas d'Oran et de Mostaganem et au sud par la Wilaya de Saida. Ayant une vocation agro-sylvo-pastorale, elle se subdivise en 4 ensembles agroécologiques (Fig.19). D'abord, la plaine de Habra – Sig (25 %) caractérisée par la dominance de l'arboriculture, notamment des vergers oléicoles et agrumicoles. Puis, les monts de Béni Chougrane (32%) avec la prédominance des espèces forestières particulièrement du pin d'Alep.

Ensuite, la zone des monts de Saida (16%) dominée par l'élevage bovin, ovin et par la céréaliculture. Enfin, la plaine de Mascara-Ghriss (27%), zone potentielle des cultures maraichères et des rosacées à pépins et à noyaux. Les cultures fruitières y sont conduites en extensif et en intensif. Les cultures sont installées sur des sols majoritairement calcaires et alluviaux qui constituent respectivement 70 et 20 % de la superficie totale. Dans la plaine de Ghriss, dédiée essentiellement à l'arboriculture et au maraichage, les sols calcaires dominent avec un taux de 50 % et seulement 10 % pour les sols alluviaux.

La superficie agricole totale de la wilaya de Mascara est de 343208 ha avec 72% de terres utiles (SAU). Le potentiel arboricole et viticole y occupe une superficie de 39213 ha, principalement dominée par la culture de l'olivier et des agrumes (9011 ha). Les rosacées et à pépins et à noyaux occupent quant à elles une superficie de 9454 ha (annexe, Tab. S1).

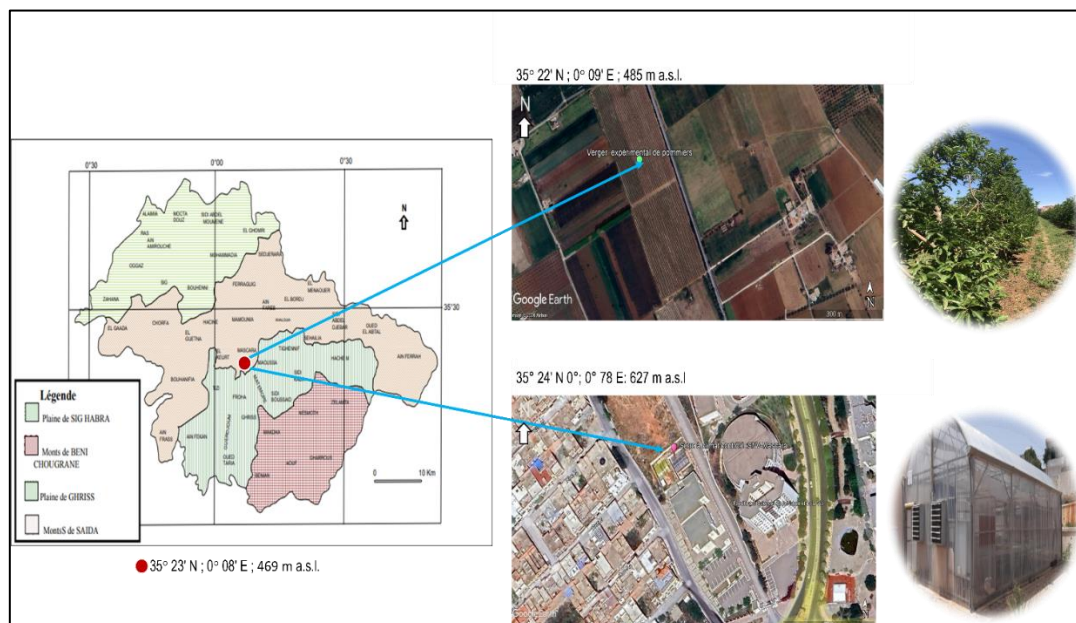


Figure 19 Les ensembles naturels de la région de Mascara et la géolocalisation des sites d'expérimentation.

3.2.2. Climat

Au sein de l'agrosystème, le climat influence de manière dynamique les interactions entre les plantes, les insectes ravageurs et leurs ennemis naturels. Parmi les facteurs abiotiques, les températures et l'humidité relative de l'air sont déterminantes pour la phénologie des arbres fruitiers et le développement des populations des insectes ravageurs, notamment les pucerons. Elles peuvent ainsi affecter ou favoriser le déroulement des différents stades biologiques ainsi que le rendement. Le climat de la région d'étude est méditerranéen, il se caractérise par une saison chaude et sèche en été et une saison humide et froide en hiver, avec une pluviométrie assez faible et irrégulièrement répartie à travers les saisons. Les données climatiques décennales (2010-2020) et annuelle (2019) ont été fournies par la station de météorologie de Matmore (plaine de Ghri), située dans la région de Mascara, et ayant pour coordonnées GPS : 35° 22' N ; 0° 103' E et une altitude de 471 m.

L'examen des données climatiques moyennes (2010-2020) (Tab 2) révèle une température moyenne annuelle de 20.43°C et des moyennes maximales et minimales respectives de 32.08 et 8.78 °C. Les valeurs minimales et maximales sont observées au mois de janvier (1.54 °C) et d'août (41.12°C). La pluviométrie oscille entre 77.45 mm (novembre) et 4.22 mm (juillet), avec une moyenne annuelle de 521.42 mm dont 30% reçue respectivement en automne et en hiver, 32% au printemps et 8 % en été.

Cette quantité de pluie étant insuffisante pour couvrir les besoins des vergers en production, le recours à l'irrigation est donc indispensable. L'humidité relative (HR %) moyenne annuelle est de 62.9 %, et varie de 48.5 (juillet) à 72.3 % (janvier). Dans la région, les vents dominants soufflent du nord-ouest. La vitesse moyenne du vent atteint son maximum au mois de février avec 4.64 m/s et le minimum est noté au mois de septembre avec 3.27 m/s, alors que la vitesse moyenne annuelle est de 3.82 m/s. Les vents dominants sont ceux du secteur ouest et nord-ouest. Les vergers arboricoles de la région de Mascara sont généralement protégés par des brises vent.

Le nombre de jours de sirocco est en moyenne de 15 à 20 jours dans l'année, orienté sud-sud durant la période estivale, notamment durant le mois de juillet. Les gelées nocives interviennent durant les mois de janvier et février avec une fréquence de 10 jours en moyenne par an. Ces dernières agissent aussi bien sur les cultures en activité que sur les arbres fruitiers étant en phase de repos végétatif.

Tableau 2 Données climatiques moyennes mensuelles de la région de Mascara pour la période 2010-2020.

Mois	P (mm)	T min (C°)	T max (C°)	T moy (C°)	HR %	Vent (m/s)
J	74.23	1.54	21.85	11.69	72.3	4.40
F	54.48	1.78	24.13	12.95	69.92	4.64
M	65.14	2.82	28.00	15.41	67.74	4.35
A	76.53	6.70	31.95	19.32	64.59	4.05
M	41.56	9.29	35.2	22.24	59.37	3.73
J	17.17	12.94	38.67	25.8	54.94	3.63
J	4.22	17.75	41.6	29.67	48.5	3.33
A	13.09	19.29	41.12	30.2	50.02	3.29
S	24.09	15.18	37.47	26.32	57.43	3.27
O	41.38	10.07	33.62	21.84	59.48	3.49
N	77.45	5.74	28.18	16.96	68.26	3.46
D	51.83	2.34	23.15	12.79	71.38	4.16
Moyenne	521.42*	8.78	32.08	20.43	61.99	3.82

*cumul annuel de pluviométrie

Source : station météo de Matmore (Mascara)

Durant l'année 2019, la tendance générale du climat est assez similaire à celle de la période 2010-2020, à l'exception de la pluviométrie reçue, qui est assez faible (368.6 mm) (Tab 3). L'analyse des données de températures et d'humidité de l'année 2019 et leurs interactions avec le système étudié (pommier - *D. plantaginea*), sera traitée dans les chapitres suivants.

L'examen des diagrammes ombrothermiques de la période 2010-2020 et celui de 2019, révèlent globalement deux principales périodes, l'une sèche s'étalant de mai à octobre et l'autre humide allant de novembre à avril (Fig. 20). La zone d'étude appartient à l'étage bioclimatique semi-aride à hiver frais (Q_2 calculé = 43.56) (Fig.21).

Tableau 3 Données climatiques moyennes mensuelles, minimales et maximales dans la région de Mascara, pour l'année 2019

Mois	T°C		Vent (m/s)		P (mm)		HR %	
	Moyenne	Min-Max	Moyenne	Min-Max	Moyenne	Min-Max	Moyenne	Min-Max
J	9.63	5.50-13.20	2.98	1.3-5.9	83.80	0-36.8 (18)	73.09	43.8-86,30
F	11.05	7.20-12.70	2.74	1.4-7.1	14.80	0-10.2 (3)	62.71	41.70-74.10
M	13.8	9.00-17.00	2.46	0.9-4.5	23.40	0-5.7 (16)	64.08	42.90-84.40
A	15.7	11.90-22.20	3.01	1.6-5.1	55.70	0-11.7 (19)	63.18	41.80-76.90
M	20.51	16.70-24.20	2.84	1.7-6.3	09.50	0-3.6 (7)	53.13	39.30-84.60
J	23.81	20.70-29.70	2.68	1.6-4.9	00,60	0-0.2 (5)	53.30	26.40-69.60
J	28.60	25.50-32.50	2.81	1.8-6.8	06.40	0-0.9 (12)	48.63	41.10-65.20
A	28.49	25.40-33.40	2.52	1.9-3.7	13.20	0-5.7 (13)	51.05	27.90-72.90
S	24.93	19.69-32.07	2.22	1.4-6.4	20.00	0-5.5 (16)	57.69	41.20-72.30
O	20.12	14.77-27.12	2.58	1.7-5.0	20.50	0-6.3 (8)	56.80	30.20-74.30
N	14.07	10.42-18.82	4.45	1.5-8.1	75.70	0-25.9 (24)	73.80	68.20-88.80
D	13.00	08.98-19.20	3.36	1.5-8.1	45.00	0-20.1 (11)	70.16	49.10-85.50
Moyenne	18.64		2.89	-	368.6*	-	60.63	-

*cumul annuel de pluviométrie

Source : station météo de Matmore (Mascara)

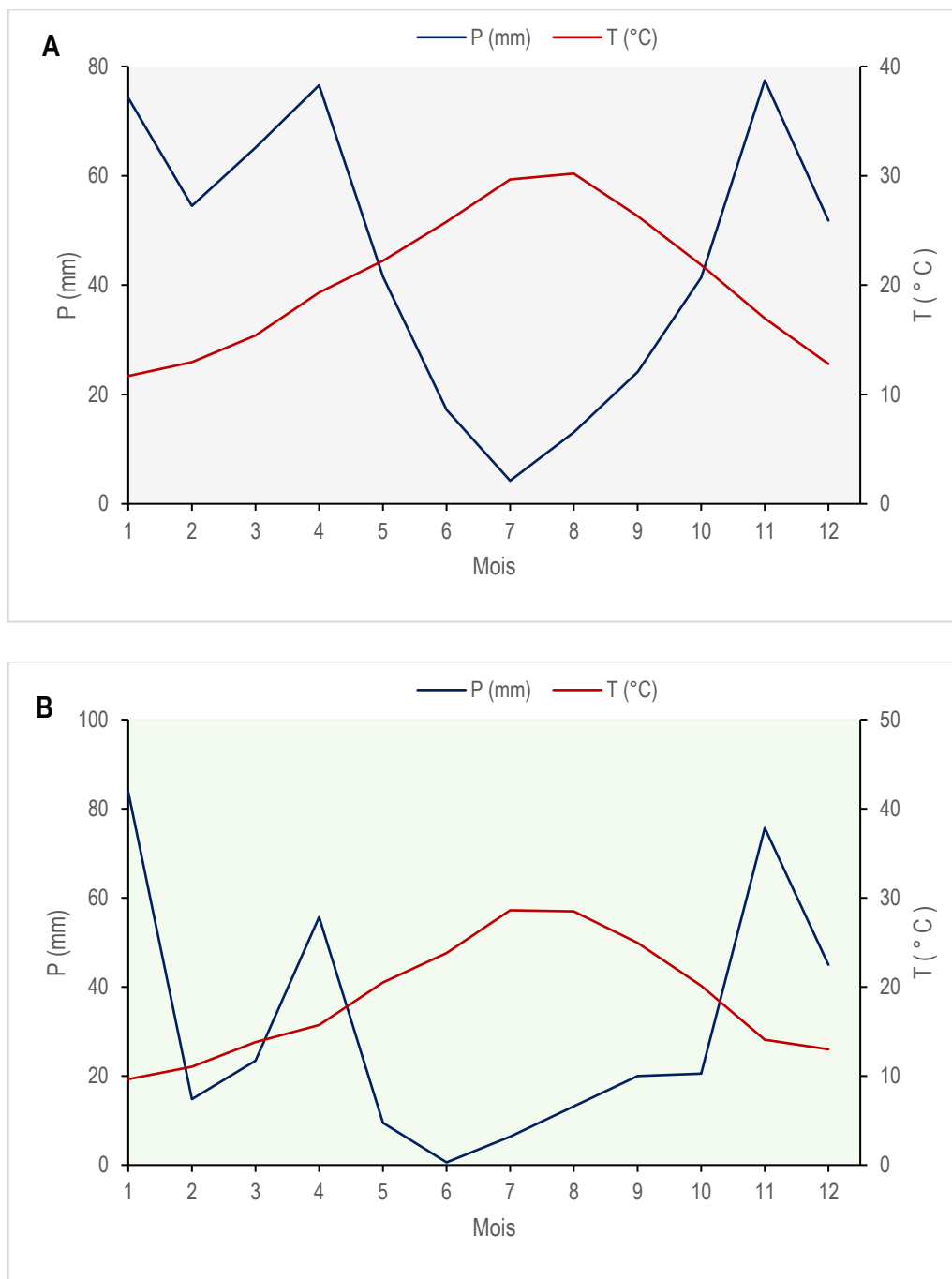


Figure 20 Diagramme ombrothermique de la région de Mascara. (A) : période 2010-2020 ;(B) : 2019.

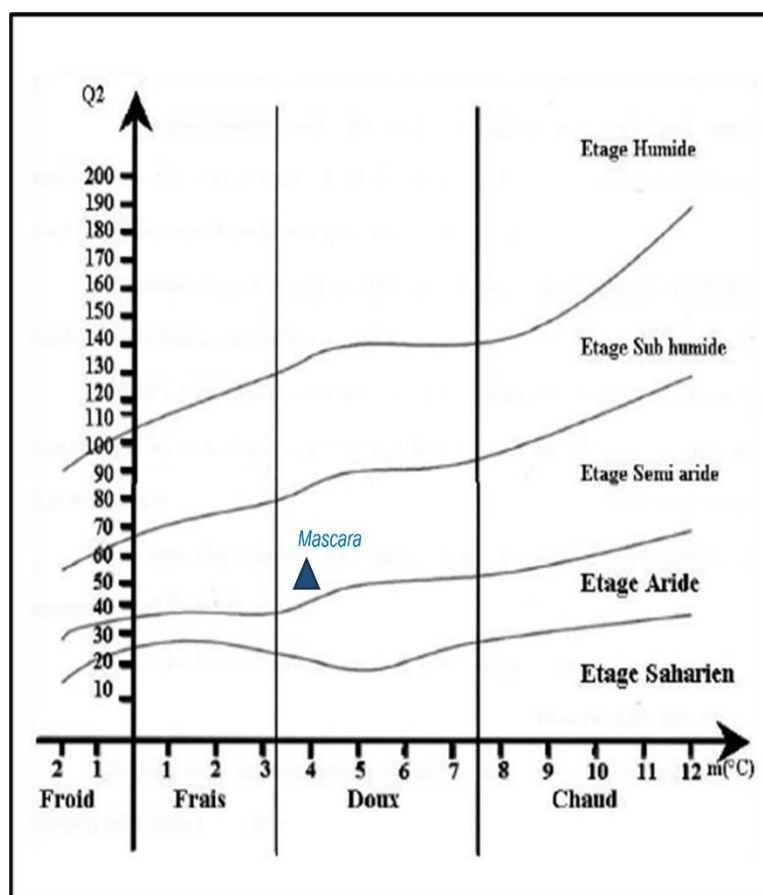


Figure 21 Position de la région de Mascara sur le Climagramme d'Emberger

3.3. Dispositifs expérimentaux

Comme indiqué plus haut dans la démarche expérimentale, deux dispositifs ont été installés, l'un en 2019 au niveau d'une exploitation fruitière privée de la plaine de Ghriss (Mascara) et l'autre en 2020, au niveau de la serre climatique de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université de Mascara.

3.3.1. Étude des interactions du système « pommier -*D. plantaginea* » avec les pratiques culturales

L'étude des interactions du système biologique « pommier -*D. plantaginea* » sous l'effet des pratiques culturales s'est déroulée durant deux années consécutives, sur terrain et ensuite en conditions contrôlées.

La taille d'hiver et la fertilisation minérale azotée ont été choisies pour cette étude, compte tenu de leur pertinence et de leur effet sur la vigueur de l'arbre et par conséquent sur les populations des pucerons. En effet, ces deux pratiques agronomiques sont privilégiées en production fruitière intégrée (voir chapitre précédent).

3.3.2. Élevage de *D. plantaginea*

Pour les besoins des différentes expérimentations (taille d'hiver et fertilisation azotée) un élevage des colonies du puceron *D. plantaginea* a été mis en place en 2019 au sein de la faculté des sciences de la nature de l'université de Mascara. Des plants de pommiers de la variété Gala âgés d'un an et greffés sur le porte-greffe M-111, à racines nues ont été plantés durant le mois de février dans des pots contenant un mélange de terre et de tourbe agricole à hauteur de 50-50%. Les pots ont été placés dans les conditions ambiantes jusqu'au débourrement complet et développement des premières feuilles, puis introduit dans la serre climatique (Fig.22).

De plus, des fondatrices (femelles vivipares) de *D. plantaginea* ont été récoltées en avril dans un verger de pommiers infesté situé dans la région de Sidi Bel Abbés. Ces femelles ont été placées sur les jeunes pousses des jeunes pommiers. Pour déclencher la reproduction par parthénogenèse, le dispositif d'élevage des colonies de pucerons a été placé dans la serre sous des conditions climatiques contrôlées à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, une hygrométrie relative de $65 \pm 5 \%$ et une photopériode de 16 heures (Blommers et al., 2004).

Les femelles fondatrigènes (femelles parthénogénétiques aptères) utilisées pour l'infestation des arbres sont âgées entre 1 et 3 jours. L'élevage a été renouvelé en 2020 selon la même procédure et le même dispositif.



Figure 22 Élevage des colonies de *D. plantaginea* sur pommiers sous serre

3.3.3. Effet de la taille d'hiver

L'étude des interactions du système "pommier Gala - *D. plantaginea*" sous l'effet de la taille d'hiver a eu lieu de janvier 2019 au début août 2019, dans un verger fruitier intensif spécialisé dans la production de la région de Mascara. Les traitements ont consisté à évaluer les effets de trois niveaux d'intensité de taille hivernale sur la croissance végétative, la dynamique et l'infestation par les pucerons, et sur le rendement en fruits.

3.3.3.1. Descriptif du verger expérimental

Le verger de pommier intensif a une superficie totale de six hectares, dont quatre hectares de pommiers de la variété Gala. Il est situé à une altitude de 485 mètres et présente les coordonnées GPS suivantes : 35° 22' N ; 0° 09' E (Fig. 23). Les arbres sont palissés et sont installés sur un terrain plat présentant une texture argilo-limoneuse. Le verger est entouré de brise-vent constitué de casuarina.

Le verger Gala, objet de nos expérimentations, est composé d'arbres greffés sur le M-111, plantés en 2010. Les arbres, d'une hauteur moyenne de 4 mètres, sont conduits en axe central. La distance de plantation entre les rangs est de 4 mètres, et la distance entre les arbres est de 1,5 mètre, ce qui donne une densité de 1 666 arbres par hectare. Le palissage des arbres est constitué de fils de fer galvanisé dont la première ligne (en partant du bas) est placée à 20 cm du sol et porte la ligne du goutte-à-goutte puis 4 lignes se suivent à 50 cm d'intervalle à chaque fois.

Pendant la saison, l'irrigation est assurée par un réseau de goutte-à-goutte, équipé de deux goutteurs par arbre débitant 4 litres par heure chacun. Pendant la croissance végétative du 1er mars au 5 avril, l'irrigation est assurée à raison de 30 minutes une fois tous les deux jours et 45 minutes une fois tous les deux jours du 6 avril au 15 mai. Du 16 mai au 15 juin, l'irrigation est assurée une heure une fois tous les deux jours, du 16 au 30 juin une heure tous les jours, et jusqu'à ce qu'elle atteigne 2 heures par jour, tous les jours jusqu'à la récolte vers le 4 ou le 5 août.

La fertilisation minérale se fait par des apports fractionnés en quatre fois de 48 unités d'azote et 122 unités de P₂O₅ du 20 mars au 10 avril par hectare. Le traitement d'hiver contre les formes hivernantes des insectes ravageurs (pucerons, acariens, cochenilles, etc.) est réalisé annuellement par l'application d'huile de pétrole (huile blanche) à raison de 10 litres par hectare.

Pendant la phase de croissance végétative, quatre applications d'insecticides et une application d'acaricide ont été nécessaires pour contrôler respectivement le carpocapse des pommes et des poires *Cydia pomonella* et l'acarien *Cenopalpus pulcher*. En ce qui concerne le désherbage, il se fait à l'aide de matériel mécanique et sur les rangs, en laissant les entre-rangs enherbés (annexe, Tab. S2).



Figure 23 Aperçu sur le verger expérimental de pommiers (variété Gala), conduit en intensif

3.3.3.2. Estimation de l'intensité de taille (IP %) et élevage des pucerons

Le traitement comporte trois types d'intensité de taille, taille longue (LP), taille modérée (MP) et taille sévère (HP). Chacune des tailles est pratiquée sur cinq arbres, soit trois répétitions. L'intensité de taille, exprimée en pourcentage (IP %), a été estimée selon une méthode décrite précédemment par Grechi *et al.* (2008) sur pêcher. Cette méthode est basée sur la longueur totale du bois prélevé par arbre. Ainsi, IP % est défini comme étant le pourcentage de la masse fraîche (poids en gramme) du bois d'un an prélevé sur la masse fraîche du bois initial :

$$IP \% = \frac{\text{masse fraîche du bois coupé}}{\text{masse fraîche du bois initial}} \times 100$$

La masse fraîche du bois coupé par arbre a été pesée à la taille. La masse fraîche du bois initial, qui correspond à la somme du bois coupé et du bois resté sur l'arbre, a été estimée à partir de la mesure de la longueur des rameaux prélevés (> 2 cm) et d'une relation entre la masse fraîche (g) et la longueur des rameaux (cm). Cette relation a été estimée grâce à un modèle de régression linéaire polynomial. L'équation du modèle d'ordre 3, calculée avec le logiciel R langage (R Core Team, 2020), s'exprime comme suit :

$$M = -0.0418 + a \times L - b \times L^2 + c \times L^3$$

Avec : M : masse fraîche en g ; $a = 0.334 \pm 0.154$; $b = 0.0157 \pm 0.012$; $c = 0.000504 \pm 0.0002$;
L : longueur du rameau en cm.

L'équation du modèle explique 40 % de la variance avec un coefficient de corrélation assez élevé ($R = 0.63$). Le F-statistique (165.1) représente une Valeur de signification faible ($P < 2.2e-16$), ce qui signifie qu'au moins une fonctionnalité a un effet significatif. Ainsi, selon les calculs effectués à partir de l'équation ci-dessus, l'intensité de taille variait de 11, 88 à 58,78 %, LP variait de 11.88 à 20.74 %, MP de 32.78 à 46.61 % et HP de 51.34 à 58.78 % (Tab. 4).

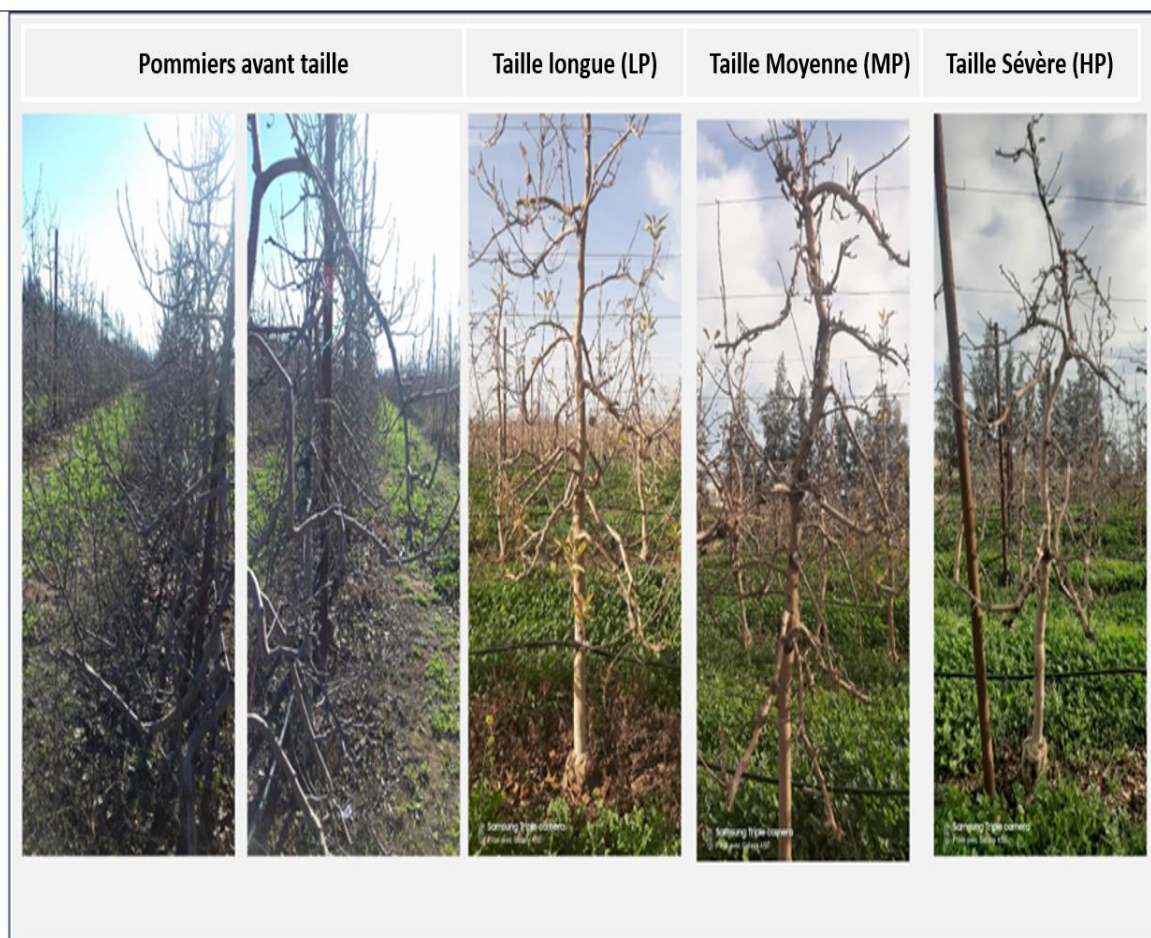
Tableau 4 Estimation du modèle de régression linéaire polynomial d'ordre 3

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	- 0.0418	0.5421	- 0.077	0.9386
L	0.334	0.1536	2.172	0.0307
L ²	- 0.0157	0.0121	-1.293	0.1969
L ³	0.000504	0.0002	1.797	0.0733

La consistance des trois modalités de taille pratiquée sur les arbres expérimentaux (LP, MP et HP) est consignée dans le tableau 5, et illustrée par la figure 24 ci-dessous.

Tableau 5 Caractéristiques des différentes modalités de taille d'hiver pratiquées sur la rangée d'arbres expérimentale, en 2019.

Intensité de la taille d'hiver pratiquée	Principe (prélèvement effectué)
LP	*Coupe de 5 à 15 rameaux/arbre maximum (d'un et deux ans), à différents niveaux en supprimant seulement le bourgeon apical pour limiter les nouvelles pousses.
MP	*Coupe de 15 à 20 rameaux/arbre maximum (d'un et deux ans), à différents niveaux en supprimant seulement le bourgeon apical. *Coupe d'environ 5 bois de deux et trois ans équitablement répartis en laissant un seul bourgeon pour favoriser de nouvelles pousses.
HP	*Coupe de 15 à 25 rameaux/arbre maximum (d'un et deux ans), à différents niveaux en supprimant seulement le bourgeon apical. *Coupe d'environ 15 bois de deux et trois ans équitablement répartis en laissant un seul bourgeon pour favoriser un maximum de nouvelles pousses.

**Figure 24** Les différentes intensités de taille d'hiver pratiquées sur les arbres expérimentaux.

3.3.3.3. Mise en place du dispositif de la taille d'hiver

Le dispositif expérimental installé au sein du verger de pommier décrit plus haut est constitué par une rangée linéaire de 15 arbres. Le traitement consiste à tester deux facteurs, l'intensité de la taille et l'infestation par le puceron *D. plantaginea*. La taille est exprimée en gradient d'intensité variant de 11.88 % à 58.78 %. L'infestation comporte deux modalités, une modalité arbres infestés (AI) et une modalité arbres non infestés (NAI). L'affectation du facteur « intensité de taille » aux arbres expérimentaux est effectuée d'une manière aléatoire.

La taille des 15 arbres expérimentaux a été pratiquée le 08/01/2019, durant la période de dormance et la chute totale des feuilles. Le principe de la taille consistait à couper du bois de l'année (rameaux > 2 cm) ainsi que les rameaux en contact pour éviter le mouvement des pucerons entre les arbres. Les prélèvements du bois par arbre s'effectuent en tenant compte de la longueur (cm) des rameaux (Tab 6). Le traitement comportait 5 répétitions (5 arbres) par type d'intensité de taille.

Pour ce qui est de la modalité arbres infestés, la rangée des 15 arbres était séparée en deux lots, 9 arbres pour la modalité infestée par les pucerons (AI) et 6 arbres pour la modalité saine ou non infestée (NAI). L'arbre étant l'unité expérimentale (ou unité statistique ou répétition), le dispositif installé est en randomisation totale. Vers la fin du stade floraison (124 jours après la taille), les arbres de la rangée expérimentale ont été entièrement placés sous un tunnel constitué par un filet blanc en polyéthylène insect-proof (alt-carpo). Le lot des arbres AI été séparé du lot NAI par un filet insect-proof renforcé. Grace aux dimensions fine de la maille (850 micromètres), le filet alt-carpo permet d'isoler les arbres du reste du verger par l'exclusion des insectes ravageurs comme *C. pomonella*, les pucerons et autres principaux ravageurs des vergers (Fig.25).

Le filet a un effet modéré, voire négligeable sur la température de la canopée des arbres (+ 0.2 - 0.8°C par rapport aux conditions ambiantes), et aucun effet sur les paramètres biométriques des fruits (Kührt *et al.*, 2006, Iglesias et Alegre, 2006). Le tronc de chaque arbre expérimental a été entouré par une bande engluée afin d'empêcher les fourmis d'atteindre les pucerons sur l'arbre. Aucune application chimique ni éclaircissage n'a eu lieu durant la période expérimentale.

Pour écarter les effets négatifs des pulvérisations de pesticides effectuées par l'agriculteur au sein du verger sur les pucerons, une zone tampon de 16 m (4 rangées d'arbres) a été utilisée de chaque côté de la rangée expérimentale (Peck et Merwin, 2009).

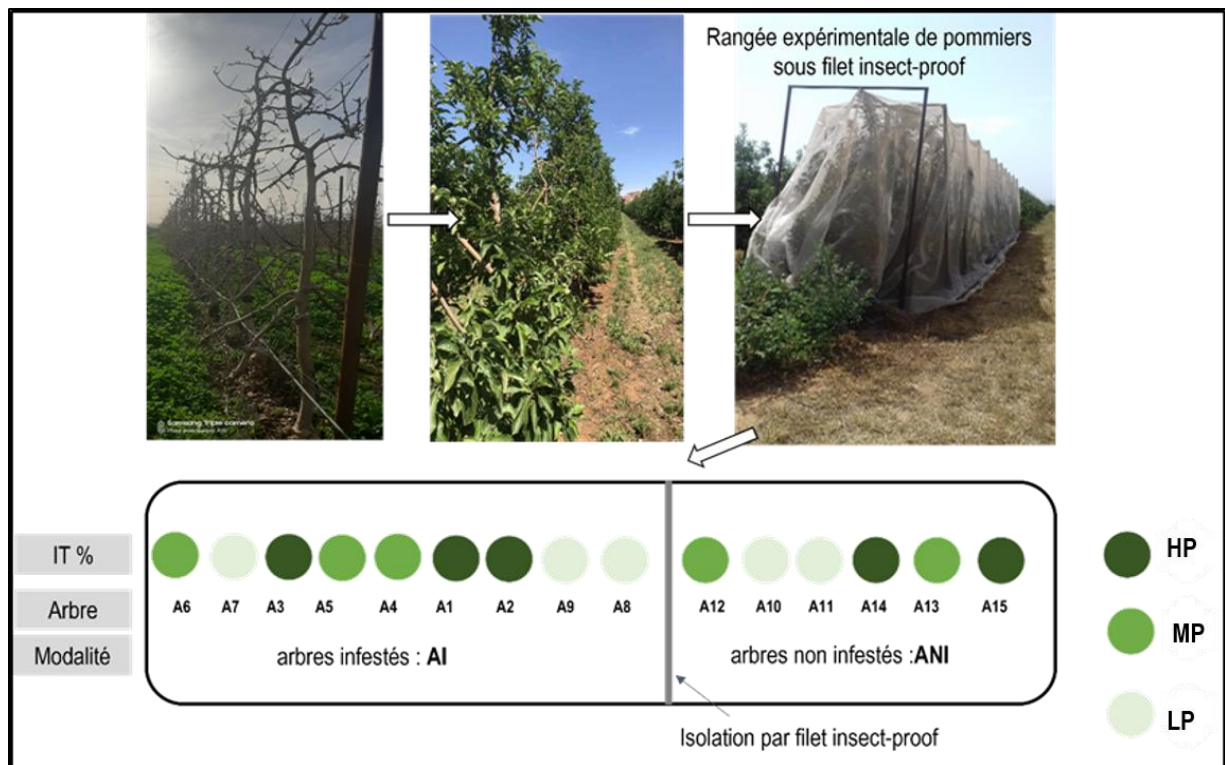


Figure 25 Schéma du dispositif expérimental randomisé de la taille d'hiver, sous tunnel insect-proof.

Tableau 6 Intensité de la taille (IP %) calculée pour chacun des 15 arbres expérimentaux

N° arbre	Modalité	Rameaux coupés			IP %	Type IP %
		L (cm) ± SD	Nombre	P (g) ± SD		
1	AI	351.10 ± 6.60	28	89.95 ± 1.02	55.44	HP
2	AI	257.6 ± 6.66	25	53.75 ± 2.25	57.80	HP
3	AI	451.4 ± 7.09	37	97.25 ± 2.08	58.78	HP
4	AI	195.6 ± 8.11	15	40.29 ± 1.66	44.00	MP
5	AI	281.5 ± 8.90	15	83.77 ± 2.86	46.61	MP
6	AI	236.9 ± 7.72	21	40.35 ± 1.30	38.94	MP
7	AI	94.55 ± 8.24	06	14.99 ± 2.70	15.04	LP
8	AI	115.9 ± 6.59	09	38.3 ± 1.41	17.27	LP
9	AI	134.0 ± 6.09	11	34.86 ± 1.49	20.74	LP
10	NAI	84.4 ± 5.60	06	17.91 ± 1.24	11.88	LP
11	NAI	109.7 ± 5.65	10	27.78 ± 1.48	16.95	LP
12	NAI	278.2 ± 8.31	23	66.73 ± 2.37	35.31	MP
13	NAI	225.9 ± 7.57	20	49.13 ± 1.60	32.78	MP
14	NAI	332.3 ± 7.73	26	86.18 ± 2.42	51.34	HP
15	NAI	415.0 ± 5.99	36	75.77 ± 0.98	57.39	HP

* L = longueur moyenne, P = poids moyen en grammes, AI (Arbre infesté par *D.Plantaginea*), NAI (non infesté par *D.plantaginea*), IP =intensité de la taille, LP : taille longue, MP : taille modérée, HP : taille sévère.

3.3.3.4. Infestation des arbres et échantillonnage

L'infestation artificielle des 9 arbres AI, par les pucerons issus de l'élevage, s'est faite le 13 mai 2019 au moment où les jeunes pousses feuillues apicales (terminales) présentaient une longueur moyenne de 7.4 ± 0.55 cm (moyenne calculée pour 150 pousses). Sur chaque arbre, dix pousses ont été aléatoirement choisies et marquées à l'aide d'un anneau rouge (Fig.26). Dix individus ont ensuite été placés à l'aide d'une fine pince sur chacune des pousses ainsi marquées (sur les jeunes feuilles). Un total de 900 femelles aptères a été ainsi utilisé pour le dispositif AI.

Lors de cette phase, la température moyenne était avantageuse pour le développement des pucerons (moyenne : 18.0 °C ; max : 26.2 ; min : 10,3 °C). Le même protocole a été effectué pour les cinq autres arbres du traitement NAI à l'exception de l'infestation par les pucerons (0 pucerons).



Figure 26 Pousse terminale du pommier Gala marquée.

Pour les deux traitements AI et NAI, plusieurs paramètres ont été mesurés au niveau des pousses marquées : suivi de la croissance végétative, l'abondance des pucerons, le dommage des feuilles, le poids frais et le calibre des fruits à la récolte.

3.3.3.5. Suivi temporel de la croissance végétative

Les relevés de la croissance végétative des pousses (tous les arbres AI et NAI) ont été effectués en mesurant la longueur de la pousse et le nombre de feuilles par pousse marquée. Ces mesures ont été effectuées à intervalles de 14 jours, entre le 13 mai et le 8 juillet 2019 pour les pousses, couvrant ainsi la période de croissance active jusqu'à la fin de la croissance végétative, et jusqu'au 22 juillet pour les feuilles. Les données recueillies sont utilisées pour le calcul de la vitesse relative de croissance des pousses ou encore le taux de croissance relative (RGR : Relative Growth Rate). Le RGR se base sur la méthode modifiée décrite par Hunt (1978) et s'exprime comme suit :

$$RGR = \frac{\ln L2 - \ln L1}{T2 - T1}$$

Avec L1 et L2 = longueur moyenne des pousses de chaque arbre respectivement au temps T1 et T2. Le temps T = t exprime le nombre de jours après infestation (DAI) et varie entre T1 = 1 DAI (13 Mai) et T2 = 56 DAI (8 juillet).

3.3.3.6. Dynamique temporelle des colonies de pucerons

Le suivi de la dynamique des pucerons sur les feuilles de chaque pousse marquée (modalité AI) a été évalué visuellement à 7 jours d'intervalle depuis le début de l'infestation artificielle jusqu'à l'absence de signes de présence de pucerons sur les arbres. Selon la méthode proposée par Frechette *et al* (2008), l'abondance de pucerons par pousse a été exprimée sous la forme d'un degré d'infestation compris entre 0 et 5, où 0 = pas de pucerons, 1 = 1 à 5 pucerons, 2 = 6 à 20 pucerons, 3 = 21 à 50 pucerons, 4 = 51 à 100 pucerons et 5 = plus de 100 pucerons sur une seule pousse.

Ce degré d'infestation a été utilisé pour calculer l'indice d'infestation (IF) pour chaque arbre du traitement AI et pour toutes les dates de relevés, selon la formule suivante (Laghfiri *et al.*, 2017) :

$$IF = \frac{\sum_{d=0}^5 (d \times fd)}{5 \times \sum_{d=0}^5 fd}$$

Avec d = degré d'infestation compris entre 0 et 5 et fd = fréquence de pousses par arbre avec le degré d'infestation d compris entre 0 et 5.

3.3.3.7. Dégâts sur les feuilles et les fruits

55 jours après le premier jour d'infestation, les dommages aux feuilles (feuilles enroulées) ont été évalués, selon l'échelle d'évaluation de Rat-Morris (1993) : où 0 = aucun dommage ; 1 = feuille légèrement enroulée au bord ; 2 = feuille enroulée longitudinalement ; 3 = enroulement typique des feuilles de *D. plantaginea* ; 4 = 2 à 5 feuilles généralement enroulées ; 5 ≥ 5 feuilles généralement enroulées (Fig.27). L'enroulement des feuilles a également été relevé chaque semaine pendant les relevés des niveaux d'infestation.

À maturité (début août), le nombre total de fruits par arbre a été mesuré. Afin d'évaluer l'effet de l'infestation sur les paramètres productifs, le poids frais des fruits et leurs calibres ont été évalués sur un échantillon aléatoire de 20 fruits par arbre (n = 300) récoltés autour de la pousse marquée, pour les deux modalités AI et NAI.

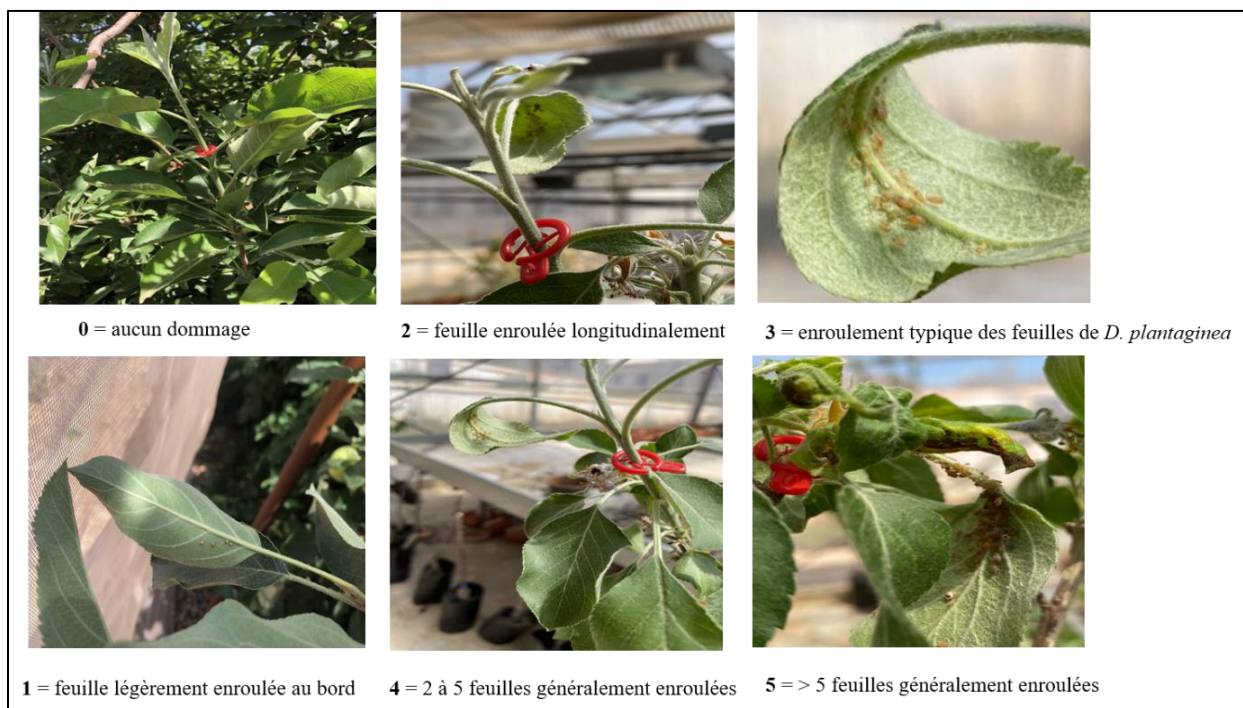


Figure 27 Différents types d'enroulement des feuilles de pommier dû aux attaques de *D. plantaginea* (originale).

3.3.4. Effet de la fertilisation azotée

Dans l'étude en question, l'engrais azoté utilisé est le Nforce 40, un produit commercialisé et homologué en Algérie par la société SARL Sodagri. Cet engrais solide est un mélange d'intrants organiques et minéraux, composé de 30 % d'azote total dont 3 % ammoniacal, 24 % uréique, 2 % ureaform et 1 % organique. Il contient également 10 % de trioxyde de soufre soluble et 7,5 % de carbone d'origine biologique. La dose recommandée pour les arbres fruitiers en âge adulte est comprise entre 400 et 600 kg par hectare (fiche technique en annexe).

3.3.4.1. Site et objectif de l'étude

L'étude de l'effet de fertilisation azotée sur le système « pommier-*D. plantaginea* » et en particulier son impact sur les niveaux d'infestation et la dynamique du puceron s'est déroulée pendant le printemps-été de l'année 2020.

Cette étude a été réalisée dans des conditions contrôlées dans la serre climatique de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université de Mascara. Des plants de pommiers infestés ont été soumis à différents régimes de fertilisation azotée tout en maintenant les arbres sous un statut hydrique favorable au développement végétatif. La serre climatique de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université de Mascara est utilisée pour l'expérimentation.

3.3.4.2. Dispositif expérimental

L'expérimentation est réalisée dans une serre sous des conditions climatiques contrôlées et favorables à la reproduction asexuée de *D. plantaginea* et à la croissance végétative des pommiers (température de 24 ± 2 °C, $65 \pm 5\%$ d'humidité relative et une photopériode de 16 heures). Le dispositif en randomisation totale est composé de 24 plants de pommier Gala d'un an et greffés sur le M-111. Les arbres, d'une hauteur moyenne de 160 ± 5 cm, sont placés dès leur réception en mai dans des sacs de culture en plastique noir (PEHD, biodégradable et drainant) de 5 litres (H : 30 cm x L : 17 cm). Ces sacs sont remplis d'une tourbe largement utilisée en horticulture, appelée plantaflor (fiche technique en annexe). Cette tourbe améliorée a un pH (CaCl_2) de 5.6 et contient 180 mg/l d'azote, 100 mg/l de P_2O_5 et 230 mg/l de K_2O . Elle a également une teneur en sel de 1 g/l. Ces caractéristiques offrent une bonne rétention d'eau, une bonne préservation des nutriments et une bonne aération des racines. De plus, la tourbe permet d'ajuster le pH, ce qui la rend adaptée à la plupart des espèces végétales. Les plants, mis en place sous serre, ont bénéficié d'une irrigation adaptée à leurs besoins avant le début des traitements.

Les traitements ont été initiés une fois que les pousses de l'arbre avaient atteint une longueur moyenne de $41,35 \pm 6,33$ mm et un nombre moyen de $9,21 \pm 0,57$ feuilles par pousse (moyenne des 24 arbres). Les traitements comprennent un gradient de fertilisation azotée et l'état sanitaire des arbres installés sous serre. La fertilisation azotée se compose de trois niveaux de nutrition allant de la dose totale habituellement utilisée par les arboriculteurs sur jeunes pommiers, soit 50 g/arbre (100 %) (dose de confort), et deux doses faibles de 37.50 g/arbre et 25 g/arbre (75 %, 50 %). Pour l'état sanitaire vis-à-vis de *D. plantaginea*, deux modalités sont pratiquées : l'une infestée (de A1 à A16) et l'autre saine (de A17 à A 24).

Les arbres, numérotés de 1 à 24, sont placés dans la serre selon un dispositif en randomisation totale, avec quatre répétitions pour la modalité infestée AI et deux répétitions pour la modalité saine NAI. Chaque arbre étant considéré comme une unité expérimentale.

Le lot témoin, comprend 4 arbres pour la modalité AI (0 % N) et 2 arbres pour les NAI (0 % N) (Tab.7).

Du 1er juin au 19 juin, quatre apports contenant de l'azote dissous dans 1 litre d'eau ont été appliqués par arbre et par semaine. À la fin de l'expérience, chaque arbre des trois traitements (100, 75 et 50 %) avait reçu respectivement un total de 200, 150 et 100 grammes d'azote. En ce qui concerne l'eau, huit apports de 1 litre ont été effectués tous les deux jours, à partir du 1er juin, avec ou sans azote. Sur chaque arbre, une pousse terminale est marquée par un anneau rouge, et sur laquelle sont prises les différentes mesures de croissance. (Fig.28). L'infestation des arbres a été réalisée le 01 juin 2020 et a consisté à déposer deux jeunes femelles aptères par pousse terminale et par arbre. Le calendrier des apports d'azote associés à l'eau se déroule chaque semaine du 1er juin au 22 juin. Chaque arrosage apporte une quantité d'eau suffisante pour ramener le substrat à la capacité de rétention.

Tableau 7 Dispositif de fertilisation azotée en randomisation totale avec 4 répétitions

Modalité	Dose/g	Dose % N	Arbres				N total / arbre (g)	Date	Apport d'eau (litre) N [±]
Infestée + (AI)	D1 : 50	100	A2	A4	A1	A6	200	01/06	1 N ⁺
	D2 : 37.5	75	A7	A13	A3	A8	150	04/06	1 N ⁻
	D3 : 25	50	A15	A10	A16	A14	100	07/06	1 N ⁺
	D 0 : 0	0	A9	A5	A12	A11	0	10/06	1 N ⁻
								13/06	1 N ⁺
Saine + (NAI)	D 1 : 50	100	A17	A21	/	/	200	16/06	1 N ⁻
	D 2 : 37.5	75	A18	A22	/	/	150	19/06	1 N ⁺
	D 3 : 25	50	A19	A23	/	/	100	22/06	1 N ⁻
	D 0 : 0	0	A20	A24	/	/	0	N ⁺ = avec azote N ⁻ = sans azote	

3.3.4.3. Paramètres mesurés

Les mesures effectuées ont consisté à suivre de manière hebdomadaire la dynamique des pucerons (nombre de pucerons) et la croissance végétative des arbres entre le 1er juin et le 25 juin 2020 (période de croissance active des pousses). Un relevé supplémentaire a été effectué le 28 juin uniquement pour les pucerons. L'arrêt des relevés le 28 juin est dû à l'observation d'une forte mortalité parmi les populations de pucerons, causée par une augmentation notable de la température sous serre, due à un dysfonctionnement du système de refroidissement. La dynamique des pucerons est exprimée sous forme de degrés d'infestation (IF), selon la méthode proposée par Frechette *et al* (2008) (décrite plus haut). La dynamique des pucerons a été exprimée en degrés d'infestation (IF), selon la méthode de Frechette *et al.* (2008). La croissance végétative a été suivie en mesurant la longueur de la pousse terminale, le nombre de feuilles par pousse. Le RGR Ln (formule indiquée plus haut) et le diamètre du tronc ont également été mesurés. La longueur relative des pousses (LPR %) a été calculée à l'aide d'une formule :

$$LPR \% = \frac{LPA}{LPF} \times 100$$

LPA = longueur des pousses absolue (= longueur des pousses finale – longueur des pousses initiale) et LPF = longueur des pousses finale.



Figure 28 Dispositif en randomisation totale relatif à l'effet de la fertilisation azotée sur le système « pommier-puceron cendré » en conditions contrôlées.

3.3.5. Étude des interactions du système « pommier -*D. plantaginea* » avec les paramètres écologiques

Au sein d'un verger fruitier, il existe, entre autre, des interactions entre le bioagresseur et son environnement abiotique. C'est pourquoi on s'est intéressé à l'étude de l'effet de la température ambiante sur le système « pommier- *D. plantaginea* ».

3.3.5.1. Effet des facteurs abiotiques : les températures

Dans les conditions environnementales naturelles, l'interaction entre les pucerons, les températures et les arbres fruitiers est complexe et dépend de nombreux facteurs. Les températures minimales et maximales ont un impact direct sur les ravageurs et sur la croissance végétative des arbres fruitiers. En effet, ils peuvent avoir un impact important sur la phénologie des pucerons, en particulier leur développement, leur reproduction, leur densité et leur survie. Les températures influencent également le processus de la photosynthèse et par conséquent la croissance, notamment durant les phases printanière et estivale (précisés dans les chapitres précédents).

La physiologie ectothermique des insectes suppose que leur comportement soit fortement influencé par leur microclimat environnant (Bale et Tatchell, 1995). En effet, des températures élevées au printemps et l'été, peuvent ainsi améliorer directement les taux de croissance et de reproduction, mais aussi augmenter la possibilité de stress thermique (températures au-dessus du seuil de tolérance) conduisant à des mortalités élevées au sein des populations. Très peu d'études ont été consacrées à cet aspect. Par conséquent, dans cette étude, nous voulons comprendre les interactions entre les températures ambiantes et la densité des pucerons (exprimée par le nombre de pucerons par arbre), ainsi que la survie de *D. plantaginea* et la croissance végétative des plantes et la densité des pucerons.

Pour y parvenir, nous avons utilisé les données brutes concernant l'évolution temporelle des populations de *D. plantaginea* (exprimée en nombre de pucerons par arbre) et celles relatives à la croissance végétative du pommier, recueillies en plein champ en 2019. Les données de températures maximales et minimales quotidiennes de l'année d'étude ont été obtenues à partir d'une station météo de Matamore (Mascara), située à environ 3 km du site expérimental (Fig. 29).

Ces données sont des indicateurs importants de la variation thermique quotidienne. Ces bases de données seront utilisées pour modéliser l'effet des températures sur les populations de *D. plantaginea*. Elles seront également exploitées pour la construction de modèles de prédiction du comportement des pucerons et aussi de la croissance végétative.

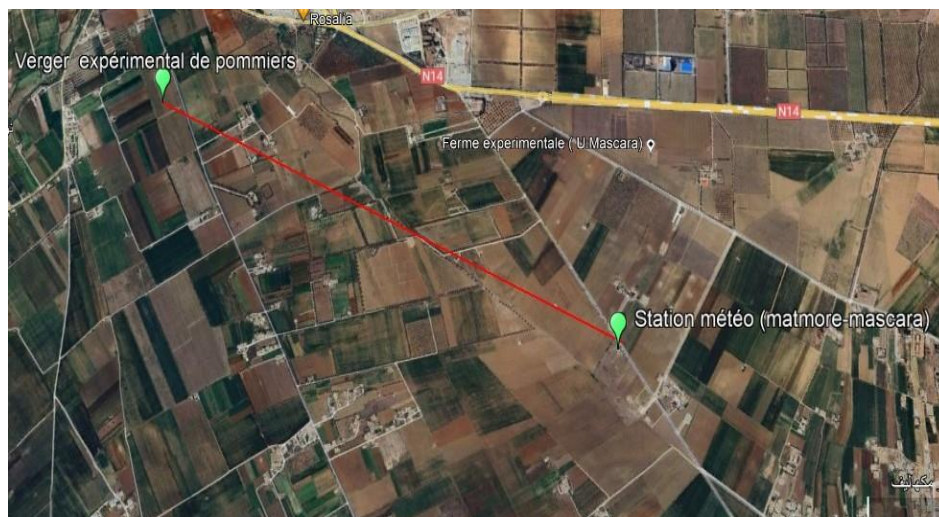


Figure 29 Localisation de la station météorologique de Matmore par rapport au verger expérimental de pommiers

3.4. Méthodes d'analyse statistique des résultats

Les tests statistiques relatives à l'effet de la taille d'hiver, de l'azote et des températures sur le système « pommier-*D. plantaginea* », ont été effectués à des niveaux de signification de 0,001, 0,01 et 0,05 à l'aide du logiciel statistique SPSS 19.0 pour Windows (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). Le logiciel R (R Development Core Team, 2010) a été utilisé afin d'analyser les interactions et de créer des modèles de prédiction entre les températures (minimales, maximales et moyennes), les effectifs des pucerons et la croissance végétative.

Les données brutes concernant les relevés hebdomadaires réalisés pour l'étude l'influence de l'intensité de la taille et de la fertilisation azotée sur le système « pommier - pucerons » (croissance végétative et dynamique des pucerons) ont été préalablement analysées pour confirmer l'hypothèse de sphéricité à l'aide du test de Mauchly. Pour les données ayant violé l'hypothèse de sphéricité ($p > 0,05$), une correction de Greenhouse–Geisser a été utilisée pour ajuster les degrés de liberté afin qu'un critère F valide puisse être obtenu (Lee et Gilmore, 2006). Cet ajustement fournit une valeur p ajustée plus précise (Verma, 2015).

3.4.1. Effet de la taille d'hiver

Des modèles linéaires généraux (GLM) à mesures répétées (Nelder et Wedderburn 1972) ont été ajustés pour tester si IP (HP, MP et LP) de chaque traitement (AI et NAI) avaient des effets sur la croissance végétative et sur la dynamique des populations de pucerons.

Les dates d'échantillonnage ont été définies comme des facteurs intra-groupes (mesures répétées) et les groupes IP comme des facteurs inter-groupes. Lorsque des différences significatives ont été détectées, les moyennes ont été comparées à l'aide du test post hoc de Bonferroni pour les comparaisons multiples. Cette méthode puissante est recommandée lorsque l'hypothèse de sphéricité est violée (Park *et al.*, 2009).

Pour explorer les relations entre IP et les variables de croissance végétative, des modèles de régression linéaire ont été réalisés. Des modèles séparés ont été ajustés entre le nombre moyen de feuilles par pousse, transformé en logarithme, et les valeurs d'IP (à chaque date d'échantillonnage) et entre le taux de croissance relatif (RGR) et l'IP des traitements AI et NAI.

Un test t de Student (à 2 échantillons) a été effectué sur les valeurs moyennes des variables de croissance végétative mesurées à la fin de la saison afin de détecter les différences statistiques entre les deux modalités. Des modèles linéaires ont également été ajustés pour mettre en évidence les relations qui existent entre l'indice d'infestation de pucerons (IF maximum) et l'IP, et entre l'IF et le RGR.

Pour vérifier s'il existait une relation entre la dynamique temporelle des pucerons et la densité de pucerons par pousse des arbres AI, une régression linéaire a été effectuée avec des données transformées en logarithme. Une approche similaire a été utilisée pour évaluer les relations entre la proportion maximale (%) de feuilles enroulées par pousse et l'IF maximal, et entre chaque paramètre de rendement en fruits (charge en fruits, poids des fruits et diamètre des fruits), le groupe IP et l'IF.

Un test t de Student (à deux échantillons) suivi d'une analyse de corrélation de Pearson a été effectué pour évaluer si IP et IF affectaient les paramètres de rendement des fruits à la récolte (poids des fruits, charge des fruits, taille des fruits et rendement en fruits). Lorsque les données ont été analysées à l'aide de modèles de régression, l'arbre était l'unité statistique et les régressions ont été effectuées sur la valeur moyenne des mesures.

3.4.2. Effet de la fertilisation azotée

Des modèles linéaires généralisés (GLM) à mesures répétées ont été réalisées afin de tester l'effet du traitement N et des traitements AI (arbres infestés) et NAI (arbres non infestés) sur la croissance végétative (longueur de la pousse et nombre de feuilles / pousse) et la dynamique temporelle des pucerons.

Les dates d'échantillonnage ont été définies comme des facteurs intra-groupes (mesures répétées) et les dose de N comme des facteurs inter-groupes. Lorsque des différences significatives ont été détectées, les moyennes ont été comparées à l'aide du test post hoc de Tukey ($p < 0,05$) pour les comparaisons multiples. L'analyse de l'effet de N sur les interactions « pucerons - croissance végétative » a été faite par l'exploitation des modèles de régression polynomiales, suivis de relations ont ensuite été testés par la corrélation de Pearson.

3.4.3. Effet des températures sur le système « pommier-*D.plantaginea* »

Des modèles de régressions polynomiales ont été utilisés pour l'analyse de la mortalité naturelle temporelle et l'effet des températures sur les pucerons.

Des modèles de prédiction ont également été développés, pour la dynamique des effectifs (régression polynomiale) et la croissance végétative (régressions linéaires). Des modèles linéaires généralisés (GLM) ont été exploités pour l'analyse des interactions des températures (minimales, maximales et moyennes) (variables dépendantes) avec la dynamique des pucerons et la croissance des pousses (variables indépendantes). Pour ce faire, nous avons exploité la base de données des relevés hebdomadaires réalisés au champ en 2019.

CHAPITRE 4

Analyse des résultats

Chapitre 4. Analyse des résultats

Ce chapitre présente les résultats des expériences menées pour évaluer l'influence de différents facteurs sur le système "pommier-puceron cendré". Tout d'abord, l'effet de l'intensité de la taille d'hiver sur la croissance végétative des pommiers et la dynamique des populations de *Dysaphis plantaginea* sera exposé, en mettant l'accent sur les liens entre pratiques culturales et développement de ravageurs. Ensuite, les résultats sur l'impact de la fertilisation azotée seront présentés, en mettant l'accent sur ses répercussions sur les arbres et sur l'abondance des pucerons. Enfin, l'analyse des effets de la température permettra d'examiner comment ce facteur climatique influence les interactions entre l'hôte et le ravageur, en prenant en compte les réponses biologiques.

4.1. Effet de l'intensité de la taille d'hiver sur le système « pommier -*D. plantaginea* »

4.1.1. Dynamique des populations de *D. plantaginea*

Dans le tableau 8 ci-dessous sont présentés les résultats du suivi hebdomadaire de la dynamique des populations de *D. plantaginea* de la modalité arbres infestés (AI) au sein de la rangée expérimentale. Le suivi s'est déroulé depuis l'infestation artificielle des pommiers jusqu'à l'extinction totale des pucerons, soit du 13/05/2019 au 01/07/2019. L'examen des résultats obtenus montre que *D. plantaginea* était présent sur les pousses végétatives marquées durant six semaines depuis l'infestation artificielle. La densité des populations (à la fois des aptères et des ailés) a augmenté de manière significative ($F_{(3.30, 143.62)} = 51.27, p < 0.05$) trois semaines après le premier jour de l'infestation artificielle. La moyenne est passée de 10 (13/05/2019) à 16.61 (24/06/2019) pucerons par pousse végétative. En effet, l'abondance des pucerons a augmentée au cours du mois de juin, à partir de la troisième semaine, avec une occurrence maximale de 177.49 pucerons/pousse, observée quatre semaines après le début de l'infestation artificielle. Le niveau des populations a ensuite diminué de manière drastique, à partir de la fin juin, jusqu'à son déclin vers le début du mois de juillet 2019.

L'abondance des pucerons était étroitement liée au développement des pousses végétatives du pommier.

En effet, l'examen de la régression linéaire, exprimée en logarithme, révèle que la dynamique de la population de pucerons par jour est positivement corrélée et hautement significative avec la densité de pucerons par pousse ($r = 0.949, p = 0.0003$) (Fig.30).

Tout au long de la période d'infestation, les populations aptères étaient dominantes. L'apparition des adultes ailés s'étend du 20 mai à la fin juin, soit cinq semaines, avec des effectifs importants à la mi-juin. Cette période correspond au vol d'émigration, c'est-à-dire le départ des ailés du pommier vers leur hôte secondaire. En effet, la proportion des ailés augmente progressivement puis diminue, passant de 1.82 % d'adultes ailés par pousse à 1.08 % vers la fin juin, et s'annule au début du mois de juillet. La proportion maximale des ailés est observée trois semaines après l'infestation artificielle (5.29 %), soit une semaine avant le pic d'abondance estivale (Fig. 31). Les formes ailées se rencontrent le plus souvent sur les feuilles âgées, des pousses marquées, qui fournissent le plus de ressources nutritives.

L'évolution dans le temps de la population du puceron cendré est décrite par une équation polynomiale d'ordre 5 significative ($p = 0.09$) (réponse non linéaire). Le modèle décrit une courbe parabolique typique avec une phase optimale d'abondance des pucerons suivie d'une phase de déclin. La valeur du R^2 indique que le modèle explique 98 % de la variance de Y, c'est-à-dire la valeur prédite du nombre de pucerons.. L'équation du modèle s'écrit comme suit :

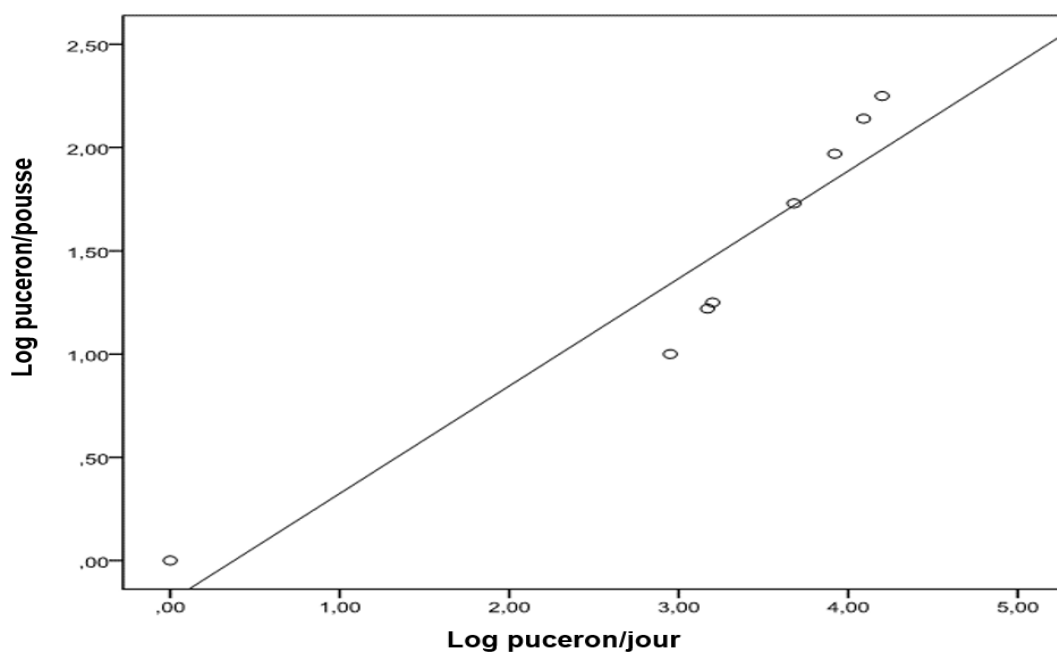
$$Y = -6.83 + 18.77x - 3.77x^2 + 0.23x^3 - 0.006x^4 + 0.0001x^5$$

La crédibilité du modèle développé ci-dessus est renforcée par la presque similarité des valeurs des effectifs de pucerons prédites par jour (moyenne : 74.25 ± 60.39) avec celles calculées (N t) (voir point 4.3.1.1. ci-dessous) selon la formule décrite par Birch (moyenne : 72.93 ± 60.72) (annexe Tab.S3 ; Fig.S1).

Tableau 8 Évolution hebdomadaire des effectifs de *D. plantaginea* (moyenne $\pm$ SE) par pousse végétative du pommier Gala

Date	Moyenne/pousse	Adultes ailés	
	(aptères + ailés)	Moyenne	Proportion (%)
13/05/2019*	10.00 $\pm$ 0 ^a	0 $\pm$ 0 ^a	0
20/05/2019	17.80 $\pm$ 1.19 ^a	0.32 $\pm$ 0.05 ^a	1.82
27/05/2019	53.49 $\pm$ 3.57 ^b	1.64 $\pm$ 0.16 ^a	3.06
03/06/2019	92.89 $\pm$ 6.65 ^c	4.92 $\pm$ 0.44 ^b	5.29
10/06/2019	177.49 $\pm$ 14.99 ^d	8.92 $\pm$ 0.89 ^b	5.02
17/06/2019	137.98 $\pm$ 12.14 ^e	6.09 $\pm$ 0,70 ^c	4.41
24/06/2019	16.61 $\pm$ 2.13 ^a	0.18 $\pm$ 0.04 ^a	1.08
01/07/2019	0 $\pm$ 0 ^a	0 $\pm$ 0 ^a	0

* Jour de l'infestation artificielle. Les lettres a, b, c, d et e indiquent les groupes homogènes. Les valeurs suivies d'une même lettre sont statistiquement différentes entre elles au seuil de 5 % (Test de Tuckey).

**Figure 30** Régression linéaire, exprimée en logarithme, entre le nombre de pucerons par pousse et le nombre de pucerons par jour pour la modalité infestée AI.

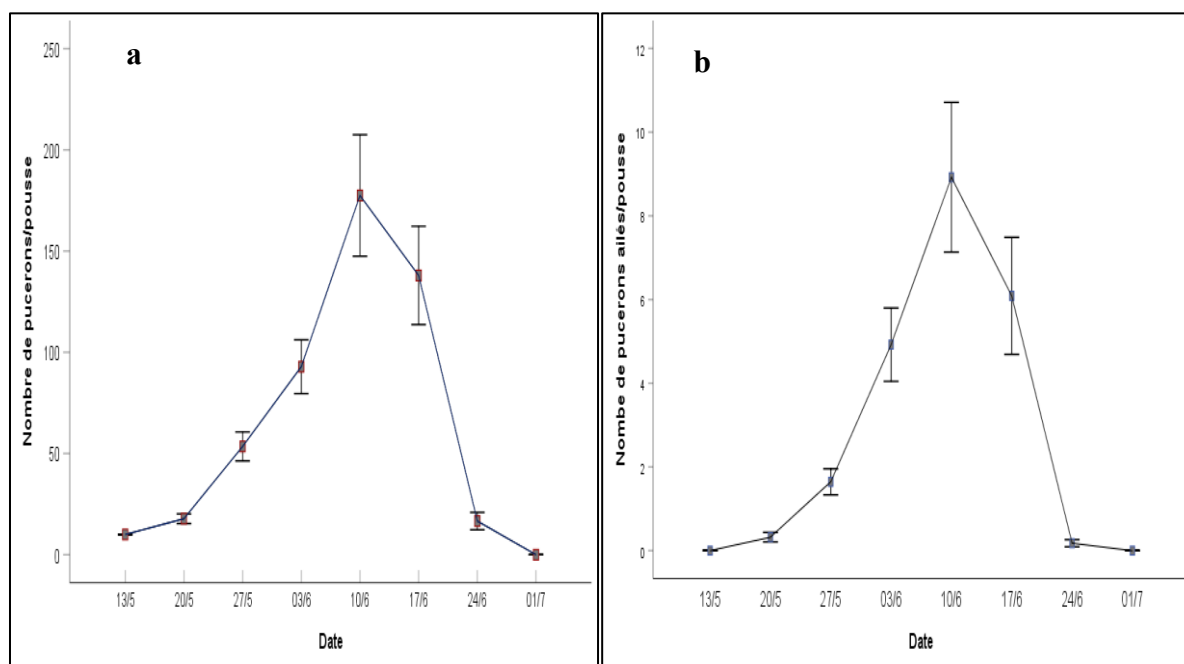


Figure 31 Dynamique hebdomadaire des populations de *D. plantaginea* (nombre moyen $\pm$ SE) : (a) : formes aptères + ailées ;(b) : formes ailées.

4.1.2. Effet de l'infestation sur l'enroulement des feuilles

Les feuilles de la pousse infestée par le puceron cendré présentent des enroulements, plus ou moins marqués selon l'intensité de la taille et l'infestation. Dans le tableau 9 ci-dessous, nous avons consigné les résultats relatifs à l'effet de l'infestation des pommiers par *D. plantaginea* sur l'enroulement des feuilles. Le nombre moyen des feuilles enroulées était positivement corrélé avec la densité des populations du puceron, exprimé par l'indice d'infestation (Fig. 32) ($r = 0.42$, $p = 0.004$).

En fin de saison, soit 55 jours après le premier jour de l'infestation, le pourcentage de feuilles enroulées était plus élevé dans les arbres de la modalité HP (12.83 ± 0.88 %) que dans les arbres de la modalité MP (6.05 ± 0.74 %) et LP (5.74 ± 0.17 %) (Annexe, Tab. S4). Le taux moyen d'enroulement des feuilles, sans tenir compte du type de taille, a atteint 1.61 % pour un nombre moyen de 8.21 feuilles par pousse.

Une relation positive et significative, vérifiée par une régression linéaire, a été trouvée entre la plus forte proportion (%) de feuilles enroulées par pousse et les valeurs maximales d'IF (c.-à-d. les derniers relevés) ($R^2 = 0.682$, $p = 0.006$) (Fig.33).

De même, une forte corrélation existe entre le nombre moyen de feuilles enroulées par pousse (moyenne de l'ensemble des relevés) et les valeurs maximales d'IF ($R^2=0.876$, $p < 0.005$) (Fig.34).

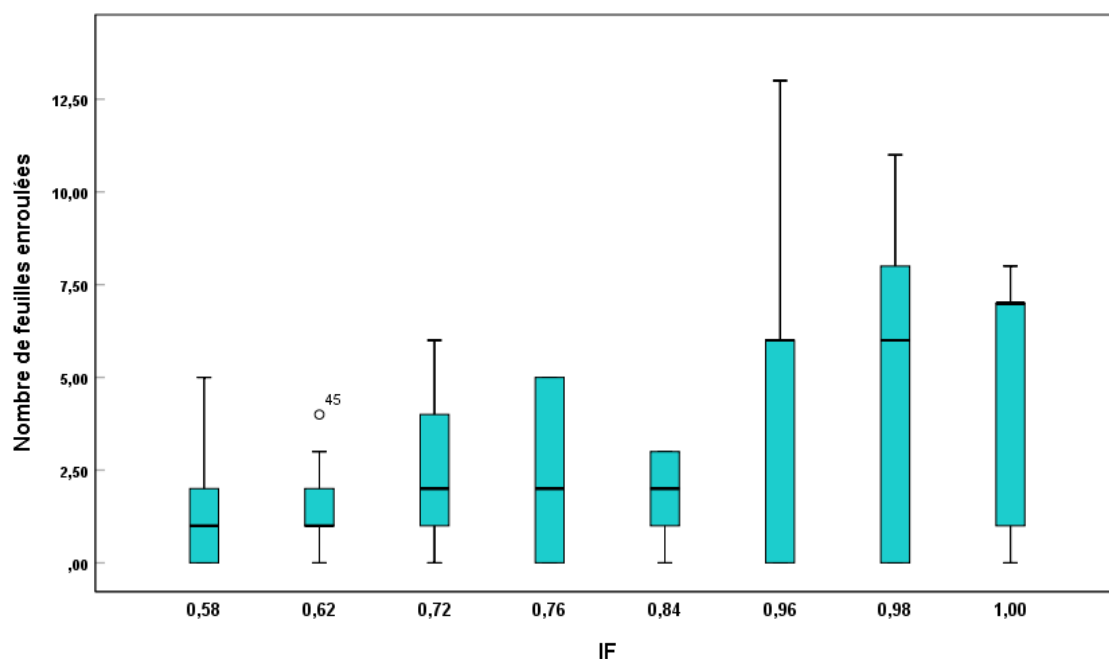


Figure 32 Distribution du nombre de feuilles enroulées de la modalité AI selon l'indice d'infestation maximale (IF) par *D. plantaginea*.

Tableau 9 Effet de l'infestation par *D. plantaginea* sur l'enroulement des feuilles par pousse feuillée du pommier Gala (moyenne $\pm$ SE)

IP	IFmax	Nm F	NmFE	Tmax EF (%)	Tmoy E F (%)
HP	0.98 $\pm$ 0.01	11.90 $\pm$ 0.32	5.28 $\pm$ 0.79	12.83 $\pm$ 0.88	9.93 $\pm$ 0.78
MP	0.77 $\pm$ 0.03	6.60 $\pm$ 0.32	2.50 $\pm$ 0.59	6.05 $\pm$ 0.74	4.75 $\pm$ 0.39
LP	0.52 $\pm$ 0.03	5.93 $\pm$ 0.32	1.70 $\pm$ 0,45	5.74 $\pm$ 0.17	3.58 $\pm$ 0.17
Moyenne	1.61 $\pm$ 0.23	8.21 $\pm$ 0.60	3.15 $\pm$ 0.61	2.52 $\pm$ 2.10	1.61 $\pm$ 0.23

IP : Intensité de la taille ; **IFmax** : Indice maximal d'infestation par le puceron cendré ; **NmF** : Nombre moyen maximal de feuilles par pousse (dernier relevé) ; **NmFE** : nombre moyen de feuilles enroulées par pousse (moyenne de 4 relevés) ; **Tmax EF** : Taux maximal d'enroulement des feuilles ; **Tmoy EF** : Taux moyen d'enroulement des feuilles.

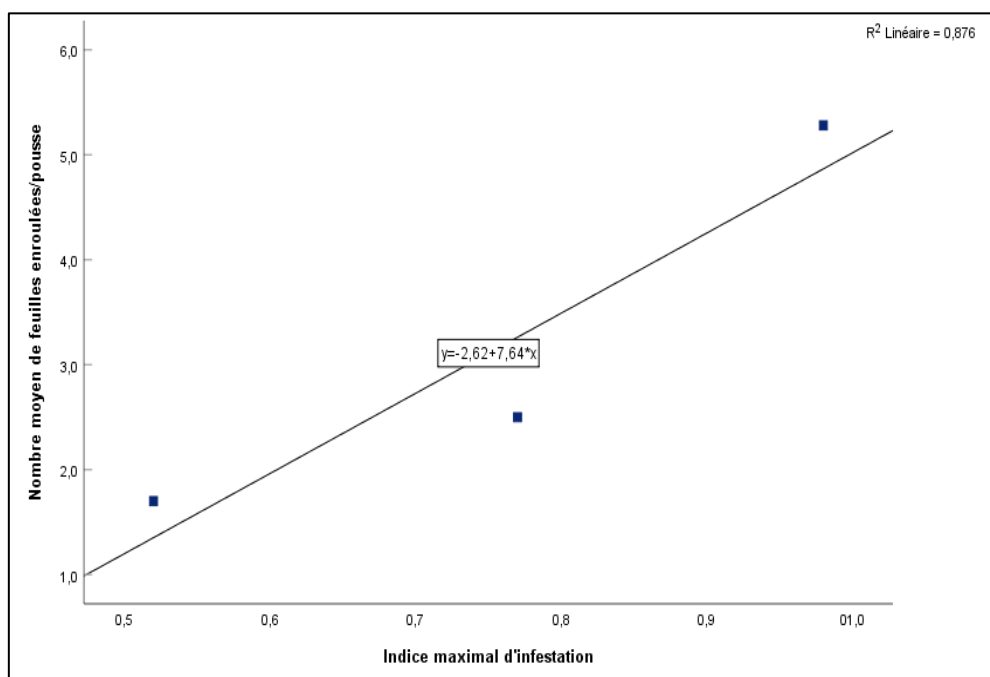


Figure 33 Régression linéaire entre le nombre moyen de feuilles enroulées par pousse et l'indice maximal d'infestation par *D. plantaginea* ($R^2 = 0.876$, $p < 0.005$).

Le nombre moyen de feuilles enroulées est corrélé à l'indice d'infestation. En effet, plus l'infestation est importante, plus le nombre de feuilles enroulées est élevé (5.28 pour HP). Les valeurs les plus faibles sont enregistrées pour les arbres les moins infestés (1.7 pour LP).

Le taux moyen (ou proportion en %), calculé pour les 4 relevés, réalisé entre les 14 et 55e jours après le début de l'infestation, varie de 9.93 à 3.58 respectivement pour le traitement HP et LP. Sans tenir compte de l'intensité de la taille, la proportion moyenne des feuilles enroulées a significativement augmenté depuis le 14e jour (5.39 %) pour atteindre son maximum au 55e jour avec 8.20 % de feuilles enroulées ($R^2 = 0.59$; $ddl = 1$, $F = 23.15$; $p = 0.013$) (Fig. 34).

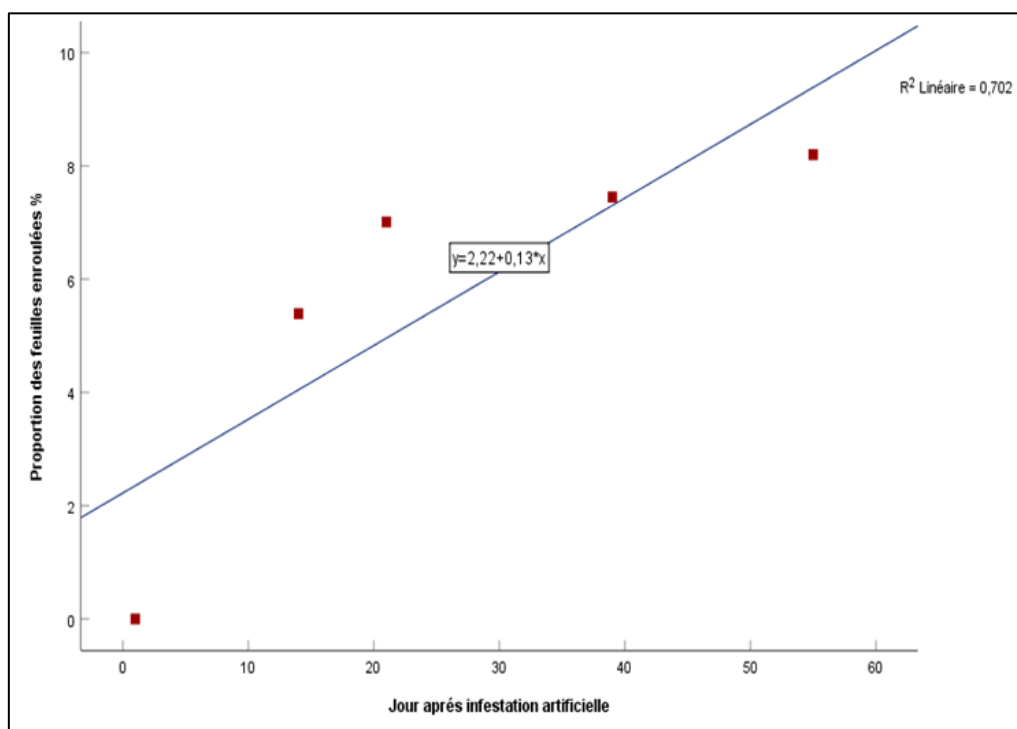


Figure 34 Variation de la proportion (%) de feuilles de pommiers enroulées suite à l'infestation par *D. plantaginea* (régression linéaire : $R^2 = 0,59$; ddl =1, $F=23,15$; $p = 0,013$).

Dans le tableau 10 sont consignés les résultats des dégâts induits par les populations aptères de *D. plantaginea*, exprimés en indice moyen suivant la classification de Rat Morris et en relation avec l'indice d'infestation et l'intensité de la taille.

En fin de saison, d'une manière générale et sans tenir compte de l'intensité de taille, les valeurs de l'indice moyen d'enroulement des feuilles étaient les plus élevées pour la classe 3, 4 et 5 avec respectivement 1.56, 1.45 et 1.56.

Les dégâts sur feuilles les plus remarquables ont été signalés pour les pousses des arbres soumis à HP et MP avec des indices respectifs de 3.33 et 0.33 pour la classe 5 et 2.33 et 2 pour la classe 4 (Fig. 35).

Tableau 10 Importance relative des dégâts sur feuilles (moyenne/pousse $\pm$ SE) selon la classification de Rat Morris, 55 jours après l'infestation artificielle par *D. plantaginea*

Classe	0	1	2	3	4	5
IP						
HP	1.20 ± 0.10^a	0.33 ± 0.33^a	$2.0 \pm 1,0^a$	2.67 ± 0.57^a	2.33 ± 0.66^a	3.33 ± 0.34^b
MP	1.90 ± 0.20^b	0 ± 0^a	1.33 ± 0.67^a	1.0 ± 0.58^a	2.00 ± 0.58^a	0.33 ± 0.33^a
LP	1.90 ± 0.10^b	1.33 ± 0.66^a	$1.33 \pm 0,33^a$	0.67 ± 0.33^a	0.33 ± 0.33^a	0 ± 0^a
Moyenne	1.67 ± 0.14	$0.56 \pm 0,29$	1.56 ± 0.29	1.45 ± 0.44	1.56 ± 0.41	1.22 ± 0.55

*Les lettres a, b, c, d et e indiquent les groupes homogènes. Les valeurs suivies d'une même lettre sont statistiquement différentes au seuil de 5 % (Test de Tuckey).

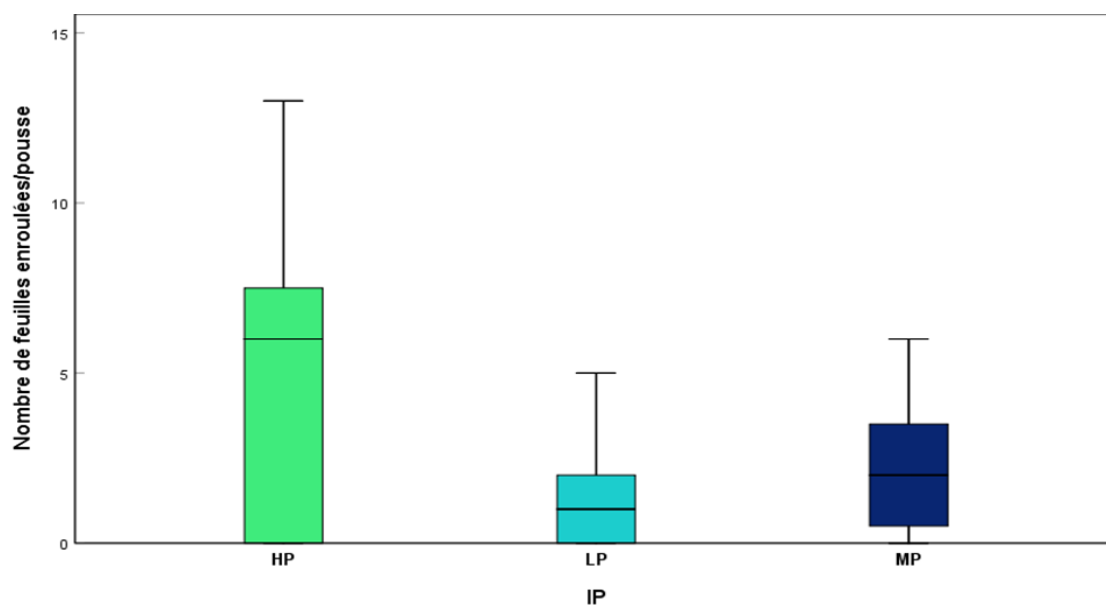


Figure 35 Nombre moyen de feuilles enroulées par pousse, de la modalité AI, selon les intensités de taille HP, MP et LP.

4.1.3. Effet de l'intensité de la taille et de l'infestation par les pucerons sur la croissance végétative

4.1.3.1. Effet de l'intensité de taille

L'intensité de la taille a affecté la croissance végétative des arbres, avec des différences observées entre les niveaux d'IP.

En effet, pour les deux traitements (AI et NAI), la longueur des pousses et le nombre de feuilles par pousse augmentent de manière significative avec le temps. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées pour les arbres soumis à HP (longueur des pousses : arbres NAI : $F_{(3.22, 91.83)} = 96.03, p < 0.05$; arbres AI : $F_{(3.14, 136.44)} = 29.45, p < 0.05$; nombre de feuilles par pousse : NAI : $F_{(4.94, 140.51)} = 22.31, p < 0.05$; AI : $F_{(4.65, 202.16)} = 7.44, p < 0.05$).

En fin de la saison, pour les traitements AI et NAI, la longueur des pousses était plus élevée pour HP et MP (HP : 22.92 – 32.18 cm, MP : 14.67–12.01 cm) que LP (10.59 – 11.71 cm), mais aucune relation notable n'a été révélée entre les deux traitements ($R^2 = 0.292, p = 0.268$). La même tendance a été observée avec le nombre moyen de feuilles par pousse : HP (10.63–17.10), MP (5.40 – 9.05) et LP (5.30 – 8.05).

Dans les deux traitements, la relation entre le nombre de feuilles par pousse et l'IP était significative (AI : $R^2 = 0.701, p < 0.0001$; NAI : $R^2 = 0.790, p < 0.0001$). Afin d'avoir une idée sur l'effet de l'intensité de la taille sur la croissance finale des pousses, en fin de saison, nous avons réalisé des droites de régression linéaire. En effet, les calculs du taux de croissance relative (RGR moyen par jour), pour chaque arbre de chaque modalité (AI et NAI), indiquent deux tendances de signification. En valeur absolue, le RGR montre une relation faible et significative avec l'IP (%) ($R^2 = 0.548 ; p = 0.034$) et non significative lorsque les valeurs de la croissance sont transformées en logarithme népérien (Ln) ($R^2 = 0.154, p = 0.147$) (Tab. 11, Fig. 36) ($R^2 = 0.174 ; p = 0.535$). Aussi, aucune corrélation n'existe entre le RGR (log népérien) et l'IP % ($p = 0.268$). Ce résultat indique probablement que la croissance des pousses n'est pas seulement liée à l'intensité de taille pratiquée, mais aussi à d'autres facteurs qu'il faudra investiguer (réserves du bois, fertilisation minérale, irrigation,...).

L'examen des diagrammes (Fig.37), illustrant les fréquences des variables RGR absolu et RGR Ln pour chaque modalité de traitement (AI : Fig 37.1 a et b ; NAI : Fig 37.2 a et b), met en évidence des valeurs du RGR Ln plus importantes pour le traitement HP-NAI (0.047 ± 0.0002) que celui de HP-AI (0.017 ± 0.0001).

Les diagrammes ont été réalisés à partir des RGR Ln de chaque pousse marquée (150 dont 90-AI et 60-NAI). Les RGR Ln moyen par jour calculé pour AI et NAI sont respectivement de 0.019 ± 0.007 et 0.04 ± 0.006 .

Tableau 11 RGR Ln et RGR Absolu (moyen/jour $\pm$ SE) des modalités de traitement AI et NAI, selon l'intensité de la taille (HP, MP et LP)

IP	Modalité	RGR Ln	RGR-absolu
HP	AI	0.017 ± 0.0001	0.27 ± 0.16
MP		0.018 ± 0.0001	0.18 ± 0.01
LP		0.022 ± 0.002	0.21 ± 0.07
Moyenne		0.019 ± 0.007	0.22 ± 0.23
ddl		89	89
<i>p</i> *		0.01	0.27
HP	NAI	0.047 ± 0.0002	0.50 ± 0.01
MP		0.033 ± 0.0003	0.09 ± 0.003
LP		0.034 ± 0.0002	0.08 ± 0.001
Moyenne		0.04 ± 0.006	0.22 ± 0.20
ddl		59	59
<i>p</i> *		$< 0,05$	$< 0,05$

*Signification ($p < 0,05$) de l'analyse de la variance (ANOVA) effectuée entre les groupes (RGR x IP).

Même si la croissance végétative est plus significative lorsque la taille est intense (HP), le fait que la croissance soit faible pour la modalité AI indique que l'infestation par *D. plantaginea* est un aspect pertinent à considérer. C'est pourquoi ce paramètre est examiné de manière plus approfondie dans la partie de notre étude qui examine l'interaction entre la taille, la croissance végétative et l'infestation.

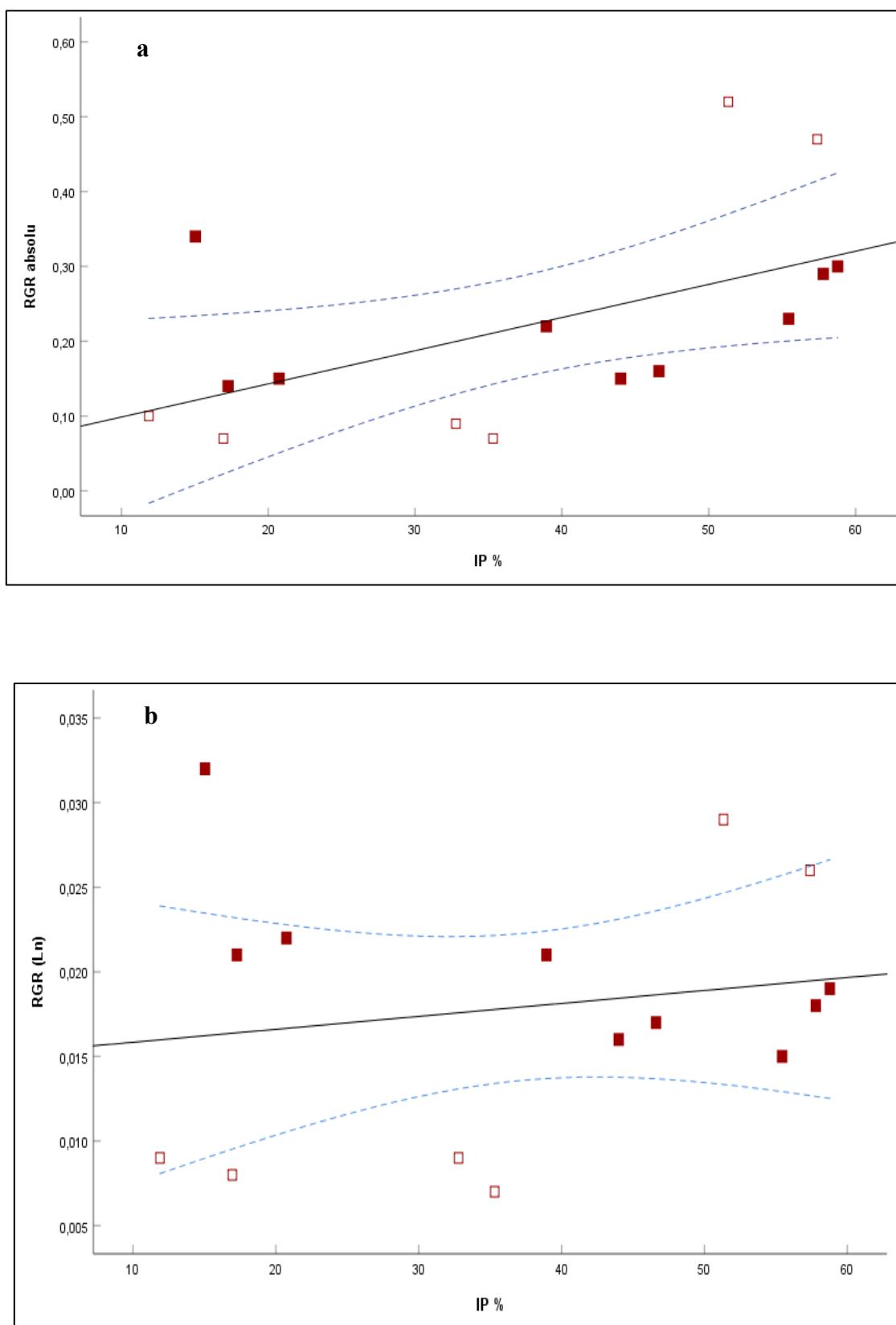


Figure 36 Régression linéaire entre le taux de croissance des pousses du pommier (RGR final) et l'intensité de taille (IP %). **(a)** : RGR absolu ; **(b)** : RGR logarithme népérien (Ln). Chaque point représente un arbre. Point plein : modalité NAI ; point vide : AI.

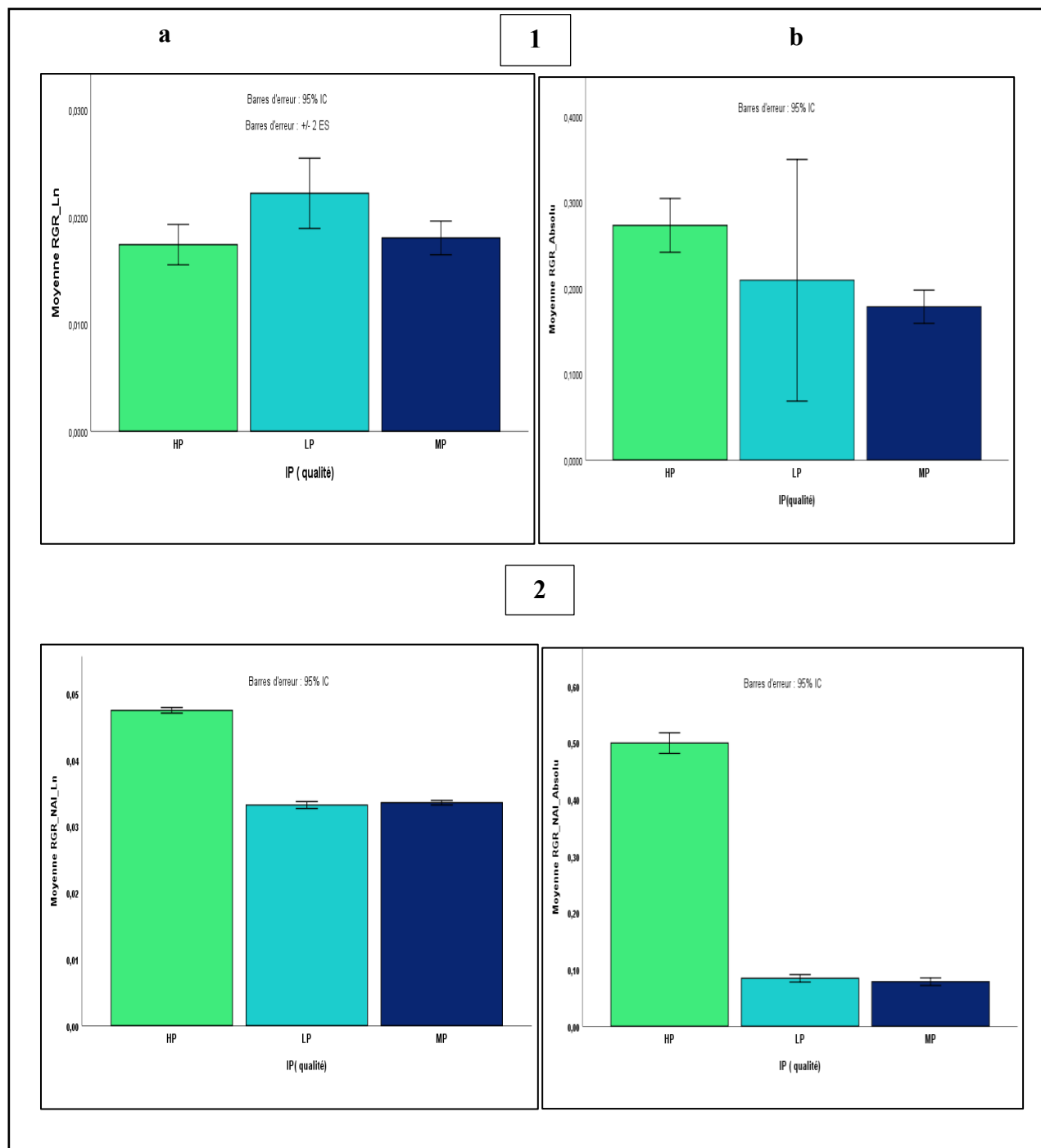


Figure 37 Diagramme des fréquences des variables de RGR Ln (a) et RGR absolu (b) selon la qualité de l'intensité de taille (HP, MP, LP) pour chacun des 9 arbres de la modalité AI (1) et NAI (2) (moyenne des 90 pousses : à raison de 10 pousses/arbres).

De même que l'analyse des fréquences des variables, l'examen de la distribution des valeurs moyennes du RGR (Ln) selon l'intensité de la taille (IP %) et la modalité de traitements (AI, NAI) met en évidence l'importance des valeurs pour le traitement HP-NAI. Cela renforce la probabilité de l'effet de l'infestation sur la croissance journalière des pousses marquées des arbres AI (Fig. 38).

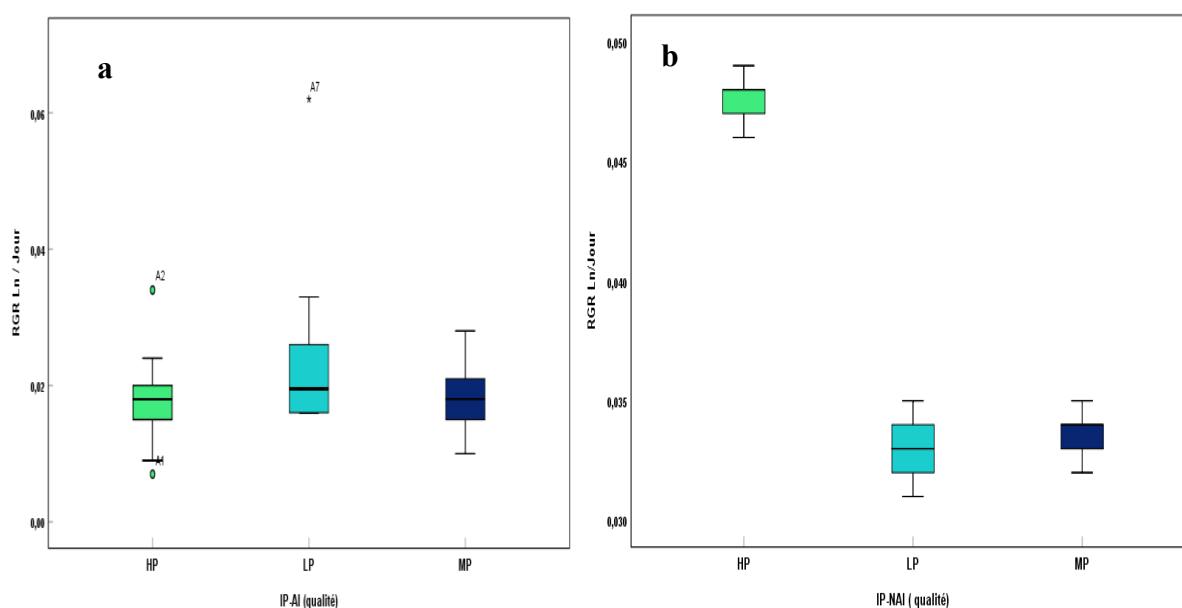


Figure 38 Boîtes à moustache comparatives de la distribution de la variable moyenne RGR Ln par jour selon l'intensité de la taille (IP %) et les modalités de traitement, (a) : AI et (b) : NAI.

4.1.3.2. Effet de l'infestation par *D. plantaginea*

L'arrêt de croissance des pousses s'est produit vers la fin juin. Durant cette période, la longueur moyenne des pousses marquées était légèrement supérieure pour la modalité NAI ($18,09 \pm 1,27$ cm) que AI ($16,06 \pm 0,62$ cm), sans différence significative entre les traitements ($t = -1,058$, $ddl = 86,55$, $p = 0,293$) (Fig.39 ; annexe, Tab. S5). Le dernier relevé des feuilles, effectué au 70ème jour, montre un nombre moyen de feuilles/pousse beaucoup plus élevé pour NAI ($11,4 \pm 0,54$) que AI ($7,11 \pm 0,32$), avec une différence significative entre les traitements ($t = -3,26$, $ddl = 106,99$, $p = 0,001$) (Fig.40. annexe, Tab. S6).

La croissance végétative finale (pousse et feuilles) de la modalité AI a ainsi été affectée par l'infestation, notamment le nombre de feuilles moyen par pousse marquée. En effet, le nombre de feuilles/pousse des arbres AI a diminué à partir du 42^e jour de l'infestation artificielle, passant de 9.29 à 7.11 feuilles/pousse, soit un taux de 30.66 % (Fig.41). Cette diminution est la conséquence de la chute prématurée des feuilles enroulées (particulièrement ceux des classes 4 et 5 pour MP et HP) causée par les niveaux élevés de l'indice d'infestation (Tab.12).

Ce sont les arbres soumis à MP qui ont enregistré le taux de chute le plus élevé avec 45.70 %, probablement dû au faible nombre de feuilles/pousse et relativement à la forte proportion de feuilles enroulées. Alors que pour la modalité NAI, le nombre moyen des feuilles s'est stabilisé à 11.4 feuilles/pousse marquée.

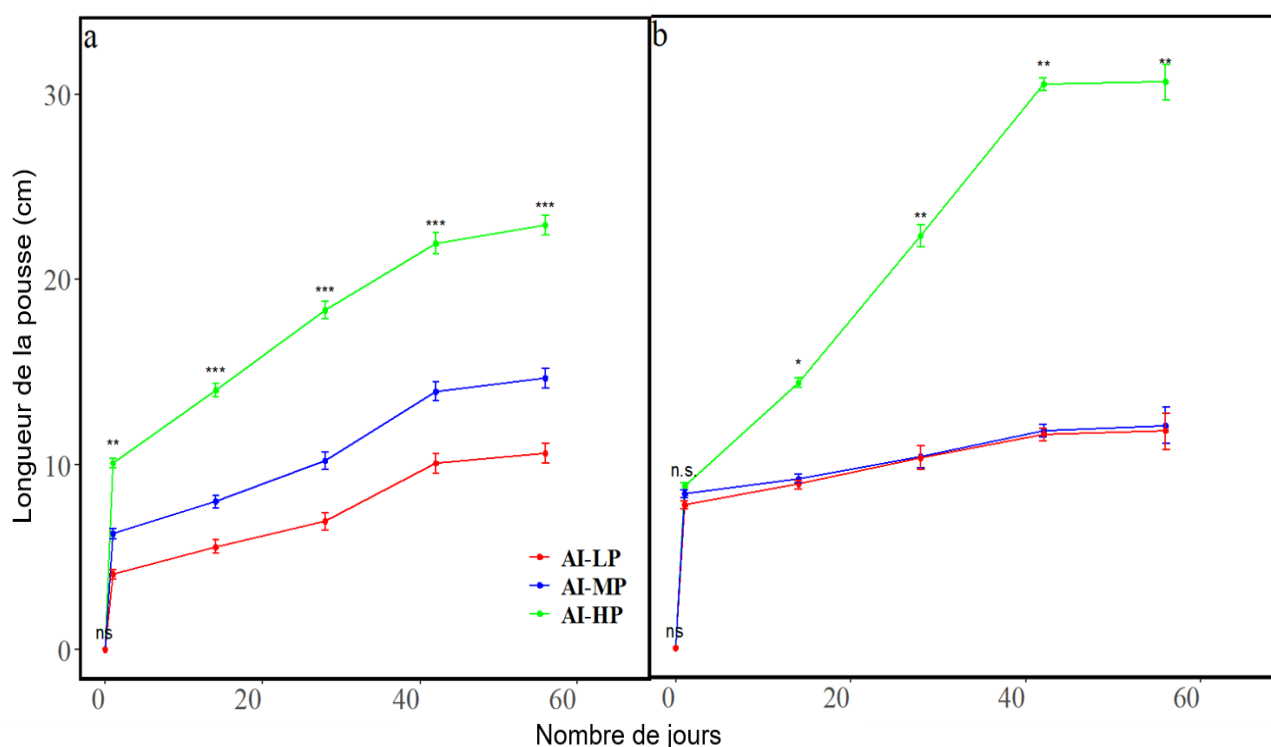


Figure 39 Evolution temporelle de la longueur moyenne des pousses (cm; moyenne $\pm$ SE) des pommiers, (a): infestés par *D. plantaginae* (AI), (b): arbres non infestés par le puceron (NAI) soumis aux différentes intensités de taille : faible (LP), moyenne (MP) et forte (HP).

Les astérisques indiquent les valeurs p du F- statistique des régressions linéaires entre la longueur des pousses et l'intensité de la taille effectuée pour chaque date d'échantillonnage sur tous les arbres ; ns, $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ et *** $p < 0,001$.

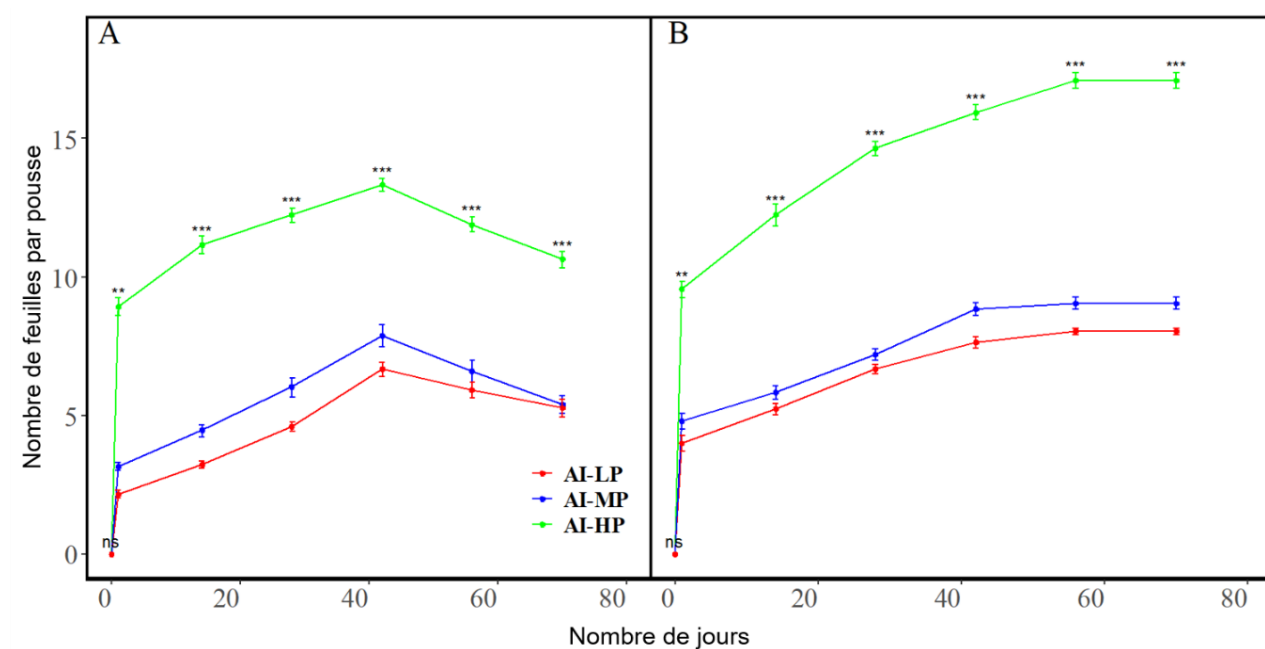


Figure 40 Evolution temporelle du nombre de feuilles par pousse (moyenne $\pm$ SE) (moyenne de 10 pousses par arbre) des pommiers.

(A) : infestés par *D. plantaginae* (AI), (B): et des arbres non infestés par le puceron (NAI) soumis aux différentes intensités de taille : faible (LP), moyenne (MP) et forte (HP).

Les astérisques indiquent les valeurs p du F- statistique des régressions linéaires entre le nombre de feuilles par pousse et l'intensité de la taille effectuée pour chaque date d'échantillonnage sur tous les arbres ; ns, $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ et *** $p < 0,001$.

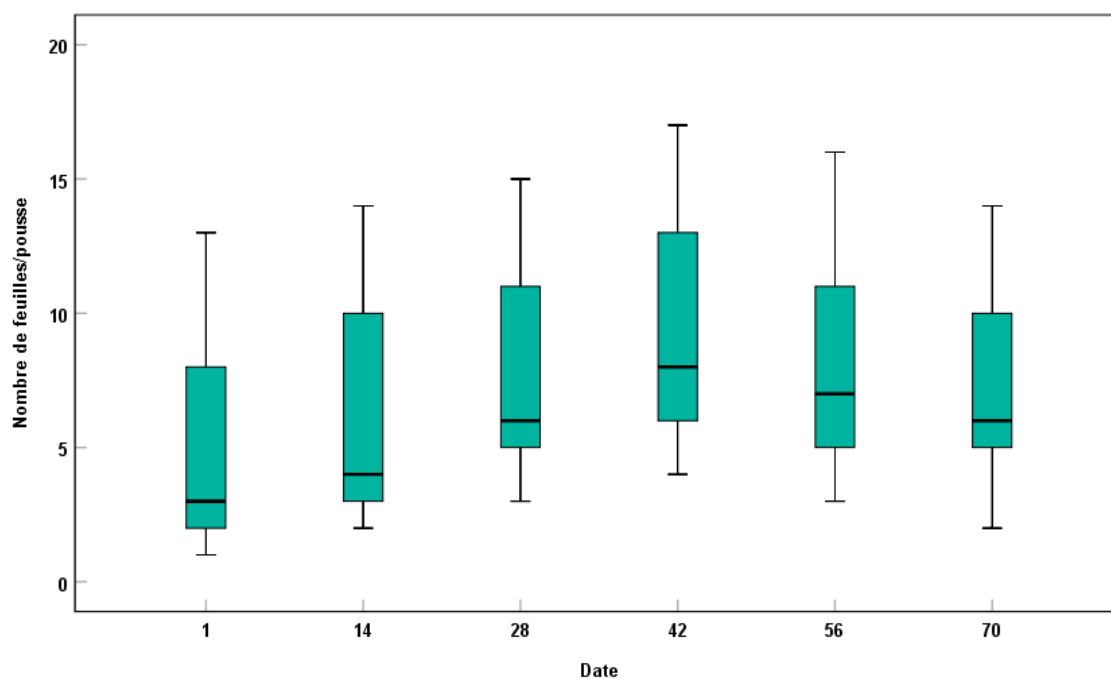


Figure 41 Evolution temporelle du nombre moyen de feuilles/pousse de la modalité AI.

Tableau 12 Effet de l'infestation par *D. plantaginea* sur le nombre de feuilles/pousse (moyen $\pm$ SE), selon l'intensité de taille, 70 jours après l'infestation artificielle

IP	Nombre de feuilles/pousse	Chute des feuilles nombre (%)*	Tmax EF (%)
HP	10.63 $\pm$ 0.31	2.70 $\pm$ 1.91 (25.40)	12.83 $\pm$ 0.88
MP	5.40 $\pm$ 0.31	2.47 $\pm$ 1.75 (47.70)	6.05 $\pm$ 0.74
LP	5.30 $\pm$ 0.31	1.37 $\pm$ 0.97 (25.84)	5.74 $\pm$ 0.17
Moyenne	7.11 $\pm$ 0.32	2.18 $\pm$ 0.71 (30.66)	8.21 $\pm$ 4.001

*le taux moyen de chute de feuilles est calculé en faisant l'écart entre le nombre de feuilles relevé au 42 et au 70^{ème} jour. TmaxEF : Taux maximal d'enroulement des feuilles.

4.1.4. Effet de l'intensité de la taille et de la croissance végétative sur la dynamique des pucerons.

L'abondance des pucerons (nombre moyen de pucerons par pousse) a augmenté avec le temps et avec IP. Elle est significativement plus élevée pour les arbres HP que MP et LP, pour toutes les dates d'échantillonnage ($F_{(3.30, 143.62)} = 51.27, p < 0.05$). Les pics d'abondance des pucerons par pousse obtenus pour chacune des intensités sont de 326.90, 146.70 et 58.87 respectivement pour HP, MP et LP (Fig.42 ; annexe, Tab. S7).

À partir du premier jour de l'infestation artificielle, la même tendance d'évolution des effectifs des pucerons est observée pour les trois types de taille. Les pics d'abondance ont été atteints lors de la 3^e et 4^e semaine puis intervient une phase de déclin. En effet, le nombre de pucerons a considérablement chuté jusqu'à atteindre des moyennes de 30.7 , 13.36 , et 5.77 pucerons/pousse respectivement pour HP, MP et LP. Aucun puceron n'a été rencontré en fin de saison vers le début du mois de juillet.

Ce qui suppose que le vol d'émigration a débuté probablement à partir de la 3^e semaine, soit 21 jours après le début de l'infestation.

Ainsi, l'on observe, d'après les résultats de l'abondance, trois phases principales : l'une croissante, ayant une durée de trois semaines, correspondant au début de l'infestation et à l'augmentation des effectifs.

Puis, une seconde phase correspondant au pic des effectifs, intervenu trois semaines après le début de l'infestation artificielle. Ces deux phases de multiplication active coïncident avec la période de pleine croissance végétative des pommiers. Enfin intervient une troisième et dernière phase correspondant à la chute des et au déclin des effectifs. Lors de cette phase, nous avons enregistré des mortalités naturelles assez importantes de pucerons en raison de l'augmentation des températures maximales ($> 33^{\circ}\text{C}$) à partir de la mi-juin. Ce paramètre sera traité dans la partie relatif effet des paramètres écologiques sur les populations de *D. plantaginea*.

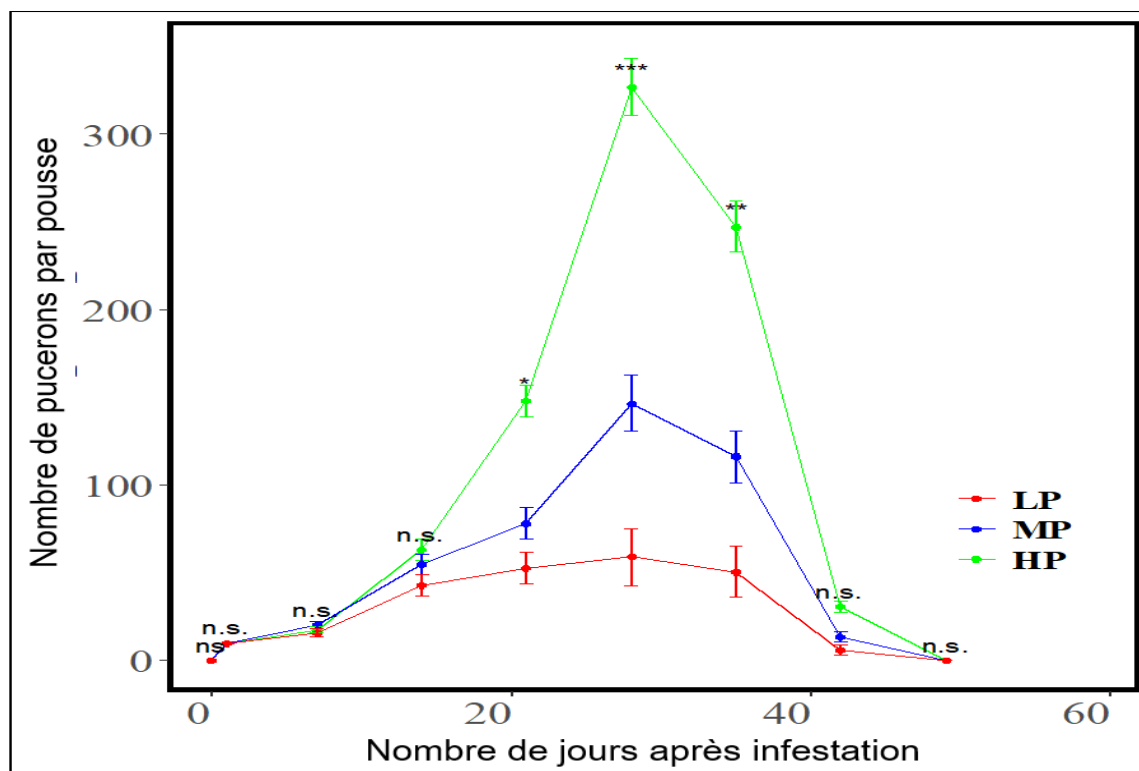


Figure 42 Evolution temporelle de l'abondance moyenne par pousse des populations de *D. plantaginea* sur les pommiers en fonction de l'intensité de taille (LP, MP et HP)

Les astérisques indiquent les valeurs p du F- statistique des régressions linéaires entre le nombre de pucerons et l'intensité de la taille, effectuées pour chaque date d'échantillonnage sur tous les arbres ; ns, $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ et *** $p < 0,001$.

Dans le tableau 13 ci-dessous sont consignés les résultats relatifs à la variation temporelle de l'indice d'infestation (IF) calculé pour la modalité AI, sous la différente intensité de taille HP, MP et LP. D'une manière générale, les valeurs de l'IF augmentent avec le temps et avec l'intensité de la taille. Les arbres soumis à une forte intensité (HP) présentent les valeurs d'IF les plus élevées, pour toutes les dates d'échantillonnage. Alors que les arbres soumis à MP et LP ont des valeurs IF moyennes. Les valeurs IF maximales sont observées durant la 4e semaine (HP : 0.98 ; MP : 0.77 ; LP : 0.55) et les plus basses ont été observées dans les arbres LP. Une relation linéaire significative a été trouvée entre les valeurs maximales des groupes IF et IP ($R^2 = 0.466$, $p = 0.043$) (Fig.43), alors qu'aucune relation linéaire significative n'a été trouvée entre l'IF et le RGR Ln ($R^2 = 0.06$, $p = 0.377$).

Tableau 13 Variation temporelle de l'indice d'infestation de *D. plantaginea* (IF moyen $\pm$ SE) de la modalité AI selon les intensités de taille (HP, MP, LP)

Jour après l'infestation artificielle	HP	MP	LP
1	0.40 $\pm$ 0	0.40 $\pm$ 0	0.40 $\pm$ 0
7	0.51 $\pm$ 0.024**	0.47 $\pm$ 0.024**	0.37 $\pm$ 0.037**
14	0.72 $\pm$ 0.031**	0.64 $\pm$ 0.053**	0.51 $\pm$ 0.071**
21	0.89 $\pm$ 0.071***	0.72 $\pm$ 0.012***	0.52 $\pm$ 0.081***
28	0.98 $\pm$ 0.01**	0.77 $\pm$ 0.03**	0.55 $\pm$ 0.03**
35	0.97 $\pm$ 0.018***	0.75 $\pm$ 0.029***	0.43 $\pm$ 0.079***
42	0.48 $\pm$ 0.060*	0.34 $\pm$ 0.02*	0.16 $\pm$ 0.081*
48	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0

Les astérisques représentent les valeurs p des régressions linéaires effectuées entre les valeurs de l'indice d'infestation et celles de l'intensité de la taille, réalisées pour chaque date d'échantillonnage ; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, and *** $p < 0.001$ (Test de Tuckey).

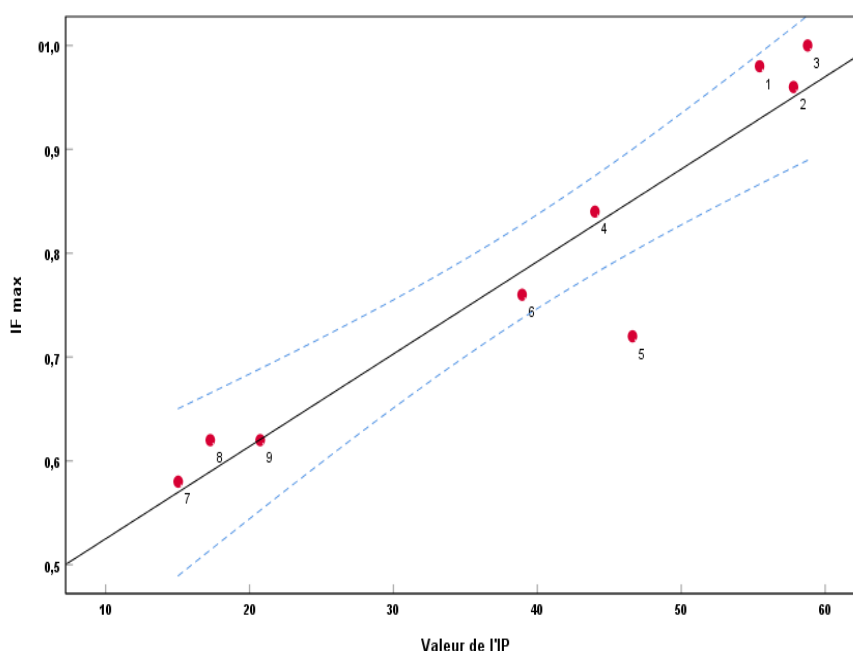


Figure 43 Régression linéaire entre l'indice d'infestation maximal (IF) et les valeurs de l'intensité de taille

($R^2 = 0,466$, $p = 0,043$). Chaque point représente un arbre de la modalité AI. Les lignes en discontinues représente les lignes de l'intervalle de confiance à 95%.

4.1.5. Effet de l'intensité de la taille et de l'infestation par les pucerons sur le rendement en fruits

Les résultats présentés dans le Tableau 14 ci-dessous révèlent que la taille, le poids et le rendement des fruits dépendaient de l'IP et de l'IF. Le diamètre des fruits (DF; mm) et le poids des fruits frais (PF; g) mesurés pour chaque arbre ont diminué de manière significative avec l'augmentation de l'IP (PF : $t = 85.05$, $ddl = 299$, $p < 0.05$; DF : $t = 88.30$, $ddl = 299$, $p < 0.05$) et l'augmentation de l'IF (PF : $t = 51.16$, $ddl = 299$, $p < 0.05$; DF : $t = 13.12$, $ddl = 299$, $p < 0.05$). Les paramètres de croissance des fruits ont été réduits par l'infestation (modalité AI), et par conséquent, le rendement par arbre a également réduit.

Il y avait une relation positive entre le poids frais (FW) et la charge en fruits (FL) ($R^2 = 0.602$, $ddl = 1$, $p = 0.001$). FL par arbre a été réduite avec l'augmentation de l'IP, et FW et FD étaient positivement corrélées avec FL et IP (FL : $R^2 = 0.696$, $ddl = 2$, $p = 0.001$; IP : $R^2 = 0.810$, $ddl = 2$, $p < 0.05$). (Fig. 5). Néanmoins, FL était faiblement liée à l'IF ($R^2 = 0.330$, $p = 0.025$), tandis que la FW et la FD n'étaient pas significativement affectées par l'infestation de pucerons (FW : $R^2 = 0.137$, $p = 0.174$; FD : $R^2 = 0.115$, $p = 0.174$).

Indépendamment de l'infestation par les pucerons, l'indice de forme des fruits (rapport du poids frais au diamètre frais calculé pour chaque fruit échantillonné) était légèrement plus élevé dans les arbres soumis à HP (3.59 ± 1.49) que dans les autres groupes IP (MP : 3.37 ± 0.04 ; LP : 3.32 ± 0.07). Cet indice était assez similaire pour les traitements IA et NAI. Le rendement en fruits (FL x FW) était plus élevé dans les arbres NAI (26.63 kg/arbre) que dans les arbres AI (17.29 kg/arbre).

L'infestation de pucerons a réduit le rendement fruitier par arbre de 35.07 %, mais sans signification statistique ($t = 0.875$, $ddl = 7.931$, $p = 0.208$). En revanche, le rendement des fruits était négativement corrélé avec l'IP ($r = -0.920$, $p < 0.01$) et l'IF ($r = -0.543$, $p = 0.03$). Ce résultat indique qu'une diminution de l'IP et de l'IF augmenterait le rendement des fruits.

Tableau 14 Moyennes ($\pm$ SE) de : FL, FD, FW/FD et production/arbre des modalités infestée (AI) et non infestée (NAI)

Traitement IP groupe	FL	FW (g)	FD (mm)	FW/FD (g/mm)	Fruit (production/arbre) (kg) (FL×FW)
AI- HP	51.67 $\pm$ 1.76	151.43 $\pm$ 25.76	45.95 $\pm$ 7.49	3.49 $\pm$ 0.78	7.75 $\pm$ 1.10
AI-MP	79.67 $\pm$ 0.88	183.62 $\pm$ 2.21	55.9 $\pm$ 0.45	3.28 $\pm$ 0.05	14.63 $\pm$ 0.30
AI-LP	141.33 $\pm$ 1.20	208.48 $\pm$ 7.54	61.73 $\pm$ 1.42	3.38 $\pm$ 0.18	29.48 $\pm$ 1.28
Moyenne-AI	90.89 $\pm$ 13.26	181.18 $\pm$ 11.34	54.53 $\pm$ 3.19	3.38 $\pm$ 0.23	17.29 $\pm$ 3.24
NAI-HP	82.00 $\pm$ 6.0	163.18 $\pm$ 36.92	49.73 $\pm$ 10.33	3.59 $\pm$ 1.49	13.16 $\pm$ 2.05
NAI-MP	110.00 $\pm$ 1.0	199.75 $\pm$ 0.30	59.25 $\pm$ 0.60	3.37 $\pm$ 0.04	21.97 $\pm$ 2.05
NAI-LP	205.50 $\pm$ 0.5	217.88 $\pm$ 0.03	65.60 $\pm$ 1.40	3.32 $\pm$ 0.07	44.77 $\pm$ 1.64
Moyenne-NAI	132.50 $\pm$ 23.77	193.6 $\pm$ 13.94	58.19 $\pm$ 3.97	3.42 $\pm$ 0.39	26.63 $\pm$ 5.99
(R²) Valeur p ^a					
Traitement ^b	(0.330) 0.025	(0.137) 0.174	(0.125) 0.174	(0.001) 0.906	(0.296) 0.036
IP groupe ^c	(0.835) $P < 0.05$	(0.588) 0.001	(0.458) 0.006	(0.004) 0.989	(0.873) $P < 0.05$

- ^a valeur p pour les variables dans les modèles de régression à $p < 0.05$. ^b Traitement (AI and NAI).

^c IP groupe (Indépendamment de l'infestation).

Un modèle de régression linéaire a été ajusté pour prédire le rendement des pommiers (variable dépendante) en fonction de l'IP et de l'IF (comme variables indépendantes). L'équation suivante décrit le modèle de prédiction du rendement en fruits :

$$Y = a - (b \times IP) - (c \times IF)$$

Où : Y est la valeur prédite du rendement des fruits, $a = 47.239 \pm 0.63$, $b = 0.573 \pm 0.016$, $c = 13.398 \pm 0.935$, IP = valeur d'intensité de taille et IF = valeur de l'indice d'infestation par les pucerons.

Ce modèle de régression a été choisi, car il offre le meilleur ajustement. Le rendement des fruits était significativement prédit par IF et IP ($F_{(2,297)} = 1045.148$, $p < 0.001$), et le $R^2 = 0.876$ indique que le modèle explique 87.6 % de la variance dans Y .

Ce modèle peut être utile pour prédire la performance des rendements pendant la saison de croissance. Cependant, pour prendre des décisions de gestion, le modèle de rendement proposé peut être amélioré à l'avenir en tenant compte d'études pluriannuelles et en incluant des données supplémentaires (par exemple, les pratiques de gestion, d'autres ravageurs et maladies des pommes).

4.2. Effet de la fertilisation azotée (N) sur le système « pommier-*D.plantaginea* »

4.2.1. Effet du traitement N sur la croissance végétative

D'une manière générale, les paramètres de croissance végétative des pommiers ont significativement été affectés par le traitement N. Pour la modalité AI, le traitement azote a eu un effet significatif sur la croissance des pousses ($F_{(8,52)} = 6.43$; $p < 0.005$). Pour les deux modalités de traitements (AI et NAI), la croissance relative des pousses par jour s'est extrêmement ralentie à partir de la troisième semaine de l'expérimentation, notamment pour la dose 0 % N. Le RGR Ln par jour augmentait avec les doses croissantes de N, il était le plus élevé pour la dose intermédiaire 75% N, avec respectivement 0.008 et 0.018 pour la modalité AI (infesté) (Fig.44) et NAI (Fig.45). Les valeurs du RGR Ln montrent que l'infestation a affecté la croissance des pousses.

L'examen des résultats du taux de croissance absolu final montre un accroissement significatif linéaire ($p = 0.001$) relatif des pousses plus important pour le traitement 75 % N avec un taux relatif (LRP %) de 17.80 % contre 10.48 % pour 0 % N (Tab.15). Tandis que pour la dose de confort (100 % N), un taux de 12.24 % a été obtenu, soit inférieur à celui du traitement 75 % N.

Le traitement N n'a eu aucun effet significatif sur le nombre moyen de feuilles/pousses, dans le temps, à l'exception du dernier relevé (25 juin) ($p = 0.014$) (Tab.16, Fig. 46). Pour le dernier relevé, le nombre moyen de feuilles/pousse est beaucoup plus important pour la dose 75 % N que pour les autres doses, avec une moyenne de 14.25 et 14.50 respectivement pour AI et NAI. À l'inverse de la croissance finale des pousses (AI : $p = 0.315$; NAI : $p = 0.767$), le nombre de feuilles/pousse est fortement corrélé avec le traitement N ($ddl = 7$: AI : $r = 0.579$; $p = 0.002$ – NAI : $r = 0.381$; $p = 0.016$). Le traitement N n'a eu aucun effet significatif sur le diamètre moyen final du tronc pour les deux modalités (AI : $F = 2.036$, $ddl = 8.629$; $p = 0.067$; NAI : $F = 0.664$; $ddl = 4$; $p = 0.761$) (Fig. 47, annexe Tab.S8).

Tableau 15 Evolution temporelle de l'accroissement des pousses (moyenne $\pm$ SD, mm), RGR Ln et LPR % pour la modalité AI.

N %	100	75	50	0
Date				
1-juin	70.59 $\pm$ 17.53	24.79 $\pm$ 9.30	30.82 $\pm$ 15.69	34.46 $\pm$ 5.35
13- juin	77.20 $\pm$ 17.86	28.72 $\pm$ 9,76	34.22 $\pm$ 15.91	37.34 $\pm$ 5.30
25-juin	80.43 $\pm$ 17.68	30.16 $\pm$ 9.49	35.29 $\pm$ 15.72	38.50 $\pm$ 5.31
RGR Ln	0.0054 $\pm$ 0.004	0.008 $\pm$ 0.005	0.0056 $\pm$ 0,005	0.0046 $\pm$ 0.002
LPR %	12.24 $\pm$ 8.56	17.80 $\pm$ 9.14	12.65 $\pm$ 9.65	10.48 $\pm$ 4.10

*Modèle linéaire général (GLM) à mesures répétées. ** Valeur significative; Tukey test ($p = 0,05$). LPR = longueur des pousses relatives (%). Seules les dates des relevés pertinents ont été présentées dans le tableau.

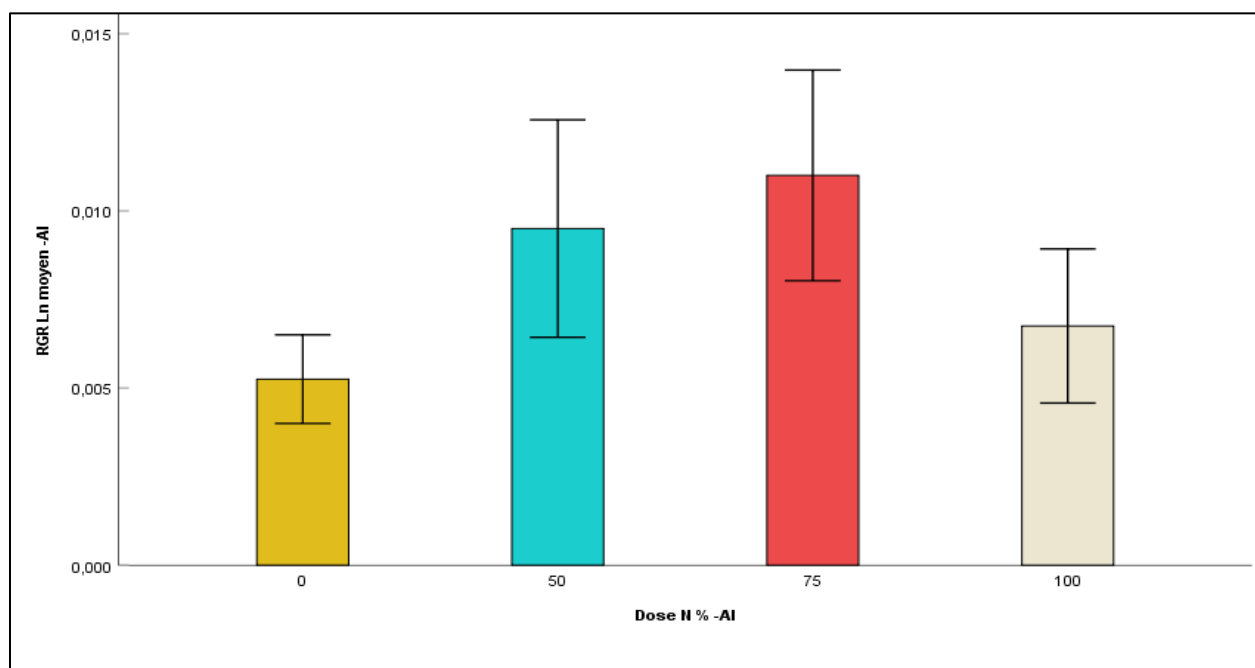


Figure 44 Effet du traitement N sur la croissance relative des pousses par jour (RGR Ln moyen final) pour la modalité AI.

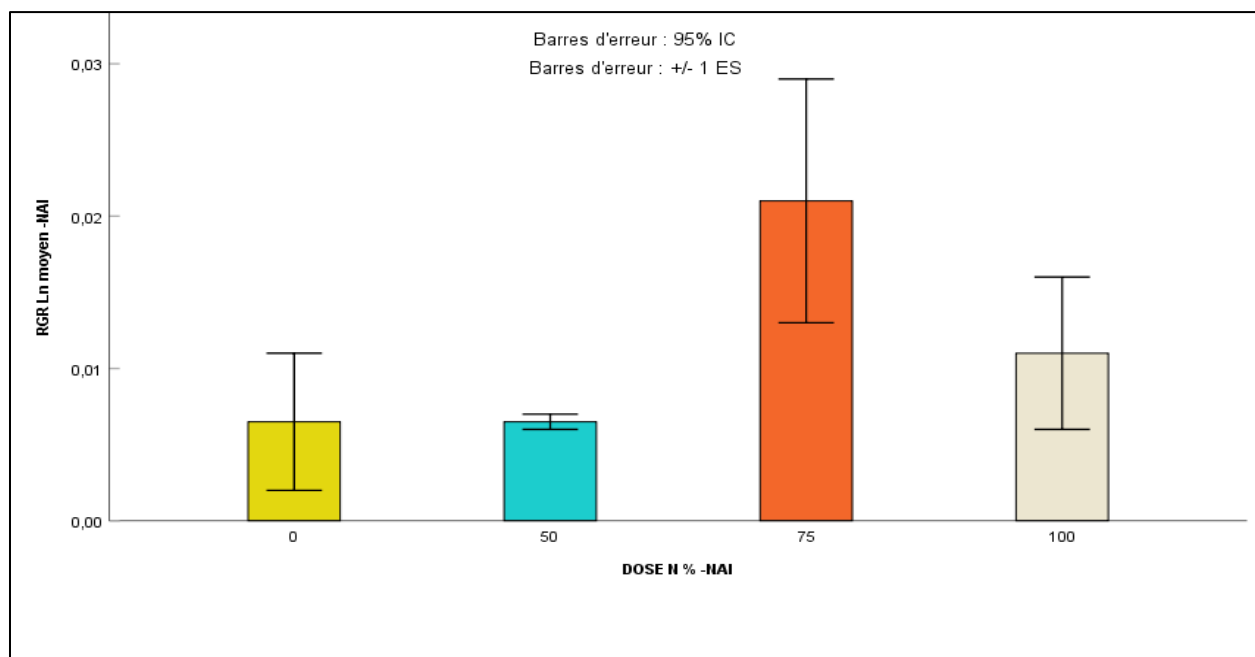


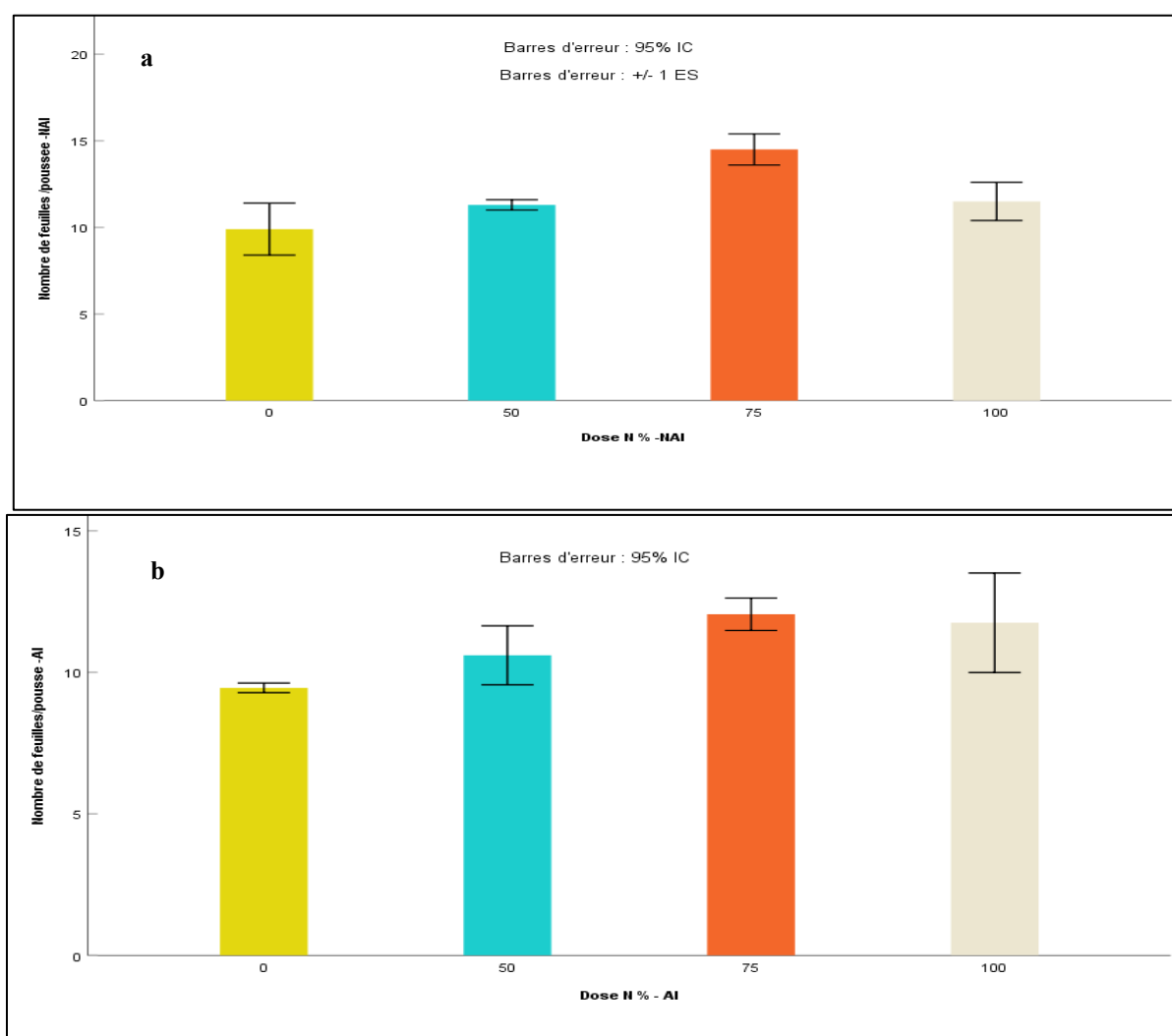
Figure 45 Effet du traitement N sur la croissance relative des pousses par jour (RGR Ln moyen final) pour la modalité saine NAI.

Tableau 16 Evolution temporelle du nombre de feuilles par pousse (moyenne $\pm$ SE), pour la modalité AI

Jour	100	75	50	0	ddl	F	$P (\leq 0,05)^*$
1-juin	11.00 $\pm$ 2.38	10.25 $\pm$ 1.31	9.50 $\pm$ 1.19	8.25 $\pm$ 0.48	3	0.68	0.62
13-juin	11.50 $\pm$ 1,89	11.5 $\pm$ 0.49	10.25 $\pm$ 1.38	9.75 $\pm$ 0.25	3	0.64	0.60
25-juin	12.50 $\pm$ 1,19	14.25 $\pm$ 0.49	11.50 $\pm$ 0.64	10.25 $\pm$ 0.25	3	5.37	0.014**

*modèle linéaire général (GLM) à mesures répétées. ** Valeur significative; Tukey test ($p = 0.05$).

Seules les dates des relevés pertinents ont été présentées dans le tableau.

**Figure 46** Nombre de feuilles/pousse (moyenne $\pm$ SE) des modalités AI (a) et NAI (b) en fonction du traitement N.

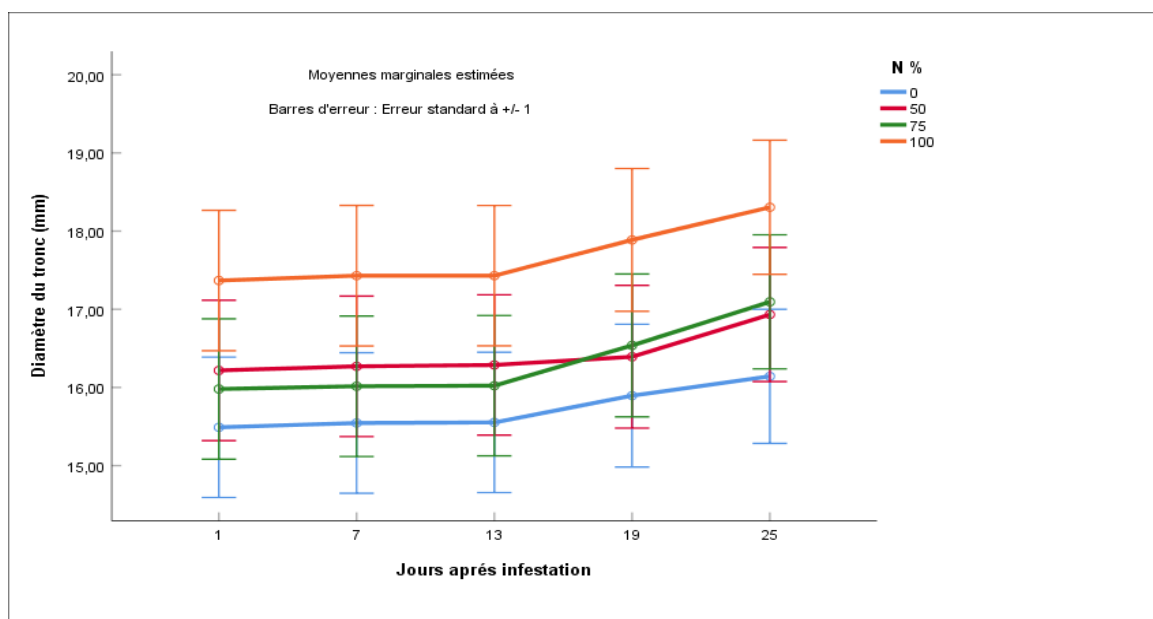


Figure 47 Effet temporel du traitement N sur l'accroissement du tronc des pommiers (moyennes marginales du diamètre du tronc (moyenne mm $\pm$ SE) (modalité AI).

4.2.2. Effet du traitement N sur la réponse des pucerons

Le traitement N a eu un effet significatif sur la dynamique des pucerons ($F = 4.59$, $ddl = 12.01$, $p < 0.005$) (Tab.17, Fig.48). L'accroissement numérique des pucerons dans le temps suit une relation polynomiale significative non linéaire (linéaire $p = 0.093$; cubique $p = 0.022$). Le traitement N a significativement affecté la dynamique des effectifs de pucerons à partir du 13^e jour après l'infestation artificielle ($t = 3.136$, $ddl = 15$, $p = 0.003$) avant d'observer une chute des effectifs à partir du 25^e jour.

Les résultats montrent que le nombre moyen de pucerons était nettement plus élevé pour les traitements à 100 % et 75 %, avec respectivement 62.04 et 54.21 pucerons par pousse. En revanche, pour les traitements à 50% et 0%, la moyenne de l'abondance était plus faible, avec respectivement 48.92 et 35.67 pucerons par pousse. De plus, une corrélation positive et significative a été observée entre l'abondance des pucerons et le nombre de feuilles par pousse ($r = 0.269$; $p < 0.05$).

L'examen de la figure 49 qui illustre l'évolution temporelle de l'indice d'infestation (IF moyen/feuille) de *D. plantaginea*, calculée pour chaque date d'échantillonnage, révèle deux périodes distinctes.

La première période, de croissance, s'étend du premier jour de l'infestation artificielle jusqu'au 25^e jour, avec une occurrence maximale observée le 19^e et le 25^e jour. Pendant cette période, l'IF varie entre 0.80 et 0.95, en fonction des doses de N. La deuxième période, de décroissance, commence au 25^e jour, avec un IF variant de 0.55 pour les doses 100% et 75% de N, et de 0.50 pour les doses 50 et 0 % N. La baisse importante de l'indice d'infestation observée dans la deuxième période peut principalement être attribuée à des taux de mortalité importants constatés lors du dernier relevé (28^e jour). Cette situation a été provoquée par une augmentation de la température à l'intérieur de la serre, qui était due à une défaillance technique.

Tableau 17 Effet du traitement de N sur l'évolution temporelle des effectifs de *D.plantaginea*

N %	0	50	75	100	ddl	F*	p**
Jour							
1	2 ± 0	2 ± 0	2 ± 0	2 ± 0	3		
7	9.00 ± 4.97	04.50 ± 2.64	4.00 ± 0.58	4.25 ± 1.15	3	2.58	0.102
13	35.75 ± 7.27	63.75 ± 19.39	73.25 ± 19.70	61.00 ± 53.35	3	1.213	0.347
19	63.50 ± 7.76	95.50 ± 10.47	81.25 ± 17.90	122.00 ± 14.08	3	8.126	0.003**
25	79.00 ± 14.37	100.75 ± 19.51	139.00 ± 7.00	154.75 ± 31.39	3	3.392	0.054**
28	24.75 ± 10.99	27.00 ± 10.80	25.75 ± 4.36	28.25 ± 4.36	3	0.106	0.955

*Model linéaire générale (GLM) à mesures répétées. * Valeur significative; Tukey test ($p = 0.05$).

Effectif moyen de pucerons par pousse (± SD).

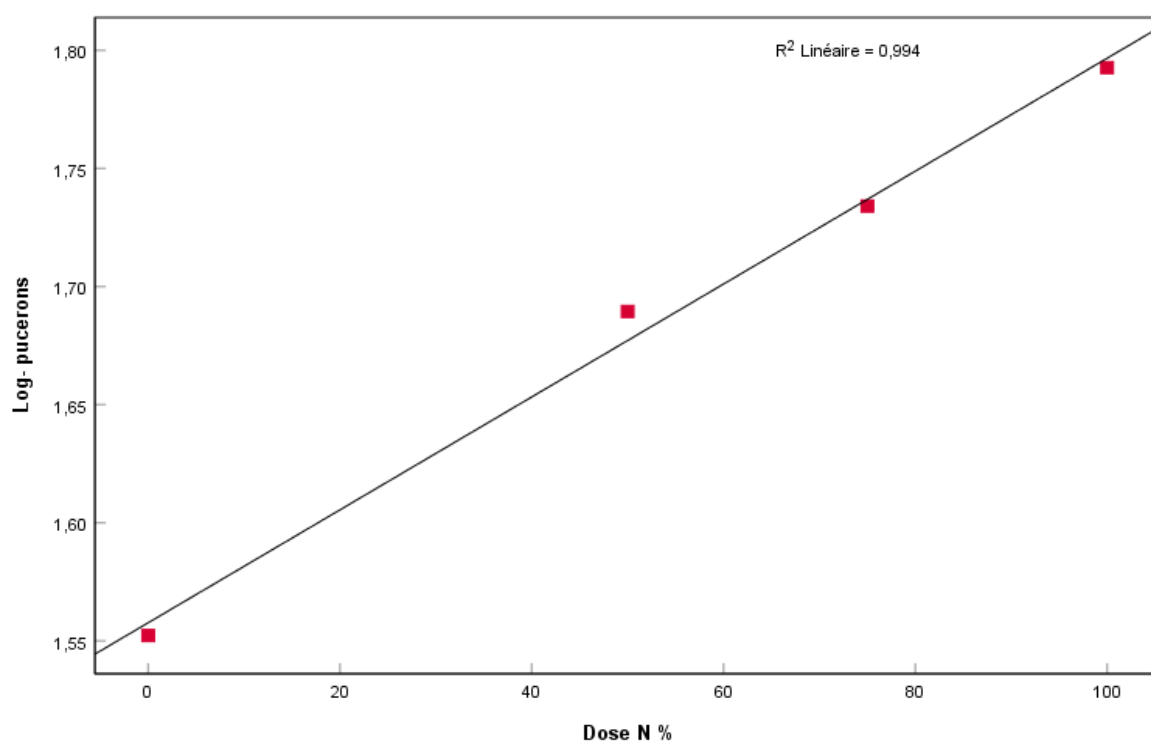


Figure 48 Relation entre les effectifs de *D. plantaginea* (variable transformé en logarithme) et les différentes doses du traitement N (régression linéaire ; $R^2 = 0.994$; $p > 0.05$).

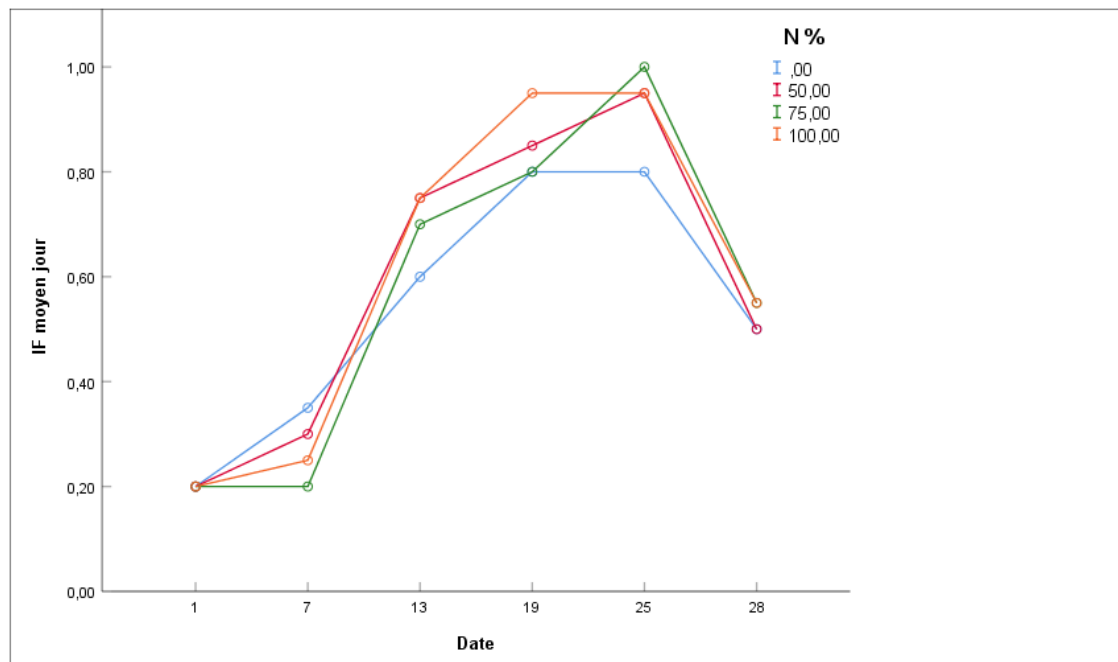


Figure 49 Variation temporelle de l'indice d'infestation (IF) de *D. plantaginea* en fonction du traitement N (0, 50, 75 et 100 %).

4.2.3. Effet du traitement N sur les interactions « pucerons - croissance végétative »

La figure 50 illustre les relations entre les populations de pucerons et deux variables de croissance végétale : la longueur des pousses et le nombre de feuilles, ainsi que le diamètre du tronc. L'analyse des résultats révèle une relation polynomiale significative du troisième ordre entre le nombre de pucerons et le nombre de feuilles par pousse ($R^2 = 0.607$, $F = 3.457$, $p = 0.05$). Cependant, cette relation n'est pas significative pour l'accroissement final des pousses ($R^2 = 0.589$, $F = 3.457$, $p = 0.063$) et le diamètre du tronc ($R^2 = 0.430$, $F = 1.472$, $p = 0.265$).

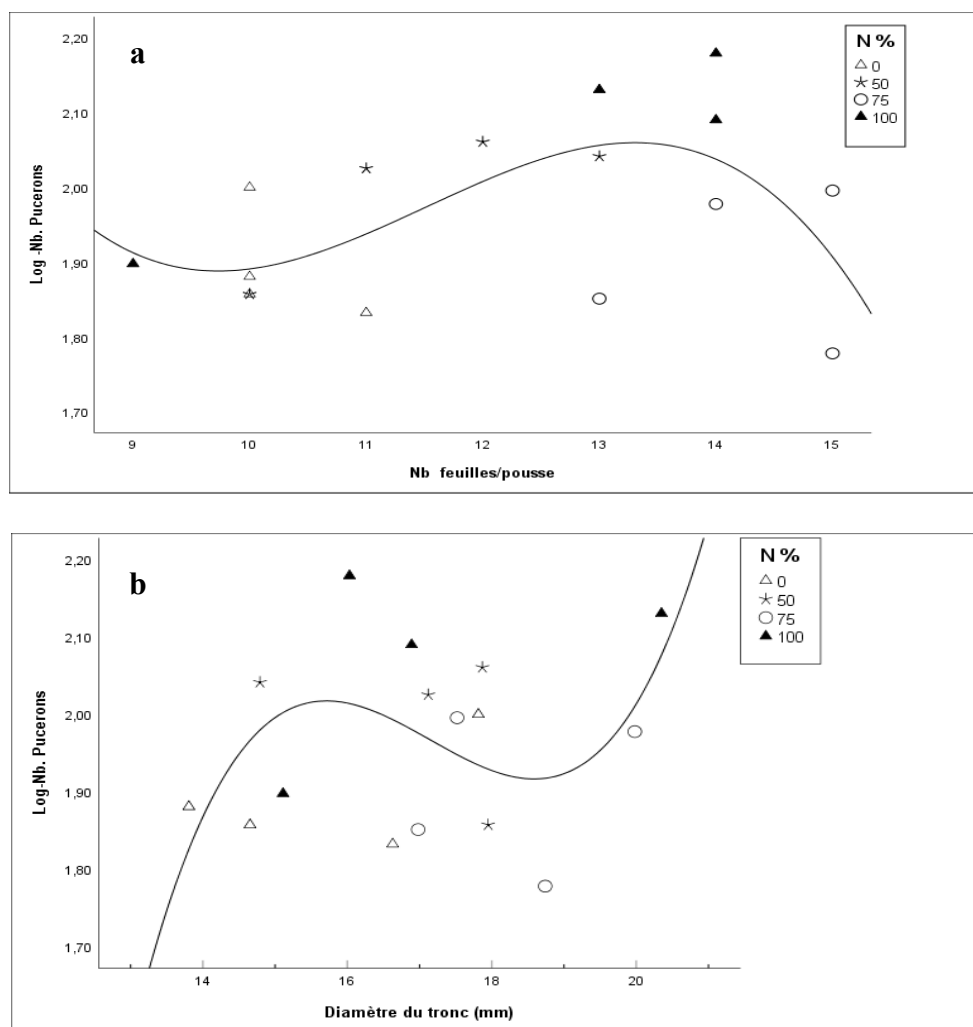


Figure 50 Effet du traitement N sur l'interaction « *D. plantaginea* – croissance végétative »

(nombre de pucerons ($\log_{10}$) selon les différentes doses de N (0%, 50%, 75%, 100%) en relation avec : le nombre de feuilles par pousse (a) la longueur de la pousse (mm) (b) et (c) le diamètre du tronc. Chaque point représente une répétition. La courbe représente la régression polynomiale (ordre 3) effectuée avec les données du dernier relevé (25 juin) (longueur de la pousse, nombre de pucerons et diamètre du tronc).

4.3. Effet de la température sur les interactions « pommier -*D. plantaginea* »

Parmi les facteurs abiotiques, la température joue un rôle essentiel dans la phénologie du pommier, la croissance et la mortalité des pucerons. Cette étude, réalisée en 2019 dans une parcelle expérimentale de pommiers, vise à vérifier si la dynamique de *D. plantaginea* et la croissance végétative saisonnière du pommier "Gala" sont temporellement liées aux températures ambiantes. Pour ce faire, nous avons d'abord évalué le taux de mortalité temporelle des pucerons.

Ensuite, nous avons utilisé des modèles pour développer des outils de prédiction des populations de pucerons et de la croissance des pousses végétatives en fonction du temps. En agroécologie, la modélisation consiste à créer une représentation simplifiée d'un phénomène (dynamique des pucerons, croissance végétative) afin de prédire son évolution et de fournir un outil d'aide à la décision (OAD) aux arboriculteurs. Elle est utilisée pour traiter des questions liées aux dynamiques d'interactions des populations d'insectes avec leur environnement.

Pour la réalisation de différents modèles de prédiction, nous avons créé une base de données comprenant des données quotidiennes telles que les températures (minimale, maximale et moyenne) (annexe, Tab. S9), les relevés hebdomadaires de la croissance végétative ainsi que la dynamique des effectifs des pucerons.

4.3.1. Effet des températures sur les populations

Bien que la croissance des pucerons soit influencée par une combinaison de plusieurs facteurs abiotiques (températures, humidité et pluviométrie), la température maximale est toujours un facteur déterminant de sa dynamique et de sa survie. C'est pourquoi plusieurs auteurs considèrent cette température comme le principal prédicteur de l'abondance des pucerons. Elle est utilisée pour développer des modèles décrivant, entre autres, la dynamique temporelle des populations, y compris le taux d'accroissement intrinsèque (taux d'accroissement infinitésimal = r).

4.3.1.1. Taux d'accroissement intrinsèque

Le taux intrinsèque d'accroissement naturel est un paramètre fondamental en écologie. Il permet de mesurer et de prédire le potentiel de multiplication des populations animales.

Dans un environnement naturel, la croissance d'une population animale est exponentielle et peut être exprimée par la formule suivante :

$$N(t) = N_0 e^{rt}$$

où $N(t)$ est le nombre de pucerons au temps t , N_0 est le nombre initial de pucerons, e est la base du logarithme népérien et r est le taux intrinsèque d'accroissement naturel.

Ainsi, dans une population qui augmente exponentiellement, s'il y a N_t individus au temps t puis dans une unité de temps plus tard, le rapport $\frac{N_{t+1}}{N_t} = e^r$ est égal à l'antilog_e $r = \lambda$.

Le taux d'accroissement fini (λ) correspond au taux naturel antilogarithme du taux intrinsèque d'accroissement (Birch, 1948). Pour les besoins de calcul du r , $N(t)$ journalier des pucerons a été estimé grâce à un modèle de prédiction polynomial d'ordre 5. Une comparaison est ensuite effectuée entre le $N(t)$ calculé et le $N(t)$ estimé par le modèle.

L'examen de la figure 51 ci-dessous révèle une évolution temporelle significative du taux intrinsèque d'accroissement naturel ($R^2 = 0.607$, $F=11.96$, $p = 0.00008$) et du taux d'accroissement fini ($R^2 = 0.603$, $F=11.72$, $p = 0.00009$). Les valeurs moyennes (de tous les relevés) respectives calculées pour r et λ sont de 0.52 ± 0.007 et 1.05 ± 0.008 .

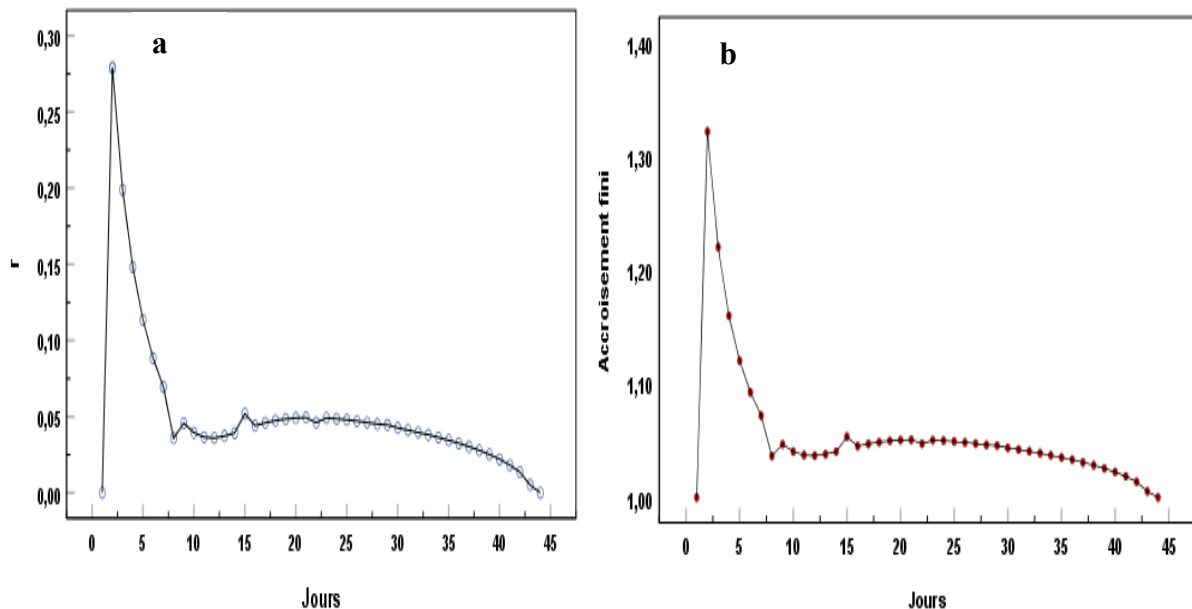


Figure 51 Evolution temporelle du taux intrinsèque d'accroissement (r) (a) et du taux d'accroissement fini (λ) (b) de *D. plantaginea*.

Durant la saison, et tout au long de la période d'infestation, les températures enregistrées ont eu un impact sur l'accroissement des populations du puceron cendré. Les températures minimales journalières ont oscillé entre 9.7 et 21.9 °C, ce qui est supérieur au seuil minimal vital de *D. plantaginea* (4.5 °C) et dans la tranche optimale pour le développement de cette espèce. Cela a eu pour conséquence une influence significative sur l'accroissement des populations, comme en témoignent les valeurs calculées de r et λ . Concernant les températures maximales, elles ont dépassé le seuil optimal de développement (25°C), oscillant entre 26.9 °C (en mai) et 40.9 °C (en juin) (Fig.52). Ces températures ont eu une incidence sur les pucerons, avec des taux d'accroissement faibles (r et λ), indiquant une croissance ralentie, notamment à partir de la mi-juin, une période où des mortalités importantes ont été observées (voir point 4.3.1.1).

L'examen des résultats du tableau 18 ci-dessous révèle en effet que plus la température maximale augmente dans le temps, plus les taux d'accroissement (r et λ) diminuent. En effet, pour le taux intrinsèque d'accroissement (r) est de 0.13 le 20 mai, puis il diminue à 0.02 vers la fin juin. Les températures minimales et maximales sont significativement négativement corrélées avec le taux d'accroissement intrinsèque (Tab.19). Pour ce qui est des températures moyennes, elles oscillaient entre 16.9 et 31.4 °C. Elles étaient, en général, situées dans la tranche optimale de développement des pucerons, à l'exception de la dernière semaine d'échantillonnage (phase de déclin) (du 24/06 au 30/06).

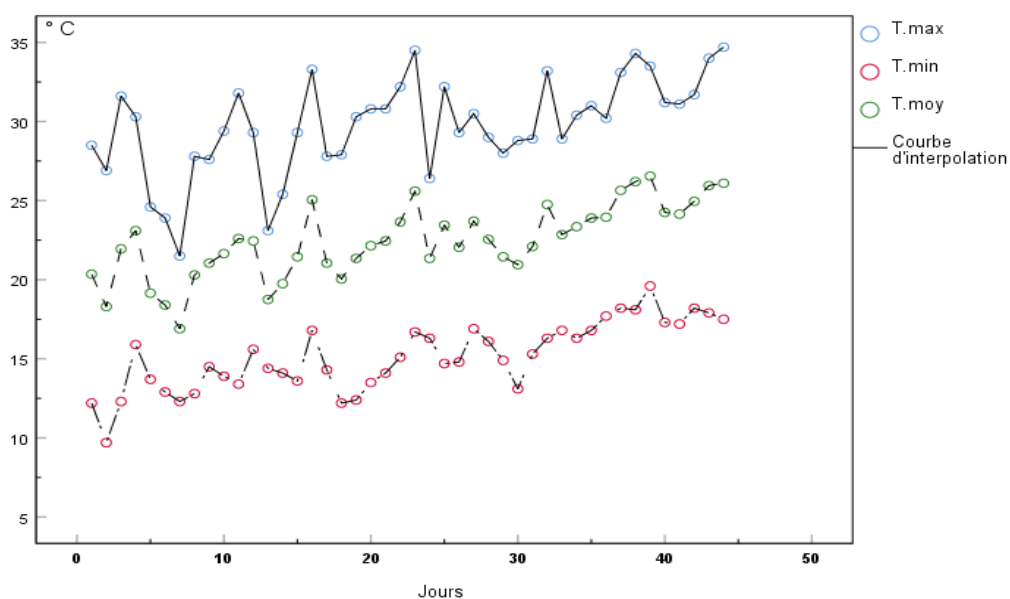


Figure 52 Variation temporelle des températures au sein du verger expérimental de pommiers Gala en 2019 (du 13/05 au 30/06).

Tableau 18 Effet de la fluctuation des températures ambiantes (°C, moyenne hebdomadaire, et intervalle, 2019) sur le taux intrinsèque d'accroissement (r) et l'accroissement fini (λ) des populations de *D. plantaginea*, à partir du 7^e jours de l'infestation artificielle

Période	T° C min	T °C max	T °C moy	r	λ
13/05 – 20/05	12.70 (9.7-15.9)	26.90 (21.-31.6)	19.80 (18.3-21.9)	0.13 ± 0.08	1.15 ± 0.09
21/05 – 27/05	14.20 (13.4-15.6)	27.90 (23.1-31.8)	21.10 (18.75-22.4)	0.04 ± 0.01	1.04 ± 0.30
28/05– 03/06	14.05 (13,5-16,8)	30.40 (27.8-33.3)	22.20 (20.0-25.0)	0.05 ± 0.01	1.05 ± 0.24
04/06 – 10/06	15.80 (14.7-16.9)	30.00 (28.0-34.5)	22,90 (21.3-23.7)	0.05 ± 0.01	1.05 ± 0.27
11/06 –17/06	16.00 (13.1-17.7)	30.20 (28.8-33.2)	23.10 (20.9-23.9)	0.04 ± 0.01	1.04 ± 0.25
18/06 –24/06	18.10 (17.2-19.6)	32.70(31.1-34.3)	25.20 (24.1-25.9)	0.02 ± 0.01	1.01 ± 0.01
24/06 —30/06	19.90 (17.5-21.9)	37.10 (34.7-40.9)	28.50 (26.1-31.4)	0 ± 0	1.00 ± 0
Moyenne ±SD	15.71 ± 2.66	30.64 ± 4.00	23.18 ± 3.13	0.52 ± 0.007	1.05 ± 0.008

*Les valeurs entre parenthèses dans chaque colonne représentent les valeurs minimales et maximales pour chaque moyenne calculée.

Tableau 19 Coefficients de corrélation et valeurs de p (signification bilatérale) des températures minimales et maximales journalières avec le taux intrinsèque d'accroissement (r) des populations de *D. plantaginea*

T °C	R	
T° C_min	Corrélation de	- 0.593**
	Pearson	
	p	0.000007
	N	49.00
T °C max	Corrélation de	- 0.400**
	Pearson	
	p	0.0045
	N	49.00

**La corrélation est significative au niveau 0,01(bilatérale).

4.3.1.2. Effet sur la mortalité naturelle

Le taux de mortalité naturelle cumulé des pucerons a atteint 11.60 % à la fin de la saison (Tab.20). Il varie entre 6.37 et 35.79 % entre le 7^e et les 42^e jours après l'infestation artificielle. La forte chute des populations ($R^2 = 0.89$, $F = 8.42$, $p = 0.037$) résulte des fortes températures maximales enregistrées à partir de la seconde décade de juin, entre le 17/06 et le 24/06. Pendant cette période, les taux de mortalité étaient les plus élevés, avec 14.95 et 35.79 %. C'est pendant ces dates que nous avons obtenu les plus faibles valeurs calculées de croissance des populations (voir les valeurs de r et λ dans le tableau précédent) (Fig.53).

L'évolution de la mortalité dans le temps est significativement liée à la température maximale (qui est au-dessus du seuil de développement). Le meilleur ajustement est fourni par une relation linéaire significative ($R^2 = 0.794$, $F = 8.55$, $p = 0.03$) entre la température maximale et la mortalité des pucerons (Fig.54, annexe, Fig. S2). L'exploitation des résultats obtenus, nous ont permis de développer un modèle de prédiction de la mortalité des pucerons (effective) en fonction du temps. Ce modèle basé sur une régression polynomiale cubique significative ($R^2 = 0.974$, $F = 29.65$, $p = 0.004$), s'écrit comme suit :

$$Y = 57.87 - 16.80 x + 2.09 x^2 - 0.03 x^3$$

avec Y = Nombre de pucerons morts et x = temps (jours).

Tableau 20 Evolution temporelle du taux de mortalité naturelle (%) de *D. plantaginea*

Jours après infestation	Nombre de pucerons moyen/ pousse *	Nombre moyen de pucerons morts/pousse *	Taux de mortalité (%)
1	10.00 ± 0	0.00 ± 0	0
7	17.80 ± 1.19	1.13 ± 0.02	6.37
14	53.49 ± 3.57	3.50 ± 0.03	6.54
21	92.89 ± 6.65	7.89 ± 0.05	8.49
28	177.49 ± 14.99	16.03 ± 0.08	9.03
35	137.98 ± 12.14	20.62 ± 0.11	14.95
42	16.61 ± 2.13	5.94 ± 0.12	35.79
Moyenne ± SE	72.32 ± 5.33	7.87 ± 3.98	11.60 ± 6.33

Valeurs moyennes ± SE

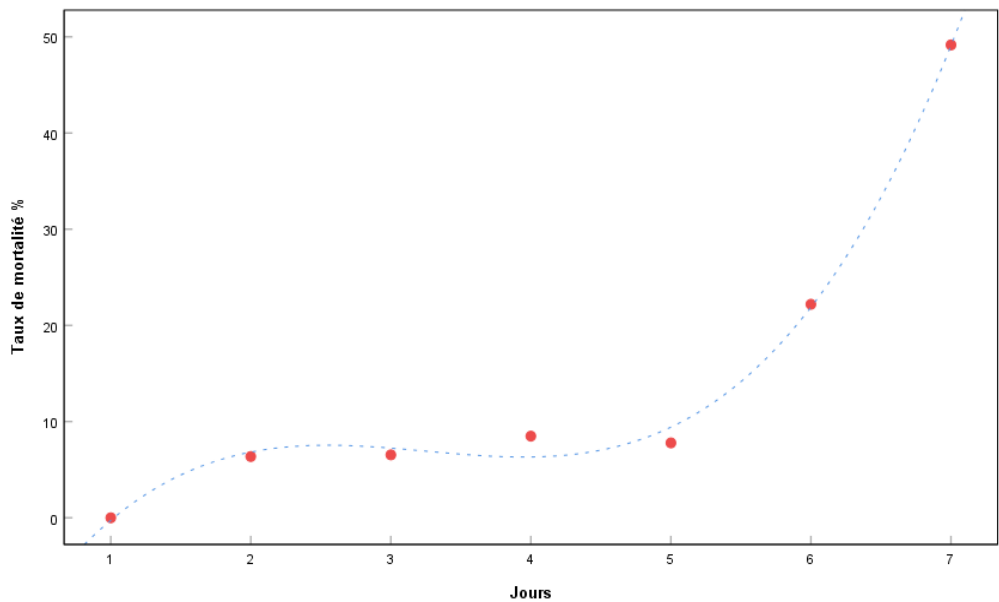


Figure 53 Evolution du taux de mortalité de *D. plantaginea* en fonction du temps (relation polynomiale d’ordre 3).
($R^2 = 0.89$, $p = 0.037$). Chaque point représente une observation hebdomadaire. La courbe en discontinue représente l’intervalle de confiance moyen à 95 %.

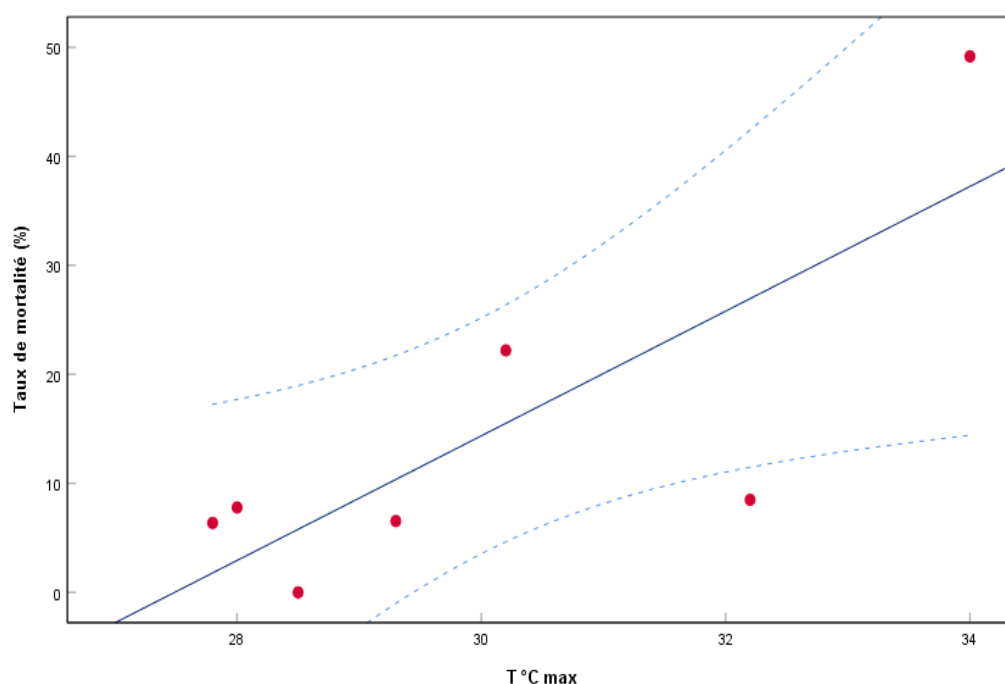


Figure 54 Relation linéaire entre la température maximale et le taux de mortalité hebdomadaire des populations de *D. plantaginea*.

Chaque point représente une observation hebdomadaire. La courbe en discontinue représente l'intervalle de confiance moyen à 95 %.

4.3.2. Effet des températures sur les interactions « pommier - pucerons »

Des modèles de prédictions linéaires ont été développés pour les paramètres croissance végétative (accroissement des pousses) et dynamique des pucerons (taux intrinsèque d'accroissement) respectivement en fonction du temps et des températures. À travers ces modèles préliminaires, nous cherchons à caractériser la signification et le type de relation qui existe entre les températures et les paramètres étudiés.

Les températures ont eu un effet significatif sur la croissance des pousses. La croissance dans le temps est décrite par une relation linéaire significative ($R^2 = 0.980$, $p = 0.096$: pour $p = 0,1$) et prédite significativement par les températures minimales, maximales et moyennes (Tab. 21, Fig.55). Les régressions linéaires ont été sélectionnées, car elles fournissent les meilleurs ajustements se traduisant par des coefficients de corrélation (R^2) élevés.

Tableau 21 Equations des modèles linéaires de prédictions de la croissance temporelle des pousses en fonction des températures ambiantes.

Paramètre	Régression linéaire	R ²	P
Croissance des pousses dans le temps	$Y = 62,26 + 2.06 x$	0.969	< 0.0001
Croissance végétative x T°C min	$Y = -60.09 + 11.13 x$	0.925	0.01
Croissance végétative x T°C max	$Y = 222.73 + 11.04 x$	0.646	0.05
Croissance végétative x T°C moy	$Y = -167.06 + 12.18 x$	0.879	0.005

Y = valeur prédite de la croissance des pousses (mm) ; x = température °C

Par ailleurs, l'analyse GLM effectuée pour les populations de *D. plantaginea* a révélé une relation non linéaire significative entre le taux intrinsèque d'accroissement (r) et la température minimale ($R^2 = 0.617$, $p = 0.0001$) (Fig.56), (r non significative avec les températures moyennes et maximales). Cette relation est décrite par une régression polynomiale d'ordre 3 :

$$Y = 3.627 - 0.668 x + 0.041 x^2 - 0.0009 x^3$$

avec Y = valeur prédite de r ; x = température minimale.

Nous avons ensuite généré une GLM multivariée afin de voir la relation qui lie la température minimale (facteur fixe) avec le taux intrinsèque d'accroissement des pucerons et la croissance des pousses (variables dépendantes). Bien que la température minimale ait révélé des effets significatifs sur les deux paramètres pris séparément, leur interaction a dévoilé une autre tendance. En effet, les résultats de l'analyse (effets inter-sujets) ont révélé que la température minimale agit beaucoup plus sur la croissance des pousses ($R^2 = 0.737$, $F = 4.39$, $p = 0.017$) que sur les populations du puceron ($R^2 = 0.492$, $F = 2.16$, $p = 0.125$).

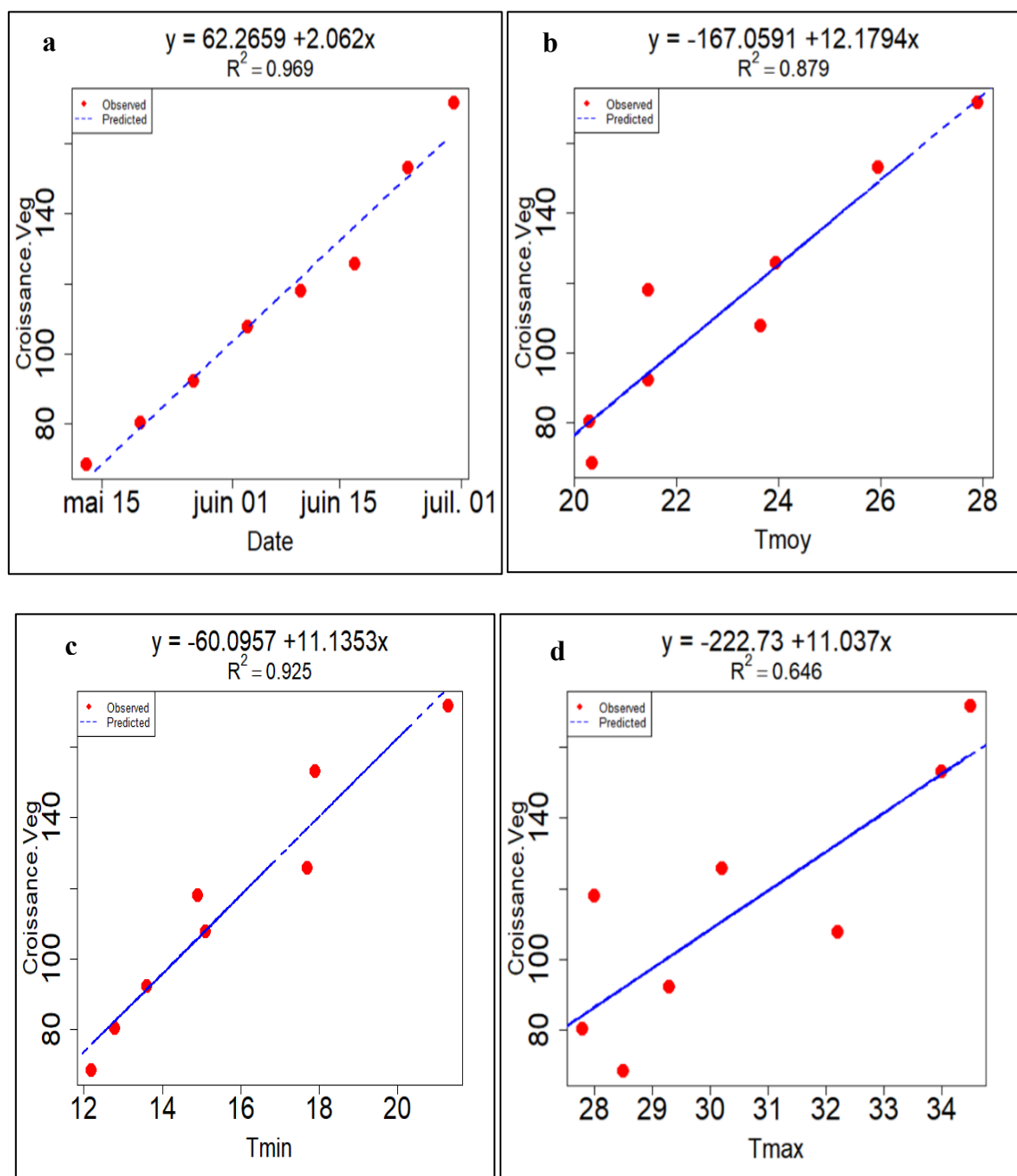


Figure 55 Modèles linéaires de la croissance des pousses en fonction du temps (a) et des températures journalières (T° C) (b) moyennes, (c) minimales et (d) maximales en fonction de la croissance des pousses.

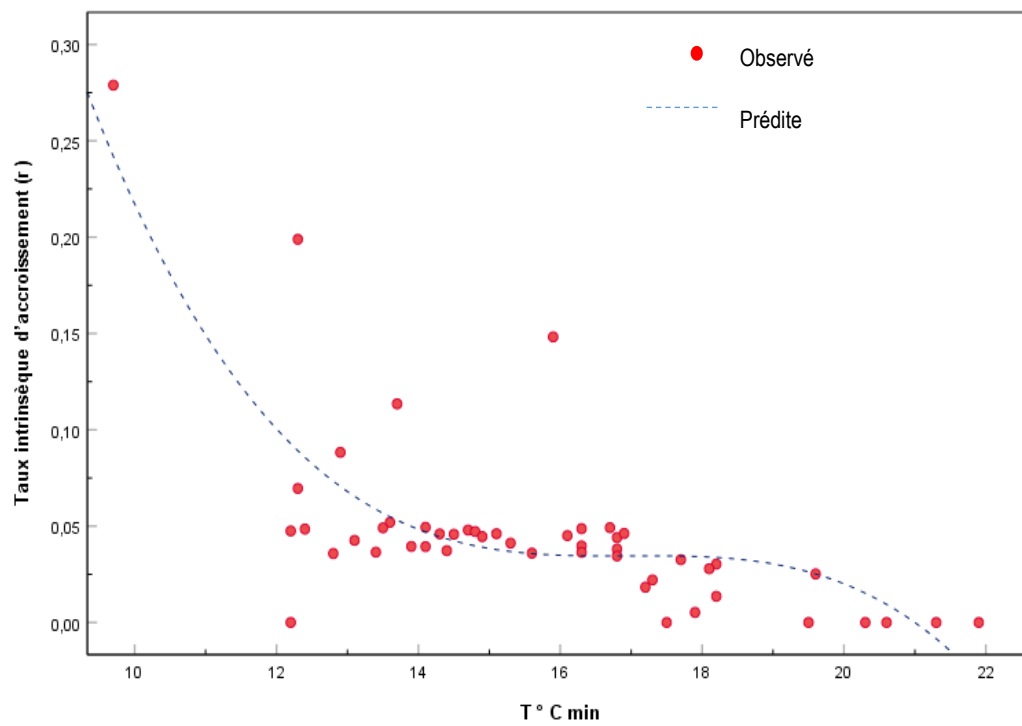


Figure 56 Régression polynomiale (ordre 3) entre la température minimale et le taux intrinsèque d'accroissement des populations de *D. plantaginea*.

Chaque point correspond à une observation (N = 49).

Chapitre 5

Discussion

Chapitre 5. Discussion

*Ce chapitre de discussion a pour objectif d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus concernant les facteurs influençant les interactions au sein du système "pommier-puceron". Tout d'abord, nous examinerons la dynamique des effectifs de *D. plantaginea*, en mettant en évidence les fluctuations observées en relation avec les conditions environnementales. Ensuite, nous aborderons l'effet de l'intensité de la taille sur la croissance végétative des pommiers et sur la dynamique des populations de pucerons, en explorant comment les pratiques culturales influencent cet équilibre complexe. L'impact de la fertilisation azotée sur le système sera également discuté, en tenant compte des effets potentiels sur la croissance de l'arbre et la prolifération du puceron. Enfin, nous discuterons de l'effet de la température sur les interactions entre l'hôte et le ravageur. Ces analyses permettront de mieux comprendre les mécanismes en jeu et d'apporter des perspectives pour une gestion agroécologique optimisée de ce système.*

5.1. Dynamique des effectifs de *D. plantaginea*

La réponse de *D. plantaginea* dans le temps décrit un modèle non linéaire. En effet, l'évolution dans le temps des pucerons est décrite par une équation significative polynomiale d'ordre 5 ($p = 0.09$). Le modèle décrit une forme parabolique typique avec une phase optimale d'abondance des pucerons suivie d'une phase de déclin. *Dysaphis plantaginea* était présent sur les pousses végétatives marquées pendant 6 semaines après l'infestation artificielle, avec une abondance accrue au début de l'été, directement liée à l'accroissement des pousses végétatives. Pendant cette phase, une occurrence maximale de 177.49 pucerons par pousse a été observée. En effet, Schaub *et al.* (1995) précisent que, en présence des conditions climatiques favorables pendant la phase de croissance active du pommier, une fondatrice peut générer par parthénogenèse jusqu'à une centaine de femelles aptères (virginipares aptères) qui vont continuer à se multiplier. Une jeune femelle peut engendrer entre 32 et 36 larves (Blommers *et al.*, 2004). Cette forte fécondité entraîne des taux d'accroissement importants des populations (Blackman et Eastop, 2000).

Dans cette étude, la dynamique du puceron a été caractérisée par une phase optimale d'abondance (fin mai - mi-juin) suivie d'une phase de déclin (mi-juin - début de juillet), observée à partir de la quatrième semaine de l'infestation artificielle.

L'accroissement des populations a également été favorisé par des températures moyennes favorables, en accord avec l'optimum de développement (20-25°C). En effet, la température moyenne oscillait entre 18,3 et 25,05 °C au printemps (T°C max : 23.8-33.9) et entre 21.35 et 25.95 °C en été (T°C max : 26.6 -34). Les températures minimales (9. 7-19.7°C) étaient favorables, car elles se situaient au-dessus du seuil minimal de développement défini pour *D. plantaginea* (4.5°C).

Le déclin total des populations a eu lieu au début du mois de juillet 2019. Nos résultats s'accordent avec les travaux de plusieurs auteurs. En effet, une tendance similaire a été observée par Guettala (2009) dans les vergers de pommiers de l'est (Batna et Khenchela) et du centre de l'Algérie par Aroun *et al.* (2015). De plus, dans le sud-est de la France, Dib *et al.* (2010) et Rousselin *et al.* (2018) ont également rapporté une phase de reproduction relativement courte du puceron cendré au printemps, d'une durée de 6 à 8 semaines, atteignant des pics d'abondance au mois de juin, puis une diminution et une disparition vers le début de juillet.

La proportion des formes aptères était plus importante que celle des morphes ailés (1.08-5.29 %) dont l'apparition ne s'est faite qu'à partir de la cinquième semaine. La présence des ailés était plus marquée durant la première décade du mois de juin, avec des proportions variant entre 5.02 et 5.29 %. Ces proportions élevées sont la conséquence de l'effet de groupe engendré par les fortes densités des populations durant la même période. En effet l'effet de groupe (stimulation tactile) est un phénomène qui se produit chez les ravageurs lorsque leurs populations atteignent un certain niveau de densité. Cet effet se traduit par des modifications du comportement et des caractéristiques physiologiques des individus, pouvant avoir un impact sur leur reproduction et leur survie, ainsi que leur résistance aux facteurs de stress environnementaux (Braendle *et al.*, 2006).

De plus, l'augmentation de la densité des populations entraîne une augmentation de la fréquence des morphes ailés, favorisant ainsi la dispersion de la population. Cela peut également conduire à une augmentation de la reproduction par parthénogenèse, permettant une croissance plus rapide de la population. En effet, c'est surtout au printemps et au début de l'été que le niveau de reproduction est très élevé. Pendant cette période, la majorité des populations de pucerons sont constituées par des femelles aptères qui se reproduisent par parthénogenèse associée à la viviparité (Guerrieri et Digilio, 2008 ; Blommers *et al.*, 2004).

L'apparition et la dispersion des formes ailées sont également conditionnées par des facteurs environnementaux tels que la photopériode, la température et l'humidité, ainsi que par l'état physiologique de la plante hôte, notamment la qualité et la disponibilité des nutriments (Blommers *et al.*, 2004 ; Nicolas *et al.*, 2013). De plus, un état nutritionnel faible dans les pousses infestées de la plante hôte peut être un facteur déclencheur (Peusens *et al.*, 2006).

Ensuite, il y a une phase de déclin correspondant au vol d'émigration ou de retour vers l'hôte secondaire. Cela a été confirmé par les travaux de Dib *et al.* (2010), qui précisent que le début de la migration du puceron cendré des pommiers coïncide souvent avec la phase du pic d'abondance.

L'augmentation des températures maximales au-delà de 30°C (fluctuant entre 33.1- 40.9 °C), à partir de la mi-juin au sein du verger expérimental de pommiers a entraîné une diminution du taux de survie du puceron cendré, où des fortes mortalités ont été observées 42 jours après l'infestation artificielle. En effet, les températures élevées peuvent entraîner une durée de vie plus courte des pucerons (Trotta *et al.*, 2006) et une cessation de l'activité de prélèvement de sève (Stacey et Fellowes, 2002). De plus, les températures élevées (supérieures à la gamme de tolérance) peuvent affecter la capacité des arbres à produire de la sève, ce qui entraîne une diminution de la disponibilité de nourriture pour les pucerons.

Le mécanisme d'autorégulation et de compétition intraspécifique engendré par la surpopulation (notamment des aptères) peut également contribuer à la baisse des effectifs, souvent traduisant une diminution de la fertilité des femelles (Dixon *et al.*, 1996). La dynamique des pucerons pendant l'année est également déterminée par le changement saisonnier dans la qualité nutritionnelle ou l'état physiologique de l'arbre. En effet, Kindlmann *et al.* (2007) indiquent que les pucerons réussissent mieux (reproduction et abandon) au printemps pendant la phase de croissance active, lorsque les acides aminés sont activement transférés dans le phloème, au-delà il se produit une diminution rapide des effectifs, en raison de la diminution de la sève (croissance ralentie).

Dans cette étude, l'abondance des pucerons était importante et étroitement liée au développement des pousses végétatives du pommier. En effet, selon Varn et Pfeiffer (1989) et Cao *et al.* (2018), les pucerons ont tendance à mieux se reproduire sur les jeunes pousses d'un an et les jeunes feuilles en raison de leur teneur élevée en nutriments, en particulier en azote et en glucides. Ces nutriments sont essentiels à la croissance et à la reproduction des pucerons.

De plus, les jeunes tissus végétaux ont une structure plus faible et sont donc plus vulnérables au prélèvement de la sève par les pucerons.

5.2. Effet de l'intensité de la taille sur la croissance végétative et la dynamique des pucerons

Les résultats de cette étude ont révélé que la croissance végétative des pommiers et la dynamique des pucerons augmentaient considérablement au fil du temps avec l'intensité de la taille d'hiver. Les pommiers soumis à une forte intensité de taille ont produit des pousses plus longues et un plus grand nombre de feuilles par pousse, augmentant ainsi la densité des pucerons. L'amélioration de la croissance végétative causée par la taille sévère avait déjà été mentionnée par d'autres études réalisées sur les arbres fruitiers (Braham et Amor 2018 ; Grechi *et al.*, 2008 ; Jorquera-Fontena *et al.*, 2014 ; Persello *et al.*, 2019).

Dans le cas d'une taille d'hiver sévère, l'arbre réagit au stress en augmentant sa capacité de croissance, selon le concept d'équilibre fonctionnel (Belsky, 1986 ; Bevacqua *et al.*, 2012). Cependant, cette théorie holistique nécessite une meilleure compréhension des facteurs sous-jacents qui affectent la croissance (par exemple, la fertilisation, l'irrigation, la croissance des racines et le climat).

En accord avec les résultats antérieurs sur les pommiers (Barden *et al.*, 1989 ; Forshey et Marmo 1985 ; Sus *et al.*, 2018) la longueur moyenne des pousses n'a pas été affectée par l'intensité de la taille hivernale. Des résultats contradictoires ont été signalés sur le pêcher (Ikinci, 2014) et sur le pommier ; variété Starking Delicious (Kaith *et al.*, 2011). Sur la base de ces rapports contrastés, il est difficile de tirer des conclusions sur les mécanismes impliqués dans les réponses de croissance végétative à la taille d'hiver. Plusieurs rapports indiquent que la quantité de bois enlevé influence les réactions de croissance des pousses après la taille ainsi que d'autres facteurs tels que le type de conduite, le type de taille, la vigueur de l'arbre, la sensibilité des cultivars et les conditions climatiques (Mika *et al.*, 2011 ; Stephan *et al.*, 2007 ; Willaume *et al.*, 2004).

D'autre part, nos résultats ont indiqué que la population de *D. plantaginea* a atteint un pic quatre semaines après le premier jour de l'infestation artificielle, puis a diminué (jusqu'à son extinction) en raison de la migration des formes ailées vers l'hôte secondaire, en accord avec les conclusions de Dib *et al.* (2010) et Rousselin *et al.* (2018). Ces auteurs ont observé que le début de la migration des pommiers coïncidait avec la phase de pic des pucerons.

D'après nos résultats, l'abondance des pucerons augmentait avec l'intensité de la taille et était positivement corrélée à la croissance des pousses. Ce résultat confirme d'autres rapports qui ont révélé que les performances de *M. persicae* et d'*Aphis pomi* De Geer (Hemiptera : Aphididae) étaient positivement liées à la longueur et à la croissance des pousses, qui pouvaient être modifiées par l'intensité de la taille (Grechi *et al.*, 2008 ; Stoeckli *et al.*, 2008). De plus, une faible intensité de taille réduit le taux d'allongement individuel des pousses, car la vigueur de la plante est répartie sur un plus grand nombre de pousses, ce qui entraîne une infestation limitée de pucerons (Grechi *et al.*, 2008).

Contrairement au nombre de feuilles par pousse, nous avons observé que la longueur finale des pousses n'était pas affectée par l'infestation par *D. plantaginea*. Plusieurs études sur les interactions entre les arbres fruitiers et les pucerons ont confirmé ou contredit ces résultats. Sur les pommiers, l'abondance de *D. plantaginea* et d'*A. pomi* sur une pousse de l'année en cours était corrélée à la croissance végétative (Stoeckli *et al.*, 2008 ; Rousselin *et al.*, 2016). Chez les agrumes, Braham et Amor (2018) ont trouvé une relation positive entre le nombre de nouvelles pousses par arbre et l'infestation par *A. spiraeicola*.

De plus, les arbres sévèrement taillés étaient davantage infestés par plus de pucerons, même si cette différence peut changer lorsque la densité de population augmente de manière exponentielle. Chez les pêchers, Grechi *et al.* (2008) ont montré que le degré d'infestation par *M. persicae* augmentait avec l'intensité de la taille hivernale. Ils ont démontré qu'une taille hivernale sévère a augmenté le nombre des pucerons, ce qui était principalement dû à l'augmentation de la proportion de pousses en croissance.

Néanmoins, cette hypothèse n'a pas été démontrée dans un verger de pommiers biologiques (cultivars : Rewana, Elstar et Jonica) où une taille faible a entraîné un niveau plus élevé de dommages causés par l'araignée rouge *Panonychus ulmi* Koch (Acari : Tetranychidae) qu'une taille forte (Holb *et al.*, 2001). Cela contraste avec l'hypothèse de la vigueur de la plante, qui prédit que les espèces herbivores se nourrissent préférentiellement de plantes à croissance vigoureuse qui fournissent une nutrition abondante (Price, 1991).

Une autre hypothèse, appelée hypothèse du stress pulsé suggère que les plantes subissant un stress, tel qu'une taille sévère, peuvent produire des rameaux et des feuilles plus tendres, ce qui augmente la teneur en eau de la plante et attirant plus de sève, ce qui peut attirer davantage d'insectes ravageurs (Huberty et Denno, 2004).

Nous émettons l'hypothèse que l'effet de la taille sur le nombre des pucerons pourrait être influencé par de nombreux facteurs, notamment les espèces de ravageurs, les espèces d'arbres, le cultivar et l'intensité de la taille. Toutefois, cela nécessiterait des études plus approfondies.

5.3. Effet de l'infestation de pucerons sur la croissance végétative et le rendement en fruits

Notre étude a révélé que la croissance des arbres fruitiers et la production de pommes ont été impactées par une infestation de pucerons. En effet, la présence de pucerons a diminué la croissance des pousses en développement et causé des dégâts aux feuilles. Nous avons également observé que le pourcentage de feuilles enroulées était corrélé à la concentration de pucerons, et que des niveaux élevés d'infestation pendant la période estivale ont entraîné une chute précoce des feuilles, ce qui a ralenti la croissance.

Des effets similaires ont été observés dans les systèmes *M. persicae*-pêcher (Grechi *et al.*, 2008) et *A. spiraecola*-agrumes (Braham et Amor 2018). Dans une étude précédente, Varn et Pfeiffer (1989) ont constaté que *D. plantaginea* limitait la croissance de la pousse terminale d'un an des pommiers, mais pas celle des pousses latérales. Cette préférence alimentaire est principalement due à la meilleure qualité nutritionnelle du phloème des jeunes feuilles de la pousse terminale (Cao *et al.*, 2018) et à leur capacité à favoriser le développement des pucerons (Grechi *et al.*, 2008 ; Rousselin *et al.*, 2018 ; Simon *et al.*, 2011). De plus, les plantes ligneuses ont une faible capacité à compenser les dommages causés par les insectes se nourrissant de sève, et ces derniers ont un impact négatif sur la croissance et la photosynthèse (Zvereva *et al.*, 2010).

Nos résultats montrent que la production de fruits augmentait avec la diminution de l'intensité de la taille et l'infestation de pucerons. La charge fructifère et le rendement en fruits par arbre ont été considérablement réduits par l'infestation de pucerons, tandis que le poids et le diamètre des fruits frais n'ont pas été affectés, ce qui donne un indice de forme du fruit assez similaire. Selon plusieurs auteurs, la taille d'hiver (selon sa sévérité) améliore la qualité des fruits grâce au nombre de fruits par arbre (Forshey *et al.*, 1992 ; Suchocka *et al.*, 2021 ; Zhang *et al.*, 2018).

Selon les études réalisées sur les oliviers et les châtaigniers, une taille hivernale sévère diminue les taux de photosynthèse (Albarracina *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2017). Lorsqu'il s'agit de l'arbre à pommes, Kviklys *et al.* (2022) et Schupp *et al.* (2017) ont constaté qu'une taille hivernale sévère augmentait la vigueur des pousses, ce qui entraîne une augmentation du nombre de feuilles, réduisant ainsi le nombre de fleurs et de fruits.

Cette étude démontre que, bien qu'une intensité de taille élevée ait amélioré les pousses disponibles pour *D. plantaginea* et amélioré la forme des pommes, elle a réduit le rendement en fruits, tandis que des intensités de taille moyennes et faibles ont réduit l'infestation en diminuant les pousses en croissance, mais en améliorant le rendement en fruits. Par conséquent, nous avons formulé l'hypothèse que, même si un niveau élevé de taille accroît la croissance végétative, elle peut être un désavantage pour le rendement en raison de ses effets sur la fructification. Cependant, le comportement photosynthétique des pommiers peut être affecté par de nombreux autres facteurs, tels que la densité de plantation, le stade de développement des arbres (maturité) et les ravageurs (Laužik *et al.*, 2020), ce qui devrait être étudié plus avant.

Nos résultats révèlent une perte estimée de 35.07 % du rendement en pommes causée par l'infestation de pucerons à la récolte. Dans les vergers de pommiers biologiques, plusieurs études ont indiqué que *D. plantaginea* était à l'origine de 7.2 à 21.4 % des fruits endommagés ou non commercialisables. (Cahenzli *et al.*, 2019 ; Jacobsen *et al.*, 2022 ; Simon *et al.*, 2011 ; Stewart-Jones *et al.*, 2008). Les pertes de rendement faibles observées dans les vergers de pommiers biologiques ont été principalement attribuées à l'utilisation de variétés tardives, de bandes fleuries vivaces (utilisées pour favoriser les ennemis naturels) et aux effets des conditions climatiques défavorables sur la croissance des populations de *D. plantaginea*.

D'autres études révèlent des variations importantes dans les pertes, allant de 30 % (Blommers *et al.*, 2004) à 80 % (Qubbaj *et al.*, 2005). Ces variations peuvent être expliquées par plusieurs facteurs, tels que la sensibilité des variétés, les conditions expérimentales et environnementales.

Plusieurs études ont montré que la densité des pucerons n'a presque aucun effet sur le rendement de l'année en cours, mais peut-être sur celui des années futures en raison d'une réduction de la vigueur des arbres (Filajdić *et al.*, 1995 ; Grechi *et al.* 2008). Cependant, dans le cas de *D. plantaginea*, d'autres rapports ont montré que le rendement en fruits peut diminuer l'année de l'infestation (Blommers, 1999 ; De Berardinis *et al.*, 1994).

Le succès de l'infestation est principalement dû à la sensibilité des cultivars de pommiers et à la synchronisation de la phénologie des arbres avec le cycle de vie de *D. plantaginea*, ainsi qu'à des conditions climatiques appropriées.

Dans cette étude, les dommages causés par les pucerons ont entraîné des pertes de rendement plus élevées parce que la période de forte activité de *D. plantaginea* coïncidait avec la période de production maximale des pommiers, de formation et de développement des fruits. Parmi les variétés de pommiers, « Gala » a été indiquée comme l'une des plus sensibles à l'infestation par *D. plantaginea* (Arnaoudov et Kutinkova, 2006 ; Miñarro et Dapena 2007).

Nos résultats suggèrent que les producteurs de pommes Gala devraient appliquer une légère taille chaque année, afin de limiter les infestations. Cependant, selon la croissance des arbres et les conditions climatiques, des pratiques de gestion appropriées doivent être envisagées. Cette recommandation peut être généralisée aux vergers plantés avec la variété Gala et poussant dans des conditions environnementales et agricoles similaires (sol, porte-greffe, système et densité de formation des arbres, microclimat).

Les interactions entre les plantes et les pucerons restent complexes et doivent être étudiées à l'aide de différentes approches. En effet, les effets d'autres pratiques de gestion sur l'infestation de pucerons, comme l'irrigation, l'engrais azoté et la lutte biologique pour promouvoir l'agro biodiversité fonctionnelle, doivent également être étudiés. De plus, les résultats de cette étude mettent en évidence l'importance d'étudier la taille d'hiver comme méthode de lutte contre les pucerons dans les vergers fruitiers et la nécessité de mener des études multi annuelles, en tenant compte des variations climatiques annuelles et des changements dans la composition des populations de pucerons.

Il serait important d'évaluer les coûts et les avantages économiques des différentes méthodes de lutte contre les pucerons, afin de fournir aux agriculteurs des recommandations pratiques sur la façon de gérer les infestations de pucerons tout en conservant la productivité et la rentabilité de leurs cultures.

Enfin, la compréhension des interactions plante-insecte est donc essentielle pour développer des stratégies de production intégrée contre les ravageurs clés efficaces et durables, qui peuvent réduire la dépendance aux pesticides chimiques et promouvoir les méthodes de lutte respectueuses de l'environnement.

5.4. Effet de la fertilisation azotée sur le système « pommier-puceron cendré »

5.4.1. Effet sur la croissance végétative et la croissance du tronc

La réponse des jeunes pommiers, soumis aux mêmes conditions de développement (même âge, climat et entretien), au traitement par les doses croissantes d'azote était significative. En fin de saison, le régime azoté a eu un effet notable sur la longueur des pousses, le nombre moyen de feuilles par pousse, mais pas sur le diamètre du tronc. Les doses croissantes d'azote ont amélioré la croissance, y compris la production de nouvelles feuilles en fin de saison. Ce résultat concorde avec plusieurs travaux menés sur l'étude des effets de la nutrition azotée sur la croissance végétative des arbres fruitiers, notamment sur les pêchers (Médiène *et al.*, 2002 ; Sauge *et al.*, 2010 ; Rousselin *et al.*, 2017) et sur les citrus (Braham *et al.*, 2023).

Dans la présente étude, le traitement azoté n'a pas eu d'effet significatif sur le nombre moyen de feuilles par pousse durant la plupart des relevés, à l'exception du dernier jour (25 juin), où le nombre de feuilles a significativement augmenté pour le traitement à 75 % de N. Cela suggère une possible adaptation de la plante à une fertilisation modérée, mais constante, qui favorise une croissance plus équilibrée entre le développement foliaire et la croissance des pousses.

Cependant, le diamètre du tronc n'a montré aucun changement important avec les doses croissantes de N, indiquant que l'apport en azote influence principalement la croissance en longueur des pousses sans affecter notablement la croissance en diamètre.

Les meilleures performances de croissance ont été obtenues par la dose intermédiaire de 75 % N, plus tôt que celle de confort (100 % N) habituellement utilisée par les arboriculteurs sur de jeunes pommiers. Cela suggère, par conséquent, une réduction de la dose d'apport de confort de 25 % pour les jeunes pommiers Gala et soutient l'importance d'une gestion équilibrée de la nutrition minérale. Ce qui permettra de privilégier une croissance végétale uniforme sans excès d'azote.

Nos résultats indiquent également une croissance assez proche entre les doses 100 % N, 50 % N et le témoin (0 N %) avec des RGR Ln respectives de 0.0054, 0.0056 et 0.0046.

Ainsi, même sans apport extérieur d'azote, les jeunes pommiers semblent avoir puisé dans leurs réserves pour assurer l'accroissement des pousses, suggérant une mobilisation des ressources stockées pour renouveler le feuillage au printemps.

L'azote (N) joue un rôle vital dans la croissance végétative des arbres fruitiers. Il est indispensable à la synthèse de la chlorophylle, pour la photosynthèse, et à la synthèse des protéines. Il contribue aussi à l'élaboration d'enzymes essentielles à la croissance des plantes. Il contribue par ailleurs à la formation des jeunes troncs et à la croissance de la tige et des branches. En effet, les travaux de Braham *et al.* (2023) ont montré que la teneur en chlorophylle dans les feuilles (citrus) augmente de manière significative et proportionnelle à l'apport d'azote.

D'après Millard et Grelet (2010), l'azote issu de l'absorption racinaire est distribué aux jeunes pousses en croissance depuis la fin du débourrement jusqu'à la floraison et la fin de la croissance des feuilles. Puis, de la fin de la croissance des feuilles (début de l'été) à la maturité des feuilles (fin de l'été), l'azote est réalloué au sein de la feuille vers le processus métabolique photosynthétique afin de favoriser la croissance optimale de l'arbre. C'est à cette période de l'année que la croissance de l'arbre est maximale. Larrieu (2019) précise pour le pommier, que durant la phase de démarrage l'absorption est de 10 % des besoins annuels au mois de mars-avril. En mai –juin, le pic d'absorption apparaît avec plus de 40 % des prélèvements, avec la croissance des feuilles.

L'excès d'azote contamine les eaux souterraines et peut induire des effets négatifs sur l'écosystème et la santé humaine. C'est pourquoi Vaysse *et al.* (2000) et de Kuster *et al.* (2017), recommandent à ce propos de fractionner et d'optimiser l'apport d'azote pendant la phase de croissance active des arbres, au printemps et en été. Les travaux de Neilsen et Neilsen (2002) montrent que les applications d'azote avant le printemps sont peu efficaces, car l'absorption par les racines est limitée en période de froid. En lien avec cette observation, la gestion de l'azote dès le printemps, comme appliquée dans notre étude, semble être la meilleure période pour maximiser l'efficacité de cet apport, en phase avec les recommandations de fractionnement (Vaysse *et al.*, 2000 ; Kuster *et al.*, 2017).

5.4.2. Effet sur l'infestation

Les résultats obtenus montrent que les doses élevées d'azote (75 % et 100 %) favorisent une prolifération accrue des pucerons. Le niveau d'infestation était plus élevé pour la dose maximale de confort (100 % N) que celle de 75 % N.

Ce résultat est en accord avec ceux précédemment obtenus par Laghfiri *et al.* (2017). En effet, travaillant sur l'effet de deux régimes hydro-azoté sur les infestations de *Myzus persicae* sur pêcher, ces auteurs trouvent que le régime de fertigation normal (100%) s'est révélé beaucoup plus favorable à un développement des populations du puceron, tandis que le régime déficitaire de 25% en eau et en azote par apport au régime normal (75%) a pu réduire les infestations de ces derniers.

Bien que l'azote soit un élément essentiel pour maintenir un équilibre physiologique optimal de l'arbre fruitier, mais son application excessive peut également améliorer la qualité nutritive des pousses, les rendant ainsi plus attractives pour les ravageurs (Lobit *et al.*, 2001 ; Moon et Stiling, 2004).

Parmi les solutions pour améliorer la gestion de la fertilisation azotée figure la fertirrigation, qui consiste à appliquer de l'azote via le système d'irrigation. L'azote est fourni au moment opportun, mais en quantité modérée, pour optimiser la croissance sans accroître les risques des infestations par les phytophages, notamment les piqueurs –suceurs. Dans ce contexte, la nécessité d'une gestion raisonnée des apports azotés est cruciale. En effet, en phase de croissance active (printemps), une fertilisation modérée, comme le précise Kuster *et al.* (2017), répond aux besoins élevés des arbres sans encourager de manière excessive la multiplication des pucerons. La maîtrise de la fertilisation azotée est indispensable pour la maîtrise des infestations de *D. plantaginea*.

5.4.3. Interactions entre le traitement N avec la croissance et l'infestation

La fertilisation azotée influence non seulement la croissance des pommiers, mais également la prolifération de *D. plantaginea*, ce qui peut poser des risques pour les vergers si des mesures de contrôle des pucerons ne sont pas mises en place en parallèle. Les résultats montrent que les doses élevées d'azote (75 et 100 %) favorisent une dynamique accrue des pucerons, corrélée avec une croissance importante des pousses et une disponibilité suffisante en eau. Ce résultat conforte l'hypothèse de la vigueur des plantes (Price, 1991). En effet, les changements dans la disponibilité de la biomasse végétale et la qualité nutritionnelle peuvent influencer les interactions avec les insectes phytophages.

Les changements dans la disponibilité, la qualité nutritive et la chimie défensive peuvent altérer les performances des insectes phytophages et de la croissance des arbres fruitiers (Hoffland *et al.*, 2000 ; Grechi *et al.*, 2007).

Plusieurs travaux ont démontré que des doses élevées en azote peuvent entraîner un excès de vigueur et une réduction des défenses chimiques des plantes, induisant une multiplication accrue de *D.plantaginea* (Witzell et Shevtsova, 2004 ; Bussi *et al.*, 2006 ; Brown, 2008) et d'*Aphis spiraecola* (Braham *et al.*, 2023). Étant phloémophage, l'azote est un élément clé et très recherché dans la nutrition des pucerons. Il leur permet d'accélérer leur processus de reproduction et de stimuler leur croissance.

Les conclusions de cette recherche ont révélé que l'application d'un traitement riche en azote a considérablement favorisé la croissance des pousses de pommiers, en particulier dans le cas d'une infestation (AI). Plus précisément, l'application d'une dose modérée de 75% d'azote a entraîné la croissance relative journalière (RGR Ln) la plus élevée des pousses. Ces résultats suggèrent que la fertilisation optimale pour maximiser la croissance des pousses se situe à un niveau d'azote proche de 75%, ce qui dépasse même les rendements obtenus avec la dose de confort (100%). Ce constat pourrait indiquer un effet de saturation pour la dose la plus élevée, où l'azote supplémentaire n'offre pas de bénéfice supplémentaire en termes de croissance.

L'effet de l'azote sur le système « pommier-puceron » peut être aussi renforcé par la disponibilité de l'eau. C'est pourquoi dans les systèmes de fertirrigation, l'ajustement des besoins hydriques à ceux des apports en éléments nutritifs optimise la santé de l'arbre tout en limitant le stress hydrique, qui pourrait sinon favoriser la vulnérabilité aux ravageurs comme les pucerons. Le besoin en eau et en nutrition azotée dans les vergers de pommiers est significatif, et des apports réguliers sont nécessaires pendant la phase de croissance pour assurer une bonne production (Trillot *et al.*, 2002).

Dans notre étude, même si l'eau n'était pas un facteur expérimental, on peut supposer que l'interaction entre une gestion hydrique appropriée et une fertilisation équilibrée seraient bénéfique pour la résilience des pommiers aux infestations de pucerons. Nos résultats expérimentaux confirment l'importance de la gestion raisonnée de l'azote dans les vergers intensifs de pommiers. Pour améliorer la gestion des cultures et des ravageurs dans un contexte de production fruitière intégrée, d'autres méthodes de contrôle comme la taille d'hiver doivent être examinées et combinées (Grechi *et al.*, 2010).

En résumé, la réponse des pucerons face aux pratiques culturales, comme la taille, la fertilisation et l'irrigation, reste ambiguë et très complexe, favorisant des hypothèses contrastées. C'est pourquoi les chercheurs ont développé trois hypothèses : l'hypothèse du stress pulsé (PLSH), l'hypothèse de la croissance vigoureuse des plantes (PVH) et l'hypothèse du stress des plantes (PSH). La PLSH (Huberty et Denno 2004) prévoit que lorsqu'une plante subit une taille importante, elle produit des tiges et des feuilles tendres, ce qui augmente le contenu en eau de la plante et attire davantage de ravageurs qui se nourrissent de sève. Les plantes soumises à un stress hydrique intermittent sont plus attractives pour les pucerons que celles bien irriguées ou celles qui font face à un stress hydrique continu. La PVH (Price, 1991) postule que les populations de ravageurs devraient augmenter plus rapidement sur les plantes où les organes se développent de manière vigoureuse, puisque ces derniers offrent plus de ressources nutritives.

En soutien à cette hypothèse, il existe certaines preuves expérimentales suggérant que des pratiques telles que la fertilisation et l'irrigation, qui favorisent la croissance des plantes, peuvent être associées à des populations abondantes de ravageurs (Rousselin *et al.*, 2016).

À l'inverse, la PSH (White, 1984) affirme que les ravageurs se comportent mieux sur des plantes stressées qui n'auront pas les ressources pour déployer des défenses et/ou dont la qualité nutritionnelle pourrait être améliorée. Selon cette hypothèse, les insectes ravageurs peuvent être attirés par les signaux de stress émis par la plante, tels que des changements dans la production de produits chimiques défensifs ou une augmentation de la teneur en eau et en nutriments. Cela a été déterminé expérimentalement pour certaines espèces de pucerons qui se nourrissent de plantes avec un déficit d'irrigation contrôlé (Oswald et Brewer, 1997 ; Tariq *et al.*, 2012).

La fertilisation azotée modifie l'équilibre des nutriments dans les plantes, améliorant la situation nutritionnelle des tissus végétaux, ce qui peut favoriser la croissance des pucerons, et affecte la synthèse des composés défensifs, ce qui peut limiter l'ingestion du phloème par les pucerons et leur reproduction (Awmack et Leather, 2002).

5.5. Effet des températures sur le système « pommier - puceron »

Durant l'année 2019, le taux de mortalité naturelle cumulé des pucerons a atteint 11.60 %, avec un taux maximal de 35.79 % enregistré en fin de saison. La mortalité résulte principalement des températures maximales excessivement élevées enregistrées à partir de la seconde décade du mois de juin (31.1- 40.9)

Plusieurs autres facteurs auraient pu contribuer à la mortalité des pucerons en fin de saison sur les pommiers, tels que la diminution des ressources alimentaires et la surpopulation des effectifs observés durant le mois de juin (137.98 et 177.49 pucerons/pousse). Dans notre cas, l'action des facteurs biologiques (parasites et prédateurs) est presque exclue puisque le verger expérimental est sous insecte-proof.

Les espèces poïkilothermes, telles que les insectes, sont très sensibles aux changements de température dans l'espace et dans le temps (Huey et Stevensen, 1979 ; Lange *et al.*, 2006). L'activité métabolique, le développement et la survie sont étroitement liés à la température environnante, considérée comme le principal facteur pouvant affecter les performances des insectes (Chown *et al.*, 2004 ; Ismail et Brooks, 2016 ; Tougeron *et al.*, 2021).

Très peu d'études ont été effectuées sur la réponse des pucerons aux températures environnantes. En effet, la plupart se sont déroulées en conditions contrôlées au laboratoire et ont eu pour objectif l'étude de l'impact des températures (constantes ou régimes fluctuants) sur la physiologie, le comportement et l'écologie de *D. plantaginea*. À titre indicatif, des femelles aptères du puceron cendré exposées à un régime constant de 7, 12, et 17°C révèlent des taux de mortalité respectifs de 33,3 et 25 % (Tougeron *et al.*, 2021). Les performances optimales de *D. plantaginea* se situent entre 17 et 23 °C, et elles sont faibles à des températures élevées, supérieures à 30°C (Blommers *et al.*, 2004). Selon les travaux d' Ismail *et al.* (2022), *D. plantaginea* a une grande capacité de résistance vis-à-vis des basses températures (minimum critique : -2°C), alors que les plus élevées lui sont défavorables.

Le taux intrinsèque d'accroissement calculé d'une population peut être utile pour prédire les performances de la population étudiée. En tant que valeur unique et discrète, elle sert de mesure quantitative, ou d'indice écologique, de la réponse d'une espèce à un ensemble de conditions environnementales (Birch, 1948).

Dans la présente étude, en prenons en considération la variabilité intrinsèque de développement temporelle des populations de *D. plantaginea* (taux d'accroissement fini : λ), nous avons décrit par une régression polynomiale significative, la relation existant entre les températures et le puceron. Le modèle développé bien que significatif nécessite, pour être utilisé comme outils d'aide à la décision par les arboriculteurs, d'amples investigations (augmentation du nombre d'observations par des études pluriannuelles).

Les relations sous-jacentes entre la température et le développement des insectes sont mises en œuvre avec des modèles linéaires ou non linéaires pour chaque étape du cycle de vie (en fonction de la meilleure approximation). Les taux de développement temporels sont pour la plupart implémentés avec des modèles linéaires, alors que ceux non linéaires sont utilisés pour les taux de reproduction et la survie des adultes (Samietz *et al.*, 2007). Chez les pucerons, la relation de l'accroissement intrinsèque des populations avec les températures suit, au cours de la saison, une tendance non linéaire (Xie *et al.*, 2014) comme c'est le cas dans notre étude. Toutes ces relations ont jusque-là été établies pour certaines espèces phytophages, dont *D. plantaginea*, seulement en conditions contrôlées du laboratoire (Graf *et al.*, 2006).

La croissance des pommiers est fortement affectée par la température. En effet, nous avons trouvé une interaction significative et positive entre la croissance végétative et les températures (minimales-maximales et moyennes). À l'inverse de la dynamique du puceron, la relation de dépendance température-croissance des pousses est de type linéaire dotée d'une forte corrélation. En effet, selon Davidson *et al.* (2015), il existe souvent une relation linéaire entre la croissance végétative, mais elle peut varier en fonction du stade de croissance spécifique et de la plage exacte de température. Chez le pêcher, Kervella *et al.* (1995) précise que le nombre de feuilles produites sur un axe augmente avec les unités thermiques accumulées sur les pousses principales.

En général, à mesure que les températures augmentent dans la plage optimale de 5 à 26 °C ($T^{\circ}C$ moyenne : 12-15°C), la croissance des pommiers s'accélère (Gautier, 2001). Cependant, une fois que les températures dépassent le seuil supérieur (ou au-dessous du seuil minimum), la croissance peut ralentir, voire s'arrêter (Teskey *et al.*, 2015).

Les différents processus de croissance végétale (photosynthèse, allocation et translocation) sont affectés par plusieurs facteurs (photopériode, nutrition minérale,...) mais dépendent fortement de la température.

En effet, les enzymes qui sont impliquées dans les processus biochimiques de la photosynthèse fonctionnent mieux dans une certaine plage de température optimale, comme chez le pommier, elle se situe entre 15 et 35°C et un optimum de 30°C (Marini et Marini, 1983).

Les plantes peuvent affecter leur allocation (distribution entre les organes) de nutriments et d'énergie en réponse aux changements de température, par exemple, en investissant plus dans la croissance lorsque la température est propice à la croissance ou en allouant plus de ressources à la défense contre les insectes phytophages, en particulier les pucerons. Les températures plus élevées peuvent accélérer le mouvement de la sève (translocation), tandis que les températures plus basses peuvent ralentir ce processus. Cependant, si les températures sont trop élevées ou trop basses, cela peut également nuire à la capacité de la plante à transporter des nutriments efficacement (Teskey *et al.*, 2015 ; Charrier *et al.*, 2021).

Ces différentes étapes du processus de croissance végétative du pommier peuvent être affectées par le puceron cendré. Ce dernier affecte en particulier la capacité photosynthétique des feuilles (réduction de la vitesse), l'allocation des ressources (réduction des nutriments) et la quantité de nutriments disponibles pour la croissance et le développement de différentes parties de la plante. Ces préjudices peuvent, selon l'intensité de l'infestation, entraîner une réduction de la croissance et de la vigueur.

Grâce au modèle développé dans cette étude, on pourra prédire l'accroissement journalier des pousses végétatives en se basant sur les températures. Bien qu'il puisse faire l'objet d'amples développements, ce modèle de prédiction constituera un bon outil pour la surveillance des populations de *D. plantaginea*.

***Conclusion générale
et perspectives***

Conclusion générale et perspectives

En Algérie, la production fruitière intensive, en expansion, subit un usage excessif de pesticides et d'engrais chimiques, perturbant ainsi l'équilibre de l'écosystème. Dans ce contexte, le concept de la production fruitière intégrée (PFI) apparaît comme une alternative à l'usage irraisonné des intrants chimiques. Cette problématique nécessite des approches innovantes qui mettent en avant les pratiques agroécologiques, où le verger occupe un rôle central. Dans les systèmes de production intensive, les interactions pommier-bio agresseur peuvent être influencées par les méthodes culturales.

Cette thèse a permis, dans l'ensemble, d'apporter de nouvelles connaissances concernant cette problématique. Les résultats obtenus ont permis de confirmer que la sélection de la taille d'hiver et de la fertilisation azotée comme méthodes culturales était pertinents pour mieux comprendre le fonctionnement du système pommier - *D. plantaginea*. En outre, ces résultats ont contribué à affiner et a confirmé les hypothèses formulées au début de cette thèse, tout en soulignant la nécessité d'investigations approfondies pour mieux comprendre la complexité des interactions plantes - insectes.

Nos résultats indiquent que la gestion de la taille et de la fertilisation azotée affectent la dynamique des populations de *D. plantaginea*, tout en assurant une croissance végétative optimale pour les arbres, qu'ils soient jeunes ou adultes. Ce travail de recherche a permis d'identifier les types de relations entre le puceron cendré et le pommier, sous l'influence de l'intensité de la taille et du régime azoté. En effet, les effets de ces facteurs se sont traduits par une réponse parabolique de la dynamique des pucerons, tandis que la croissance végétative a montré une réponse linéaire. La croissance des pousses végétatives et l'indice d'infestation présentent une corrélation directe avec l'intensité de taille et les doses d'azoté appliquées.

Les résultats expérimentaux obtenus en plein champ ont révélé que les pommiers soumis à une forte intensité de taille ont présenté des pousses plus longues et un plus grand nombre de feuilles, ce qui a conduit à une augmentation de la densité des pucerons. Ces résultats s'alignent avec l'hypothèse du stress pulsé des plantes (PSH) et celle de la vigueur des plantes (PVH).

Les pucerons, présents pendant une période de six semaines, ont connu une phase optimale d'abondance (mi-juin) suivie d'une phase de déclin (fin juin). Le succès de l'infestation est principalement attribuable à la sensibilité du cultivar Gala et à l'alignement de la phénologie des arbres avec le cycle de vie de *D. plantaginea*. À la fin de la saison, l'analyse des dommages a montré que le taux d'enroulement des feuilles était significativement lié à l'intensité de la taille et à l'indice d'infestation, ce qui a affecté la croissance végétative finale et les caractéristiques des fruits. Le rendement en fruits augmente lorsque l'intensité de la taille et le taux d'infestation par les pucerons diminue.

Cependant, l'infestation a considérablement réduit la charge fructifère et le rendement en fruits par arbre, sans porter atteinte au poids et au diamètre des fruits frais. En conséquence, nous avons émis l'hypothèse que, bien qu'un niveau élevé de taille puisse stimuler la croissance végétative, il pourrait nuire au rendement en raison de son impact sur la fructification.

Notre étude a également révélé que les températures maximales ambiantes journalières, dont la plupart étaient supérieures au seuil optimal de développement, ont provoqué une mortalité notable des pucerons. Cependant, la croissance des populations était plus tôt significativement influencée par les températures minimales. Alors que la croissance végétative des pommiers a été influencée par les températures minimales, maximales et moyennes. Néanmoins, la température minimale a eu un effet beaucoup plus prononcé sur la croissance des pousses que sur celle des pucerons.

En conditions contrôlées, les jeunes pommiers, soumis aux mêmes conditions de croissance, ont répondu de manière significative aux traitements par les doses croissantes d'azote. À la fin de la saison, le régime azoté a eu un impact notable sur la longueur des pousses, le nombre moyen de feuilles par pousse, mais pas sur le diamètre du tronc. Les résultats montrent que les doses élevées d'azote de confort (100 %) et intermédiaire (75 %) ont favorisé une dynamique accrue des pucerons, corrélée avec une croissance importante des pousses. Ce résultat s'aligne avec l'hypothèse de la vigueur des plantes (PVH). Toutefois, avec un degré d'infestation inférieur à celui de la dose de confort, la dose intermédiaire a démontré les meilleurs résultats de croissance végétative. Cela suggère, par conséquent, qu'une réduction de la dose d'apport de confort de 25 % pour les jeunes pommiers Gala au printemps pourrait être avantageuse et met en évidence l'importance d'une gestion équilibrée de la nutrition minérale.

Il est plausible de supposer que l'association d'une gestion hydrique adéquate et d'une fertilisation équilibrée contribuerait positivement à la résilience des pommiers face aux infestations de pucerons.

Les résultats obtenus dans le présent travail mettent en évidence le rôle crucial des méthodes culturales dans la lutte contre *D. plantaginea*. Cependant, une analyse approfondie à l'aide de méthodes et de perspectives interdisciplinaires permettrait de mieux comprendre l'ensemble des facteurs en interaction au sein de l'agroécosystème du verger.

En effet, la réalisation d'expériences pluriannuelles, en considérant tous les paramètres agissant dans l'agroécosystème du pommier (culturales, biotiques, abiotiques), serait pertinente. Cela permettrait une évaluation plus fidèle aux réalités du verger, où des interactions trophiques complexes se déroulent. En effet, les interactions plantes - insectes sont fortement influencées par la qualité de l'hôte et les conditions environnementales. Sur la base de nos résultats, des études comparatives devraient être menées dans d'autres systèmes de culture (extensifs et super-intensifs). Il serait également pertinent d'envisager l'efficacité de la combinaison des trois approches méthodologiques (écologique, biologique, chimique).

Bien que les résultats obtenus dans cette étude sur les interactions du système pommier-puceron cendré avec l'intensité de la taille et les températures, ont permis d'élaborer des modèles de prédiction préliminaires, nous suggérons d'approfondir les travaux de recherche vers le développement d'outils d'aide à la décision adaptée à chaque système de culture. Les modèles de prédiction élaborés dans cette étude, concernant le système pommier - puceron cendré, méritent d'être affinés. Par conséquent, nous recommandons d'approfondir les recherches pour développer des outils d'aide à la décision, utiles aux arboriculteurs et adaptés à chaque système de culture.

Enfin, pour répondre aux changements climatiques qui pourraient perturber le système pommier-puceron, nous suggérons d'étudier, dans des conditions contrôlées, l'impact du régime de température constant et variable sur le comportement de *D. plantaginea*, ainsi que sur le développement du pommier.

Références
Bibliographiques

Références Bibliographiques

- Abdessemed S, Fellak A, Abdessemed A, Khan A. 2022. Status, challenges and opportunities for apple production in the Eastern Algeria. Hort Sci, 49: 147-153.
- Albarracín V, Antonio J. Hall B, Peter S. Searles a, M. Cecilia Rousseaux.2017. Responses of vegetative growth and fruit yield to winter and summer mechanical pruning in olive trees. Sci. Hortic, 225(18):185-194
- Albarracína V, Hall AJ, Searles PS, Rousseaux MC. 2017. Responses of vegetative growth and fruit yield to winter and summer mechanical pruning in olive trees. Sci Hortic., 225:185-194.
- Almeida GK, Fioravanço, JC. 2018. Yield of 'Royal Gala' apple trees in response to pruning before or after leaf drop. Pesq agropec, Bras 53(4) : 427-434.
- Androuin M. 2021. Évaluation des extraits végétaux et de plante de services dans la gestion du puceron cendré du pommier en Agriculture Biologique et en Protection Fruitière Intégrée. Mémoire d'ingénieur de l'École nationale supérieure des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage, agrocampus, France, 76 p.
- Angeli, G. and Simoni, S. 2006. Apple cultivars acceptance by *Dysaphis plantaginea* Pass. (Homoptera : Aphididae). Journal of Pest Science, 79: 175-179.
- Arnaoudov V, Kutinkova H. 2006. Susceptibility of some apple cultivars to infestation by rosy apple aphid (*Dysaphis plantaginea* PASS., Homoptera: Aphididae). J Fruit Ornam Plant Res.,14(3):137-142.
- Aroun MF, Doumandji-Mitiche B, Petit D, Djazouli Z. 2015. Temporal variations in the life cycles of aphids (Sternorrhyncha: Aphididae) and their coccinellid predators. Eur J Entomol, 112 (3) : 432-439.
- Aubertot J.N., J.M. Barbier, A. Carpentier, J.J. Gril, L. Guichard, P. Lucas, S. Savary, I. Savini, M. Voltz. 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA et Cemagref (France), 64 p.
- Audemard H. 1987. Lutte biologique et intégrée en vergers de pommiers, poiriers et abricotiers. Entomophaga 32, 59 -71.
- Awmack CS, Leather SR. 2002. Host plant quality and fecundity in herbivorous insects. Annu. Rev. Entomol. 47, 817-44.

- Bala K, AK Sood, Vinay S.P. and Sudeshna T. 2018. Effect of plant nutrition in insect pest management: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(4): 2737-2742.
- Bale J S, Tatchell G M. 1995. Aphids in a changing climate. In: Harrington R and Stork N E (ed.) *Insects in a changing environment*, Academic Press, London, pp. 125-155.
- Banfield-Zanin, J.A., Rossiter, J.T., Wright, D.J., Leather, S.R. & Staley, J.T. 2012. Predator mortality depends on whether its prey feeds on organic or conventionally fertilised plants. *Biological Control*, 63 : 56 - 61.
- Barbagallo S, Giuseppe C, Piero C, and S Komazaki. 2007. IPM case studies: Deciduous fruit trees. In book: *Aphids as Crop Pests* (pp.663-675)Edition: I, Chapter: 29. IPM Case Studies: Deciduous Fruit TreePublisher: CAB InternationalEditors: H.F. van Emden & R. Harrington.
- Barden JA, DelValle TBG, Myers SC. 1989. Growth and fruiting of ‘Delicious’ apple trees as affected by severity and season of pruning. *J Amer Soc Hort Sci*, 114:184-186.
- Bardner R and Fletcher K E. 2009. Insect infestations and their effects on the growth and yield of field crops: a review. *Bull Entomol Res*, 64(1) :141-160.
- Barzman M., Bàrberi, P., Birch, A.N.E. et al. 2015. Eight principles of integrated pest management. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 1199-1215.
- Bazoche, P., Combris, P., Giraud-Héraud, E., Seabra Pinto, A., Bunte, F., & Tsakiridou, E. 2014. Willingness to pay for pesticide reduction in the EU: nothing but organic?. *European Review of Agricultural Economics*, 41(1), 87-109.
- Bellon S, de Sainte MC, Lauri PE, Navarette M, Nesme T, Plénet D, Pluvinage J, Habib R. 2006. La production fruitière intégrée: le vert est-il dans le fruit? *Le Courrier de l’Environnement de l’INRA*, Paris, 5-18.
- Belsky, A J. 1986. Does herbivory benefit plants? A review of the evidence. *Amer Natur*, 127:870– 892.
- Benettayeb, Z.E., 1993. *Biologie et écologie des arbres fruitiers*. Ed. O.P.U., Alger, 140 p.
- Bernays E., 2001. Neural limitations in phytophagous insects: implications for diet breadth and evolution of host affiliation. *Annu. Rev. Entomol.*, 46, 703-727.
- Bevacqua D, Génard M, Lescourret F. 2012. A Simple Model to Predict the Probability of a Peach (*Prunus persicae*) Tree Bud to Develop as a Long or Short Shoot as a Consequence of Winter Pruning Intensity and Previous Year Growth. *PLoS ONE*, 7(12): e52185.
- Birch, L. 1948. The Intrinsic Rate of Natural Increase of an Insect Population. *The Journal of Animal Ecology*, 1 : 15-26.

- Blackman R.L, Eastop V.F. 2000. Aphids on the world's crops: an identification and information guide. Aphids Worlds Crops Identif. Inf. Guide.
- Bloesch, B. et Viret, O., 2013. Revue suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture, 45 (2): 128-131.
- Blommers LHM, Helse, HHM, Vaal FWNM. 2004. Life history data of the rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Pass.) (Homopt., Aphididae) on plantain and as migrant to apple. J Pest Sci, 77: 155 -163.
- Blommers LHM. 1999. Probing the natural control of rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Hemiptera: Aphididae). IOBC/ WPRS Bull, 22:53-56.
- Boller EF, Avilla J, Joerg E, Malavolta C, Wijnands FG, Esbjerg P. 2004. Integrated Production. Principles and Technical Guidelines, 3rd edition. IOBC/WPRS Bull, 27.
- Bonato, M.; Martin, E.A.; Cord, A.F.; Seppelt, R.; Beckmann, M. et al. 2023. Applying generic landscape-scale models of natural pest control to real data: associations between crops, pests and biocontrol agents make the difference', Agriculture, Ecosystems & Environment 342, 108215.
- Bonaventure G. 2012. Perception of insect feeding by plants. Plant Biol (Stuttg), 14(6):872-880.
- Bonnemaison, L. 1959. Le puceron cendré du pommier (*Dysaphis plantaginea* Pass.) - Morphologie et biologie - Méthodes de lutte. Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Série C (Epiphyties 10), 257 - 322.
- Braham M, Amor N, 2018. Effect of pruning severity on the vegetative growth, density and population dynamics of the Spirea aphid, *Aphis spiraeicola* in Citrus orchard. J Entomol Zool Stud, 6(1) :311–319.
- Braham M, Boulahia-Kheder S, Kahia M, Nour S. 2023. Aphids and citrus responses to nitrogen fertilization. J. Saudi Soc. Agric. Sci, 22 (6) : 374-383.
- Braendle C, Davis G.K, Brisson J.A, & Stern D.L. 2006. Wing dimorphism in aphids. Heredity, 97(3), 192-199.
- Bretaudeau J.1978. Atlas d'arboriculture fruitière.. Ed. J.B. Baillière & Fils. Paris,02,173 p.
- Brown A.E. 2008. Variability in abundance of the rosy apple aphid (*Dysaphis plantaginea*), the role of its alternate host (*Plantago major*), and potential control strategies in organic apple orchards in British Columbia. Doctoral dissertation, University of British Columbia.
- Brown M.W. and Mathews C.R. 2007. Conservation Biological Control of Rosy Apple Aphid, *Dysaphis plantaginea* (Passerini), in Eastern North America. Environ Entomol, 36 (5):1132-1139.

- Burdon FJ, Munz NA, Reyes M, Focks A, Joss A, Rasanen K, Altermatt F, Eggen RIL, Stamm C. 2019. Agriculture versus wastewater pollution as drivers of macroinvertebrate community structure in streams. *Sci Total Environ*, 659:1256-1265.
- Bürgel K, Daniel C, & Wyss E. 2005. Effects of autumn kaolin treatments on the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* (Pass.) and possible modes of action. *Journal of Applied Entomology*, 129(6), 311-314
- Bussi C, Lescourret F, Genard M. and Habib R. 2005. Pruning intensity and fruit load influence vegetative and fruit growth in an early-maturing peach tree (cv. Alexandra). *Fruits*, 60(2): 133- 142.
- Bussi, C., Corroyer, N., Fauriel, J., Girard, T., Simon, S., 2006. Nutrition azotée du pommier et puceron cendré *Dysaphis plantaginea*. In: Simon, S., Bussi, C., Thierry, G., Corroyer., N., (eds.). *Arboriculture biologique: 11 années d'expérimentation en vergers de pêchers et pommiers*. INRA, Unité Expérimentale de Recherche Intégrée de Gothenon, 40–41.
- Cahenzli F, Sigsgaard L, Daniel C, Herz A, Lamar L, Kelderer M et al. 2019. Perennial fower strips for pest control in organic apple orchards—a pan-European study. *Agric Ecosyst Environ.*,278:43–53.
- Cao H-H, Zhang Z-F, Wang X-F, Liu T-X. 2018. Nutrition versus defense: Why *Myzus persicae* (green peach aphid) prefers and performs better on young leaves of cabbage. *PLoS ONE*, 13(4) : e0196219.
- Cazals C. 2009. Qualités et innovations environnementales dans la viticulture et l'arboriculture fruitière : l'apport des mondes de production. *Revue d'économie industrielle*, 126 : 31-52.
- Charrier G, Pallas B, Ngao. J. 2021. Le fonctionnement écophysologique des espèces fruitières : une diversité de processus. *Les productions fruitières à l'heure du changement climatique - Risques et opportunités en régions tempérées*, Éditions Quae, France, 464 p.
- Choudhary K., 1 B. B. Dhakare and N. K. Meena. 2020. Vegetative and quality parameters of custard apple as affected by pruning intensities and time. *J. crop weed*, 16(2): 139-146.
- Chouinard, G. 2001. *Guide de gestion intégrée des ennemis du pommier*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Québec, 234 p.
- Chown S.L, Chown S, Nicolson S, Nicolson D. of Z. and E.S.W., 2004. *Insect Physiological Ecology : Mechanisms and Patterns*. OUP Oxford.

- Cocco A, Mercenaro L, Muscas E, Mura A, Nieddu G, Lentini A. 2021. Multiple Effects of Nitrogen Fertilization on Grape Vegetative Growth, Berry Quality and Pest Development in Mediterranean Vineyards. *Horticulturae*, 7 (12):530.
- Cross J.V, Bonauer A, Bondio V, Clemente J, Denis J, Grauslund J, Huguet, et al. 1996. The status of integrated pome fruit production in Western Europe and its achievements. *Acta Horti*, 422, 2-10.
- Damos P, Escudero LA, Ioriatti CC. 2015. Integrated Fruit Production and Pest Management in Europe : The Apple Case Study and How Far We Are From the Original Concept?. *Insects*, 6: 626-657.
- Davidson A, Da Silva D, Quintana B, & DeJong T. M. 2015. The phyllochron of *Prunus persica* shoots is relatively constant under controlled growth conditions but seasonally increases in the field in ways unrelated to patterns of temperature or radiation. *Sci. Horti*, 184 :106-113.
- De Berardinis E, Baronio P, Baumgärtner J. 1994. The effect of aphid (*Dysaphis plantaginea* Pass., Hom. Aphididae) feeding on apple fruit growth. *Ecol Model*, 72:115-127.
- Deguine JP, Penvern S. 2014. Agroecological Crop Protection in Organic Farming: Relevance and Limits. In: Bellon, S., Penvern, S. (eds) *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*. Springer, Dordrecht.
- Delorme, R., Auge, D., Touton, P., Villatte, F., 1997. Résistance de *Dysaphis plantaginea* à divers produits insecticides en France. ANPP-4ème conférence internationale sur les ravageurs en agriculture, Montpellier, 45–52.
- Denoirjean T, Doury G, Cornille A, Chen X, Hance T, Ameline A. 2021. Genetic structure of *Malus sylvestris* and potential link with preference/performance by the rosy apple aphid pest *Dysaphis plantaginea*. *Sci Rep*, 1(11)5732.
- Dib H, Ben Issa R, Sauphanor B & Capowiez Y. 2017. Feasibility and efficacy of a new approach for controlling populations of the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera: Aphididae) in southeastern France, *International Journal of Pest Management*, 63:2, 128-137.
- Dib H, Simon S, Sauphanor B, Capowiez Y. 2010. The role of natural enemies on the population dynamics of the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* (Passerini) (Hemiptera: Aphididae) in organic apple orchards in south-eastern France. *Biol Control*, 55: 97–109.
- Dib H. 2010. Rôle des ennemis naturels dans la lutte biologique contre le puceron cendré, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera aphididae) en vergers de pommiers. These de doctorat, Université d'Avignon, France, 253p.

- Dieudonné E, Gautier H, Dardouri T, Staudt M, Costagliola G & Gomez L. 2022. Establishing repellent effects of aromatic companion plants on *Dysaphis plantaginea*, using a new dynamic tubular olfactometer. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 170: 727-743.
- Dixon A.F.G, Kindlmann P. and Sequeira R. 1996. Population regulation in aphids. In: Floyd, R.B., Sheppard, A.W. and de Barro, P.J. (eds) *Frontiers of Population Ecology*. CSIRO Publishing, Melbourne, 103–114.
- Dixon AFG. 1985. Structure of aphid populations. *Annu Rev Entomol*, 30: 155-174.
- Dul P, Benjamin P, B ; Lauri PE. 2019. Le pommier en agroforesterie, analyse du climat lumineux à partir de scènes Lidar-T et relation avec le développement du pommier. INRAE, France, 69 p.
- Dulov, M.I. 2022. Production and Export-Import Deliveries of Apples in the Countries of the world. *Topical Issues of Science and Modern Society, Monograph*; Gulyayev, G.Y., Ed.; Nauka i Prosveshcheniye: Penza, Russia : 252-264.
- El Titi, A., E.F. Boller, J.P. Gendrier, 1993. *Integrated production : principles and technical*
- Eurostat 2022. Agri-environmental indicator - consumption of pesticides. European Union statistics, Data 2011–2020, Eurostat Report 2022.
- FAOSTAT 2020. Pesticide use. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP/visualize>.
- FAOSTAT 2021. Cultures et produits animaux. <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/QCL>.
- Filajdić N, Sutton TB, Walgenbach JF, Unrath CR. 1995. The influence of the apple aphid/spirea aphid complex on intensity of alternaria blotch of apple and fruit characteristics and yield. *Plant Dis.*, 79:691-694.
- Forister M.L, Novotny V, Panorskae A.K, Bajed L, Basse L, et al. 2015. The global distribution of diet breadth in insect herbivores. *Ecology*, 112(2) : 442 -447.
- Forrest, J.M.S., Dixon, A.F.G., 1975. The induction of leaf-roll galls by the apple aphids *Dysaphis devecta* and *D. plantaginea*. *Annals of Applied Biology* 81, 281–288.
- Faccioli et al., 1985, 35 p.
- Forshey, CG, Marmo, CA. 1985. Pruning and Deblossoming Effects on Shoot Growth and Leaf Area of ‘McIntosh’ Apple Trees. *J. A m e r. So c .Ho r t Sci .*, 110(2): 128-132.
- Frechette B, Cormier D, Chouinard G, Vanoosthuyse F, Lucas E. 2008. Apple aphid, *Aphis* spp. (Hemiptera: Aphididae), and predator populations in an apple orchard at the non-bearing stage: The impact of ground cover and cultivar. *Eu J Entomol*, 105 (3): 521-529.

- Fumey D, Lauri PE, Guédon Y, Godin C, Costes E. 2011. Effects of pruning on the apple tree: from tree architecture to modeling. *Acta Horti*, 903 : 597-602.
- Gagui, F, Laamari M, Chaouches T, & Merzoug,D. 2023. Aphids and their parasitoid Hymenoptera in Oum El Bouaghi Province (Algeria). *Bulletin de la Société Zoologique de France*, 148 (2) : 47- 54.
- Gautier M. 2001. La culture fruitière. Les productions fruitières. Volume 2. Edition. Technique et Documentation. Paris, 665 p.
- Giraud H., Cornille A., Giraud T. 2014. Les pérégrinations du pommier domestique. *Pour la Science*, 439:36-41.
- Graf B, Höpli H, Höhn H, Samietz J. 2006. Temperature effects on egg development of the rosy apple aphid and forecasting of egg hatch. *Entomol Exp Appl*, 119(3):207-211.
- Grechi I , Hilgert N, Sauphanor B, Senoussi R , Lescourret F. 2010. Modelling coupled peach tree–aphid population dynamics and their control by winter pruning and nitrogen fertilization. *Ecol. Model*, 221 :2363-2373.
- Grechi I, Sauge MH ,Sauphanor B, Hilgert N, Senouci R, Lescourret F. 2008. How does pruning affect peach-Mysus persicae interactions?. *Entomol Exp Appl* 128 (3) :369 – 379.
- Grechi I, Vivin P, Hilbert G, Milin S, Robert T, Gaudillere J.-P. 2007. Effect of light and nitrogen supply on internal C:N balance and control of root-to-shoot biomass allocation in grapevine. *Environ. Exp. Bot*, 59, 139 -149.
- Guerrieri E, Digilio MC. 2008. Aphid-plant interactions : a review. *J Plant Interact*, 3(4) : 223-232.
- Guettala F.N. 2009. Entomofaune, Impact Economique et Bio- Ecologie des Principaux Ravageurs du Pommier dans la région des Aurès. Thèse de doctorat, université de Batna, 178p.
- Guillemaud T, Blin A, Simon S, Morel K, Franck P. 2011. Weak Spatial and Temporal Population Genetic Structure in the Rosy Apple Aphid, *Dysaphis plantaginea*, in French Apple Orchards. *PLoS ONE* 6(6): e21263.
- Hallmann C. A., Sorg M., Jongejans E., Siepel H., Hofland N., Schwan H., et al ., 2017. More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PloS one* 12, e0185809.
- Haltrich A, Papp J, Fail J. and Kis L. 2000. Effect of nitrogen-fertilizers and apple cultivars on aphids under ipm treatment conditions. *Acta Horti*, 525, 209-216.

- Han P, Desneux N, Becker C, Larbat R, Le Bot J, Adamowicz S, Zhang J, Lavoit AV. 2019. Bottom-up effects of irrigation, fertilization and plant resistance on *Tuta absoluta*: implications for Integrated Pest Management. *J. Pest Sci.* 92, 1359-1370.
- Hoffland E, Dicke M, Van Tintelen W, Dijkman H, Van Beusichem M.L. 2000. Nitrogen availability and defence of tomato against two-spotted spider mite. *J. Chem. Ecol.* 26, 2697–2711.
- Holb IJ, Gonda I, Bitskey K. 2001. Pruning and incidences of diseases and pests in environmentally oriented apple growing systems: some aspects. *Int. J. Hortic. Sci.* 7:24-29.
- Hoque MN, Hosen MI, Hannan A. 2022. Effect of Branch Pruning on the Flowering, Fruiting and Insect-Pest Infestation of Dragon Fruit Varieties (*Hylocereus* sp.). *Journal of Agriculture, Food and Environment*, 3 (1): 10-14.
- Horlings LG, Marsden TK. 2011. Towards the real green revolution? Exploring the conceptual dimensions of a new ecological modernisation of agriculture that could 'feed the world'. *Global Environ Chang.* 21:441–452.
- Houacine E, 2023. Etude Agronomique Et Écologique Du Système : « Olivier-bioagresseur » Cas de L'olive Sigoise dans La Région de Mascara. Thèse de doctorat, université de Mascara, 205p.
- Houacine E, Elouissi M, Harizia A, Elouissi A, Saharaoui L. 2022. Study of the interaction between the olive tree pests and their natural enemies. *Journal of Entomological Research*, 46 (1) : 13-23.
- Huberty AF, Denno R F. 2004. Plant water stress and its consequences for herbivorous insects: a new synthesis. *Ecology*, 85:1383–1398.
- Huey R.B, Stevenson R.D. 1979. Integrating Thermal Physiology and Ecology of Ectotherms: A Discussion of Approaches. *Am. Zool.* 19, 357-366.
- Hullé M, Turpeau E, Leclant F, Rahn M-J. 1998. Les pucerons des arbres fruitiers : cycles biologiques et activités de vol. Paris : Association de Coordination Technique Agricole : Institut National de la Recherche Agronomique.
- Hunt R .1978. *Plant Growth Analysis*. Edward Arnold Ltd, London, 26-38.
- Iglesias I, Alegre S. 2006. The effect of anti-hail nets on fruit protection, radiation, temperature, quality and profitability of 'Mondial Gala' apples. *J Appl Hortic*, 8 : 91-100.
- Ikinci A. 2014. Influence of Pre- and Postharvest Summer Pruning on the Growth, Yield, Fruit Quality, and Carbohydrate Content of Early Season Peach Cultivars. *Sci World J*, ID 104865. .

- INRAA.2006. Rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture.Ed. Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie, 68 p.
- Ismail M, Brooks M. 2016. The impact of geographical origin of two strains of the herbivore, *Eccritotarsus catarinensis*, on several fitness traits in response to temperature. *J. Therm. Biol*, 60, 222–230.
- Ismail M. K, Vriamont A, Thierry Hance T, Albittar L. 2022. Thermal tolerance of the rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* and its parasitoids: Effect of low temperatures on some fitness activities of *Aphidius matricariae*. *Journal of Thermal Biology*, 110 : 103377.
- Jackson, J. E. 2003. Biology of apples and pears. Cambridge University Press, Cambridge, 25p.
- Jacobsen SK, Sørensen H, Sigsgaard L. 2022. Perennial flower strips in apple orchards promote natural enemies in their proximity. *Crop Pot.*, 156:105962.
- Jensen JE. 2015. Perspectives on the implementation of IPM in EU- the advisory perspective. Paper given at IPM innovation in Europe, Poznan, Poland January 15-17.
- Jie Z, Yuncong Y, Streeter J.G. and Ferree D.C. 2010. Influence of soil drought stress on photosynthesis, carbohydrates and the nitrogen and phosphorus absorb in different section of leaves and stem of Fuji/M.9EML, a young apple seedling. *African Journal of Biotechnology*, 9(33) :5320-5325.
- Jonkers, H., 1979. Biennial bearing in apple and pear: a literature survey. *Sciencia Horticulturae*, 11:303-317.
- Jorquera-Fontena E, Alberdi M, Franck N. 2014. Pruning severity affects yield, fruit load, fruit, and leaf traits of 'Brigitta' blueberry. *J Soil Sci Plant Nutr*, 14(4) : 855–868.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., DÜRR C., *et al.* 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude, Inra, France, 60 p.
- Kaith, N S, Sharma, U, Sharma, D D, Mehta, D K. 2011. Effect of different pruning intensities on growth, yield and leaf nutrients status of starking delicious apple in hilly region of Himachal Pradesh. *Int J Farm Sci* 1(1) : 37– 42.
- Kappel F. and Harvey A.Q.1992. Orchard training systems influence early canopy development and light microclimate within apple tree canopies. *Canadian journal of plant science*, 23: 237-248.
- Kariñho-Betancourt E. & Nuñez-Farfán J. 2015. Evolution of resistance and tolerance to herbivores: testing the trade-off hypothesis. *Peer J*, 3 :e789.

- Katis N.I, J.A, Tsitsipis, M. Stevens, Powell G. 2007. Transmission of Plant Viruses, in: H.F. van Emden, R. Harrington (Eds.), *Aphids as Crop Pests*, CABI, London, pp. 353-377.
- Kervella, J., Pagès, L., & Génard, M. 1995. Growth context and fate of axillary meristems of young peach trees.) influence of parent shoot growth characteristics and of emergence date. *Annals of Botany*, 76 : 559-567.
- Kindlmann P, Vojtech J et Dixon A.F.G. 2007. Population Dynamics. *Aphids as Crop Pests*. CAB International, 311-329.
- King C, Jacob U. S, Herlandier F. 2006. The influence of water deficiency on the relationship between canola (*Brassica napus* L.), and two aphid species (Hemiptera: Apiiididae), *Lipaphis erysimi* (Kaltenbrach) and *Brevicoryne brassicae* (L.). *Aust. J. Ecol* A. R, 57: 439-445.
- Korban, S.S, Skirvin, R.M., 1984. Nomenclature of the cultivated apple. *Hortscience* 19(2): 177-180.
- Kührt U, Samietz J, Dorn S. 2006. Effect of plant architecture and hail nets on temperature of codling moth habitats in apple orchards. *Entomol Exp Appl* 118 : 245-259.
- Kuster T, Eicher O, Leumann L, Müller U, Poulet J et Rutishauser R. 2017. La fertilisation en arboriculture. *Recherche Agronomique Suisse* 8 (6), 20 p.
- Kviklys D, Viškelis J, Liaudanskas M, Janulis V, Laužikė K, Samuolien G, Uselis N, Lanauskas J. 2022. Apple fruit growth and quality depend on the position in tree canopy. *Plants*, 11(2):196.
- Laamari M, Jousselin E, Cœur d'acier A. 2009. Assessment of aphid diversity (Hemiptera: Aphididae) in Algeria: a fourteen-year investigation. *Entomol faun*, 62 (2): 73-87.
- Laamari M, S.T. Chaouche, C.W. Halimi, S. Benferhat, S.B. Abbes, N. Khenissa & P. Starý. 2012. A review of aphid parasitoids and their associations in Algeria (Hymenoptera: Braconidae: Aphidiinae; Hemiptera: Aphidoidea). *African Entomology*, 20(1): 161-170.
- Laget E, Guadagnini M, Plenet D, Simon S, Assié G, Billote B, Borioli B. et al. 2015. Guide pour la conception de systemes de production fruitiere éonomques en produits phytosanitaires. *GIS Fruits et Ministere de l'agriculture*, Paris, 264p.
- Laghfiri M.I, Madan I, A.J. Boutaleb, A. Blenzar M.O. Jordan . 2017. Etude de l'impact du deficit hydrique et azote sur les infestations de *Myzus persicae* (sulzer) dans le verger du pêcher. 6ème conférence sur les moyens alternatifs de protection pour une production intégrée. Lille – 21, 22 ET 23 mars 2017.

- Lange OL, Green ATG, Melze B, Meyer A, Zellner H; 2006; Water relations and CO₂ exchange of the terrestrial lichen *Teloschistes capensis* in the Namib fog desert: measurements during two seasons in the field and under controlled conditions. *Flora* 201:268-280.
- Larrieu J.F. 2019. Guide fertilisation raisonnée en arboriculture fruitière. Agriculture et territoire, Chambre d'Agriculture de Tarn-et-Garonne, France, 44p.
- Lauri P.E et J.M. Lespinasse.1999. La conduite du pommier en France : concepts actuels et implications pratiques. *Fruits*, 54 (6) : 441-449.
- Lauri PE et Laurens F.2005. Architectural types in apple (*Malus X domestica* Borkh.). In "Crops: growth, quality and biotechnology". Ramdane Dris (Ed.), World Food Limited, Helsinki, Finlande, 1300-1314.
- Lauri PE. 2007. Architecture de l'arbre fruitier - de la morphologie des plantes à l'agronomie. Biologie végétale. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. France.
- Lauri, P. É., B. Pitchers, L. Dufour, and S. Simon. 2020. Apple farming systems - current initiatives and some prospective views on how to improve sustainability. *Acta Horticulturae*, 1281: 307–322.
- Laužikė K, Uselis N, Kviklys D, Samuolienė G. 2020. Orchard planting density and tree development stage affects physiological processes of apple (*Malus domestica* Borkh) tree. *Agronomy*,10(12):1912.
- Le Roux X, Lacoïnte A, Escobar-Gutiérrez A, and Le Dizès S. 2001. Carbon-based models of individual tree growth: A critical appraisal. *Ann. For. Sci.*, 58 : 469-506.
- Lee KM, Gilmore DF. 2006. Statistical Experimental Design for Bioprocess Modeling and Optimization Analysis. *Appl Biochem Biotechnol*, 135(2):101–16.
- Legave JM. 2021. Les productions fruitières à l'heure du changement climatique: Risques et opportunités en régions tempérées. Editions Quae, 464 p.
- Lespinasse J.M., La conduite du pommier. II - L'axe vertical, La rénovation des vergers, L'Inpfluc, Paris, 120 p.
- Lobell D.B. & Gourdji S.M., 2012. The influence of climate change on global crop productivity. *Plant Physiol.*, 160 : 1686-1697.
- Lobit P, Soing P, Génard M, Habib R. 2001. Effects of timing of nitrogen fertilization on shoot development in peach (*Prunus persica*).trees, *Tree Physiol*, 20, 35 -42.

- Lodolini E.M, S. Polverigiani, T. Cioccolanti, A. Santinelli, D. Neri. 2019. Preliminary Results about the Influence of Pruning Time and Intensity on Vegetative Growth and Fruit Yield of a Semi-Intensive Olive Orchard. *Journal of Agricultural Science and Technology*: 21 (4):969-980.
- Lodolini E.M, S. Polverigiani, V. Giorgi, F. Famiani, D. Neri. .2023. Time and type of pruning affect tree growth and yield in high-density olive orchards. *Sci. Hortic*, 311(1) 111831.
- Lombarkia N, S Derridj, E Bourguet, C Ioriatti.2013. Effect of a granulovirus larvicide, Madex®, on egg-laying of *Cydia pomonella* L.(Lepidoptera: Tortricidae) due to changes in chemical signalization on the apple leaf surface. *African Entomology*,21(2) : 196-208.
- López-Carretero A., Díaz-Castelazo C., Boege K. & Rico-Gray V., 2014. Evaluating the spatio-temporal factors that structure network parameters of plant-herbivore interactions. *PLoS One*, 9(10), e110430.
- Mabberley D & Jarvis C. & Juniper, B. 2001. The name of the apple. *Telopea*. 9(2) : 421-430.
- MADRP. 2017. Index des produits phytosanitaires à usage agricole. Ed. Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche.230p.
- Mahi T, A Harizia, A Benguerai,, T Canelo, R Bonal . 2021. Assessment and forecast of damages caused by *Cydia pomonella* in apple orchards of Northern Africa (Algeria). *Bulletin of Insectology* 74 (1): 139-146.
- Mahi T. 2022. Dynamique spatiale et degat du carpocapse des pommes et des poires *Cydia pomonella* (Lepidoptera : Tortricidae) dans la region de Sidi Bel Abess. These de doctorat. Université de Mascara.
- Malik G, Chaturvedi R, Hooda S. 2021. Role of Herbivore-Associated Molecular Patterns (HAMPs) in Modulating Plant Defenses. In: Singh, I.K., Singh, A. (eds) *Plant-Pest Interactions: From Molecular Mechanisms to Chemical Ecology*. Springer, Singapore.
- Marini R.P et Marini, C. M. 1983. Seasonal changes in specific leaf weight, net photosynthesis, and chlorophyll content of peach leaves as affected by light penetration and canopy position. *J. Am. Soc. Hortic. Sci*, 108: 600–605.
- Marini R.P. 2014. Training and Pruning Apple Trees. Virginia Polytechnic Institute and State University, 9 p.
- Marquier A. et Balandier B. 2000. Influence de l'intensité de la taille de formation et de l'élagage sur la croissance en diamètre des branches de noyers hybrides. *Ingénierie- , Cemagref EAT*,22 : 63-73.

- Martinez JJY, Wool D. 2003. Differential response of trees and shrubs to browsing and pruning: the effects on *Pistacia* growth and gall-inducing aphids. *Plant Ecology*, 169, 285-294.
- Massonnet, C. 2004. Variabilité architecturale et fonctionnelle du Système aérien chez le pommier (*Malus domestica* Borkh.): comparaison de quatre cultivars par une Approche de modélisation structure-fonction. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 281p.
- Matyjaszczyk, E. 2019. Problems of implementing compulsory integrated pest management. *Pest Management Science*, 75 (8) : 2063-2067.
- Mdellel L, Ben Halima Kamel M & Assadi B. 2015. Impact of winter pruning of pomegranate trees on *Aphis punicae* (Hemiptera, Aphididae) and its natural enemies in Tunisia. *Ann. Soc. Entomol. Fr*, 51(3):1-6.
- Mebdoua S, Lazali M, Ounane S.M, Tellah S, Nabi F, Ounane G. 2017. Evaluation of pesticide residues in fruits and vegetables from Algeria. *Food Addit Contam: Part B*, 10: 91-98.
- Médiène S, Pagès L, Jordan MO, Le Bot J, Adamowicz S. 2002. Influence of nitrogen availability on shoot development in young peach trees [*Prunus persica* (L.) Batsch]. *Trees*, 16 : 547-554
- Mehri H & Crabbé J. 2002. Processus de croissance et d'organogenèse chez le pommier cv Golden Delicious», *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 6(2) : 39-49.
- Mercier V, Bussi C, Greil, M.L, I. Ricavy, P. Blanc, et al. 2016. Evaluation de systèmes de cultures arboricoles à bas niveaux d'intrants et transfert aux arboriculteurs. *Innovations Agronomiques*, 49,49-58.
- Mészáros M, Lañar L, Sus J, Náměstek J. 2017. Comparison of two training methods applied to apple trees trained to slender spindle during the first years after planting. *Acta Univ Agric Silvic Mendelianae Brun*, 65 : 1241–1245.
- Mika A, Wawrzyńczak P, Buler Z, Krawiec A, Białkowski P, Michalska B, et al. 2011. Results of experiments with densely-planted sour cherry trees for harvesting with a continuously moving combine harvester. *J Fruit Ornam Plant Res*, 19(2): 31–40.
- Millard P. et Grelet G.A. 2010. Nitrogen Storage and Remobilization by Trees: Ecophysiological Relevance in a Changing World. *Tree Physiology*, 30: 1083-1095.
- Miñarro M, Dapena E. 2007. Resistance of Apple Cultivars to *Dysaphis plantaginea* (Hemiptera: Aphididae): Role of Tree Phenology in Infestation Avoidance. *Environ Entomol* 36 (5): 1206-1211.

- Miñarro M, Dapena E. 2001. Predators of the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* (Pass.), in Asturian (NW Spain) apple orchards. Integrated Fruit Production IOBC/wprs Bulletin, (5) : 241 – 245.
- Moon DC & Stiling P. 2004. The influence of a salinity and nutrient gradient on coastal vs. upland tritrophic complexes. Ecology, 85: 2709-2716.
- Mullins D., 2015. Physiology of environmental adaptations and resource acquisition in cockroaches. Annu. Rev. Entomol., 60 : 473-492.
- Neilsen D et Neilsen G.H. 2002. Efficient use of nitrogen and water in high-density Apple Orchards. HortTechnology, 12(1) : 19-25.
- Neilsen D, G. H. Neilsen S, Guak, P. Parchomchuk, and E. J. Hogue. 2002. Management of water and nitrogen in high-density apple orchards. Compact Fruit Tree, 35: 92-96.
- Nelder JA, Wedderburn RWM. 1972. Generalized linear models. Stat Soc Ser Serie A, 135 (3): 370–384.
- Nicolas A, Dagbert T, Goff G.L. Hance T. 2013. La lutte biologique contre le puceron cendré du pommier par des lâchers d'auxiliaires en verger, 34 p.
- O'Rourke, D. 2003. World production, trade consumption and economic outlook for apples. Pages 15-29 in D. C. Ferree, I. J. Warrington, dir. Apples: Botany, production and uses. CABI Publishing, CAB International, Wallingford, Royaume-Uni, 15 -29.
- Oswald CJ, Brewer MJ. 1997. Aphid-barley interactions mediated by water stress and barley.
- Park E, Cho M, Ki, CS. 2009. Correct Use of Repeated Measures Analysis of Variance. Korean J Lab Med, 29(1): 1-9.
- Peck G, Merwin IA. 2009. A Grower's Guide to Organic Apples. Cornell University, Ithaca.
- Pérez H, N, Rachid T, Bouhraoua T, Boukreris F, Benia F, Khelil M.A, Juli Pujade V. 2012. New aphid records (hemiptera aphididae) from Algeria and the northern Africa. REDIA, XCV: 31-34.
- 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.
- Petit S, Lescourret S. 2019. La biodiversité au cœur des agroécosystèmes : où en sommes-nous aujourd'hui ? Innov Agron, 75:15-27.
- Peusens G, Buntinx L, Gobin B. 2006. Parasitism of the parasitic wasp *Ephedrus persicae* (Froggatt) on the rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Passerini). Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences Ghent University, 71, 369-374.

- Pincebourde S, Sinoquet H, Combes D. et Casas J. 2007. Regional Climate Modulates the Canopy Mosaic of Favourable and Risky Microclimates for Insects. *Journal of Animal Ecology*, 76: 424- 438.
- Pole V, Missa I, Rubauskis E, Kalva E. and Kalva S. 2017. Effect of Nitrogen Fertiliser on Growth and Production of Apples in the Conditions of Latvia" *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*,.71(3) :115-120.
- Price P W. 1991. The plant vigor hypothesis and herbivore attack. – *Oikos*, 62: 244 -251.
- Qian, G.Z., Liu, L.F., Tang, G.G., 2010. Proposal to conserve the name *Malus domestica* against *M. pumila*, *M. communis*, *M. frutescens*, and *Pyrus dioica* (Rosaceae). *Taxon* 59(2): 650-652.
- Qubbaj T, Reineke A, Zebitz CPW. 2005. Molecular interactions between rosy apple aphids, *Dysaphis plantaginea* and resistant and susceptible cultivars of its primary host *Malus domestica*. *Entomol Exp Appl*, 115:145 -152.
- Quisenberry, S.S. and X. Ni. 2007. Feeding injury, in : H. van Emden, R. Harrington (Eds.), *Aphids as Crop Pests*, CABI, U.K, 331-352.
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Rat-Morris E. 1993. Development of rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* Pass, on a tolerant apple cultivar 'Florina'. *IOBC/WPRS Bull*, 16: 91–100.
- Rieger M. 2006. Introduction to fruit crops. Food Products Press, Binghamton. CRC Press, 520 p.
- Robinson J.P, Harris, S.A, Juniper, B.E., 2001. Taxonomy of the genus *Malus* Mill. (Rosaceae) with emphasis on the cultivated apple, *Malus x domestica* Borkh. *Plant. Syst. Evol.* 226: 35-58.
- Roche L. 2017. Le pommier à l’horizon 2020-2030 : préparer aujourd’hui le verger de demain. STIFL centre de Lanxade, France, 323, 34-41.
- Rodrigues M.A, Coelho V, Arrobas M, Gouveia E, Raimundo S, Correia C.M, Bento A. 2019. The effect of nitrogen fertilization on the incidence of olive fruit fly, olive leaf spot and olive anthracnose in two olive cultivars grown in rainfed conditions. *Sci. Hortic*, 256(15), 108658.
- Rousselin A, Bevacqua D, Sauge MH, Lescourret F, Mody K, Jordan MO. 2017. Harnessing the aphid life cycle to reduce insecticide reliance in apple and peach orchards. A review. *Agron Sustain Dev*, 37(38): .1-17.

- Rousselin A, Bevacqua D, Vercambre G, Sauge M, Lescourret F, Jordan M. 2018. Rosy apple aphid abundance on apple is shaped by vegetative growth and water status. *Crop Prot*, 105, 1–9.
- Rousselin A, Marie-Helene Sauge, Jordan M.O. 2017a. Dispositif de caractérisation simultanée de l'abondance de pucerons et de la croissance végétative d'arbres fruitiers. *Cahier des Techniques de l'INRA, N° Spécial : Entomologie*, 149-156.
- Rousselin A, Sauge MH, Jordan MO, Vercambre G, Lescourret F, Bevacqua D. 2016. Nitrogen and water supplies affect peach treegreen peach aphid interactions: the key role played by vegetative growth. *Agric For Entomol*, 18: 367-375.
- Rühmann C, Bannert M, Treutter D. 2002. Relationship between Growth, Secondary Metabolism, and Resistance of Apple. *Plant Biol*.4, 137–143.
- Rustagi A, Chugh S, Sharma S, Kumari P, Kumar D. 2021. Plant–Insect Interaction: A Proteomic Approach in Defence Mechanism. In: Singh, I.K., Singh, A. (eds) *Plant-Pest Interactions: From Molecular Mechanisms to Chemical Ecology*. Springer, Singapore. 57-72.
- Saguez J. 2007. Disturbance of chitinase activities : New perspectives in aphid populations managment. Thèse de Doctorat de l'Université de Picardie Jules Verne, France, 149p.
- Sahraoui L, et Gourreau JM.1998. Les coccinelles d'Algérie: inventaire préliminaire et regime alimentaire. *Bulletin de la société entomologique de France*, 103(3) :213-224.
- Samietz B, Graf H, Höhn L Schaub and Höpli H. U. 2007. Phenology modelling of major insect pests in fruit orchards from biological basics to decision support: the forecasting tool SOPRA. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 37, 255–260.
- Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG. 2019. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biol Conserv*, 232:8–27.
- Santamaria, M. E., Arnaiz, A., Gonzalez-Melendi, P., Martinez, M., and Diaz, I. 2018. Plant perception and short-term responses to phytophagous insects and mites. *Int. J. Mol. Sci*, 19:1356.
- Sauge, M. H., I. Grechi & J. L. Poëssel. 2010. Nitrogen fertilization effects on *Myzus persicae* aphid dynamics on peach: Vegetative growth allocation or chemical defence. *Entomol. Exp. Appl*, 136: 123 -133.
- Sauphanor B, Simon S, Boisneau C, Capowiez Y, Rieux R, Bouvier JC, Defrance H, Picard C, Toubon JF. 2009. Protection phytosanitaire et biodiversité en agriculture biologique. Le cas des vergers de pommiers. *Innov Agron* 4:217 – 228.
- Sauvion Ni, Calatayud PA, Thiéry D, Marion-Poll F. 2013. *Interactions insectes-plantes*. IRD Marseille (France) Éditions/Quae, 1ère édition, 784 p.

- Schaub L, Bloesch B, Grat B. et Höhn H. 1995. Puceron cendré et des galles rouges du pommier. *Revue. Suisse de Vit. Arb. Hort.*, 2: 94- 95.
- Schellhorn N.A, Harmon J.P. and Andow D.A. 2000. Using Cultural Practices to Enhance Insect Pest Control by Natural Enemies. In: *Insect Pest Management: Techniques for Environmental Protection*. edited by Jack E. Rechcigl and Nancy A. Rechcigl. pp148-163
- Schupp JR, Winzeler HE, Kon TM, Marini RP, Baugher TA, Kime LF, Schupp MA. 2017. A method for quantifying whole-tree pruning severity in mature tall spindle apple plantings. *HortScience*, 52(9):1233-1240.
- Sheahan M, Barrett CB, Goldvale C. 2017. Human health and pesticide use in Sub-Saharan Africa. *Agric Econ*, 48:27–41.
- Simon S, Alaphilippe A, Borne S, Fleury A, Galet A, et al. 2018. Méthodologie et expérimentation système pour la réduction de l'utilisation des pesticides en vergers de pommier. *Innovations Agronomiques*, 70 :73-86.
- Simon S, Brun L, Guinaudeau J, Sauphanor B. 2011. Pesticide use in current and innovative apple orchard systems. *Agron Sustain Dev*, 31:541–555.
- Simon, S, Morel K, Durand E, Brevalle G, Girard T et al. 2012. Aphids at crossroads : when branch architecture alters aphid infestation patterns in the apple tree. *Trees*, 26 : 273–282.
- Stacey D.A. et Fellowes M.D.E. 2002. Influence of temperature on pea aphid *Acyrtosiphon pisum* (Hemiptera: Aphididae) resistance to natural enemy attack. *Bull. Entom. Res*, 92, 351-357.
- Stephan J, Lauri PE, Dones N, Haddad N, Talhouk SN, Sinoquet H. 2007. Architecture of the pruned tree: Impact of contrasted pruning procedures over 2 years on shoot demography and spatial distribution of leaf area in apple (*Malus domestica*). *Ann Bot*, 99 (6) :1055–1065.
- Stewart-Jones A, Pope TW, Fitzgerald JD, Poppy GM. 2008. The effect of ant attendance on the success of rosy apple aphid populations, natural enemy abundance and apple damage in orchards. *Agric Entomol.*, 10:37-43.
- Stoeckli S, Mody K, Dorn S. 2008. *Aphis pomi* (Hemiptera: Aphididae) population development, shoot characteristics, and antibiosis resistance in different apple genotypes. *J Econ Entomol*, 101:1341–1348.
- Suchocka M, Swoczyna T, Kosno-Jończy J, Kalaji HM. 2021. Impact of heavy pruning on development and photosynthesis of *Tilia cordata* Mill. *Trees*, PLoS ONE 16(8):e0256465.

- Sus J, Zeinerová R, Zíka L. 2018. Influence of the pruning system on the growth and productivity of slender spindle apple trees. Hort Sci, 45 (2): 55–63.
- Szücs E. and Kállay T. 2008. Interaction of nutrient supply and crop load of apple trees (*Malus domestica* Borkh.). International Journal of Horticultural Science, 14(1- 2):33-35.
- Tariq M, Wright DJ, Rossiter JT, Staley JT. 2012. Aphids in a changing world: testing the plant stress, plant vigour and pulsed stress hypotheses. Agric. For. Entomol., 14 : 177-185
- Teskey R, Wertin T, Bauweraerts I, Ameye M, McGuire M. A. & Steppe K. 2015. Responses of tree species to heat waves and extreme heat events. Plant, Cell and Environment, 38 : 1699-1712.
- Toubon J.F., Sauphanor B., Sainte Marie De C., Plénet D., Habib R. 2001. Status of Integrated production in French apple orchard. Integrated Fruit Protection. IOBC/WPRS Bulletin, 24 (5) : 27-32.
- Tougeron K, Ferrais L, Renard M.E, Hance T. 2021. Effects of constant versus fluctuating temperatures on fitness indicators of the aphid *Dysaphis plantaginea* and the parasitoid *Aphidius matricariae*. Insects, 12.
- Tremblay E. 1988. Entomologia applicata. Liguori Editore, Ercolano Napoli Italy, 7^{ème} édition, vol 1, 284 p.
- Trillot, M., Masseron, A., Mathieu, V., Bergougnaux, F., Hutin, C. et Yves, L., 2002. Le pommier. Centre technique interprofessionnelle des fruits et légumes. (CTIFL). Edition Lavoisier. Paris, 287p.
- Trotta V, Calboli F.C.F, Ziosi M, Guerra D, Pezzoli M.C, David J.R. et Cavicchi S. 2006. Thermal plasticity in *Drosophila Melanogaster*: a comparison of geographic populations. BMC Evolutionary Biology, 6, 67.
- Valiuškaitė, A., Uselis, N., Kviklys, D., Lanauskas, J., Rasiukevičiūtė, N. 2017. Effect of sustainable plant protection and apple tree management on fruit quality and yield. Zemdirbyste-Agric. 104 (4), 353-358.
- Varn M, Pfeiffer G. 1989. Effect of Rosy Apple Aphid and Spirea Aphid (Homoptera: Aphididae) on Dry Matter accumulation and carbohydrate concentration in young Apple Trees. J Econ Entomol, 82 (2): 565-569.
- Varn M. W., 1987. The effects of aphids on the growth of young apple trees. PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 165 p.
- Vaysse P, Reynier P, Raynal Lacroix C, Freixinos E, Soing P. 2000. Nutrition du pommier. Chronologie des consommations, Infos-Ctifl 162 : 30 -32.

- Verdugo J.A, Frédéric Francis, Claudio C. Ramírez 2016. A review on the complexity of insect-plant interactions under varying levels of resources and host resistance: the case of *Myzus persicae*-*Prunus persica*. *Biotechnol.Agron.Soc.Eviron*,20(4) :533-541.
- Verma JP. 2015. Repeated Measures Design for Empirical Researchers; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA.
- Wang G, Yuan DY, Zou F, Xiong H, Zhu ZJ, Liu ZQ, Ouyang F. 2017. Effects of different pruning intensity on leaf physiology and yield in *Castanea henryi*. *Plant Physiol J.*, 53:264-272
- White TCR. 1984. The abundance of invertebrate herbivores in relation to the availability of nitrogen in stressed food plants. *Oecologia*, 63, 90-105.
- Willaume M, Lauri PÉ, Sinoquet H. 2004. Light interception in apple trees influenced by canopy architecture manipulation. *Trees* 18:705–713.
- Witzell J & Shevtsova A. 2004. Nitrogen-induced changes in phenolics of *Vaccinium myrtillus*: implications for interaction with a parasitic fungus. *J. Chem. Ecol* ,30: 1937–1956.
- Wyckhuys, K.A.G., Tang, F.H.M. & Hadi, B.A.R. 2023. Pest management science often disregards farming system complexities. *Commun Earth Environ*, 4, 223.
- Xie, H., Zhao, L., Wang, W., Wang, Z., Ni, X., Cai, W. and He, K. 2014. Changes in Life History Parameters of *Rhopalosiphum maidis* (Homoptera: Aphididae) under Four Different Elevated Temperature and CO₂ Combinations. *J. Econ. Entomol*, 107(4): 1411-1418.
- Yadav, S.P.S., Adhikari, R., Bhatta, D. et al. 2023. Initiatives for biodiversity conservation and utilization in crop protection: A strategy for sustainable crop production. *Biodivers Conserv*, 32(14), 4573- 4595.
- Zhang L, Koch AB, Wang X N, Jiang Y X. 2018. A review of pruning fruit trees. 2nd International Workshop on Renewable Energy and Development. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 153: 062029.
- Zhao Z-H, Reddy GVP, Hui C, Li B. 2016. Approaches and mechanisms for ecologically based pest management across multiple scales. *Agric Ecosyst Environ* 230:199- 209.
- Zvereva EL, Lanta V, Kozlov MV. 2010. Effects of sap-feeding insect herbivores on growth and reproduction of woody plants: a meta-analysis of experimental studies. *Oecologia*, 163:949-960.

Annexes

Tableau S1. Importance de la culture du pommier dans la région de Mascara

Année	Superficie (Ha)		Production (qx)
	Complantée	Rapport	
2012	1371.00	1126.00	39.300
2013	1278.00	1086.00	56.600
2014	1171.00	1031.00	38.458
2015	1138.50	1037.50	48.500
2016	1135.00	1046.00	52.702
2017	577,50	552,00	36.800
2018	434,00	407,50	29.100

Tableau S2. Programme de protection phytosanitaire du verger expérimental de pommiers (année 2019)

TYPE	Matière active	Nom commercial	Dose	Nuisible visé	Date d'application
Fongicide	Diféconazole	Score	0.30L/ha	Tavelure/Oïdium	21/05
Insecticide	Fénoxycarbe	Insegar	30g/hl	Carpocapse/ovicide	26/05
Fongicide	Diféconazole	Score	0.30L/ha	Tavelure/Oïdium	29/05
Insecticide	Teflubenzuron	Nomolt	0.30L/ha	Carpocapse/larvicide	02/06
Insecticide	Fénoxycarbe	Insegar	30g/hl	Carpocapse/ovicide	11/06
Insecticide	Teflubenzuron	Nomolt	0.30L/ha	Carpocapse/larvicide	20/06
Acaricide	Tébufenpyrad	MASAI	0.5Kg/ha	Araignées	29/06
Acaricide	Tébufenpyrad	MASAI	0.5Kg/ha	Araignées	08/07
Fongicide	Pyraclostrobine	BELLIS	0.8Kg/ha	Maladies de conservation	27/07
	+ Boscalid				

Tableau S3. Statistique descriptive entre l'effectif de pucerons calculé ($N t$) et estimé par le modèle de prédiction

Effectif puceron	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
Calculé ($N t$)	49	0,00	177,49	72,93	60,72
Estimé (prédit)	49	1,00	178,49	74,25	60,39
N valide (liste)	49				

Tableau S4. Evolution hebdomadaire de la proportion de feuilles de pommiers enroulées (%) en fonction de l'intensité de taille

IP	1j	7j	14j	21j	39j	55j
HP	0	0	12,5	12,56	14,42	14,58
HP	0	5,45	9,64	9,45	10,13	12,06
HP	0	6,8	7,03	10,73	11,69	11,84
MP	0	2,5	4,17	6,25	4,56	5,08
MP	0	2,27	3,7	6,78	5,71	7,5
MP	0	0	3,33	7,35	6,33	5,56
LP	0	0	3,12	4,54	5,12	5,93
LP	0	2,22	2,63	3,35	3,92	5,88
LP	0	1,94	2,38	2,08	5,17	5,41

Tableau S5. Evolution temporelle de la longueur moyenne des pousses (cm $\pm$ SE) des pommiers infestés par *D. plantaginae* (AI) et des arbres non infestés par le puceron (NAI) soumis aux différentes intensités de taille LP, MP et HP

Jour après infestation artificielle						
Traitement	0	1	14	28	42	56
AI -HP	0	10,09 $\pm$ 0,26	14,03 $\pm$ 0,34	18,34 $\pm$ 0,46	21,95 $\pm$ 0,55	22,92 $\pm$ 0,53
NAI-HP	0	8,75 $\pm$ 0,20	14,32 $\pm$ 0,26	22,26 $\pm$ 0,62	30,46 $\pm$ 0,33	32,18 $\pm$ 0,97
AI-MP	0	6,29 $\pm$ 0,26	8,0 $\pm$ 0,34	10,19 $\pm$ 0,46	13,95 $\pm$ 0,51	14,67 $\pm$ 0,53
NAI-MP	0	8,32 $\pm$ 0,20	9,17 $\pm$ 0,26	10,34 $\pm$ 0,62	11,75 $\pm$ 0,33	12,01 $\pm$ 0,97
AI-LP	0	4,10 $\pm$ 0,26	5,57 $\pm$ 0,34	6,92 $\pm$ 0,46	10,08 $\pm$ 0,52	10,59 $\pm$ 0,53
NAI-LP	0	7,74 $\pm$ 0,20	8,84 $\pm$ 0,26	10,29 $\pm$ 0,62	11,55 $\pm$ 0,33	11,71 $\pm$ 0,97

Tableau S6. Evolution temporelle du nombre moyen de feuilles par pousses ($\pm$ SE) (moyenne de 10 pousses/arbre) pour les traitements AI et NAI soumis aux différentes intensités de taille :LP, MP et HP.

Jour après infestation artificielle							
Traitement	0	1	14	28	42	56	70
AI -HP	0	8,93 $\pm$ 0,22	11,17 $\pm$ 0.24	12,23 $\pm$ 0.26	13,33 $\pm$ 0.30	11,90 $\pm$ 0.32	10,63 $\pm$ 0.31
NAI-HP	0	9.55 $\pm$ 0.31	12.25 $\pm$ 0.40	14.65 $\pm$ 0.26	15.95 $\pm$ 0.27	17.10 $\pm$ 0.29	17.10 $\pm$ 0.29
AI-MP	0	3,17 $\pm$ 0.22	4,47 $\pm$ 0.24	6,03 $\pm$ 0.27	7,87 $\pm$ 0.30	6,60 $\pm$ 0.32	5,4 $\pm$ 0.31
NAI-MP	0	4.80 $\pm$ 0.24	5.85 $\pm$ 0.24	7.20 $\pm$ 0.19	8.85 $\pm$ 0.23	9.05 $\pm$ 0.22	9.05 $\pm$ 0.22
AI-LP	0	2,17 $\pm$ 0.22	3,23 $\pm$ 0.24	4,6 $\pm$ 0.26	6,67 $\pm$ 0.30	5,93 $\pm$ 0.32	5,30 $\pm$ 0.31
NAI-LP	0	4.0 $\pm$ 0.27	5.25 $\pm$ 0.20	6.70 $\pm$ 0.16	7.65 $\pm$ 0.23	8.05 $\pm$ 0.11	8.05 $\pm$ 0.11

Tableau S7. Evolution temporelle de l'abondance moyenne par pousse des populations de *D. plantaginea* sur les pommiers en fonction de l'intensité de taille (LP, MP et HP).

Jour après infestation artificielle	HP	MP	LP
0	0	0	0
1	10 $\pm$ 0	10 $\pm$ 0	10 $\pm$ 0
7	17,43 $\pm$ 2,06	20,3 $\pm$ 2,06	15,67 $\pm$ 2,06
14	62,8 $\pm$ 6,06	54,7 $\pm$ 6,06	42,97 $\pm$ 6,06
21	148 $\pm$ 8,93	78,1 $\pm$ 8,93	52,57 $\pm$ 8,93
28	326,9 $\pm$ 16,15	146,7 $\pm$ 16,15	58,87 $\pm$ 16,15
35	247,33 $\pm$ 14,87	116,03 $\pm$ 14,87	50,57 $\pm$ 14,87
42	30,7 $\pm$ 3,20	13,37 $\pm$ 3,20	5,77 $\pm$ 3,20
48	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0

Tableau S8. Effet temporelle du traitement N % sur le diamètre du tronc

Jour	1	14	28
Dose N %			
100	16,52 $\pm$ 0,49	16,58 $\pm$ 0,49	17,44 $\pm$ 0,49
75	17,36 $\pm$ 0,78	17,43 $\pm$ 0,78	18,31 $\pm$ 0,66
50	16,22 $\pm$ 0,73	16,28 0,72	16,93 $\pm$ 0,74
0	15.49 $\pm$ 1.89	15.55 $\pm$ 1.84	16.14 $\pm$ 1.60

Tableau S9. Données des températures – min et max °C) journalières en 2019

Date	T°Cmin	T°Cmax	T°Cmin	T° max	
13/05/2019	12,2	28,5	09/06/2019	16,1	29
14/05/2019	9,7	26,9	10/06/2019	14,9	28
15/05/2019	12,3	31,6	11/06/2019	13,1	28,8
16/05/2019	15,9	30,3	12/06/2019	15,3	28,9
17/05/2019	13,7	24,6	13/06/2019	16,3	33,2
18/05/2019	12,9	23,9	14/06/2019	16,8	28,9
19/05/2019	12,3	21,5	15/06/2019	16,3	30,4
20/05/2019	12,8	27,8	16/06/2019	16,8	31
21/05/2019	14,5	27,6	17/06/2019	17,7	30,2
22/05/2019	13,9	29,4	18/06/2019	18,2	33,1
23/05/2019	13,4	31,8	19/06/2019	18,1	34,3
24/05/2019	15,6	29,3	20/06/2019	19,6	33,5
25/05/2019	14,4	23,1	21/06/2019	17,3	31,2
26/05/2019	14,1	25,4	22/06/2019	17,2	31,1
27/05/2019	13,6	29,3	23/06/2019	18,2	31,7
28/05/2019	16,8	33,3	24/06/2019	17,9	34
29/05/2019	14,3	27,8	25/06/2019	17,5	34,7
30/05/2019	12,2	27,9	26/06/2019	20,3	38,3
31/05/2019	12,4	30,3	27/06/2019	19,5	38,8
01/06/2019	13,5	30,8	28/06/2019	20,6	39,9
02/06/2019	14,1	30,8	29/06/2019	21,9	40,9
03/06/2019	15,1	32,2	30/06/2019	21,3	34,5
04/06/2019	16,7	34,5			
05/06/2019	16,3	26,4			
06/06/2019	14,7	32,2			
07/06/2019	14,8	29,3			
08/06/2019	16,9	30,5			

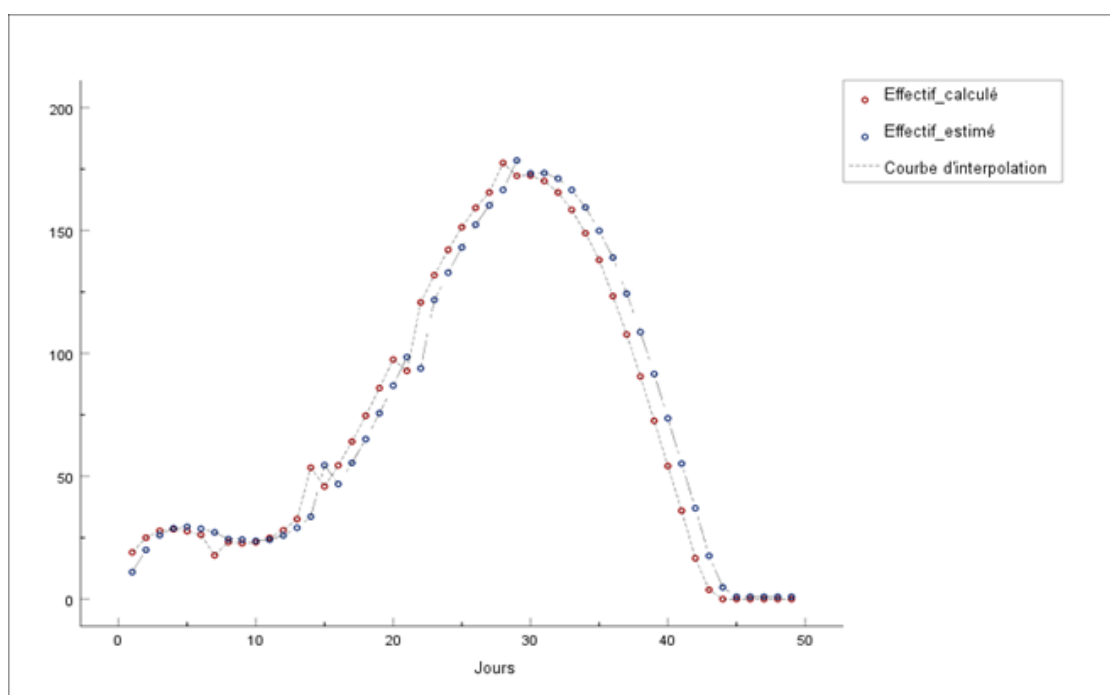
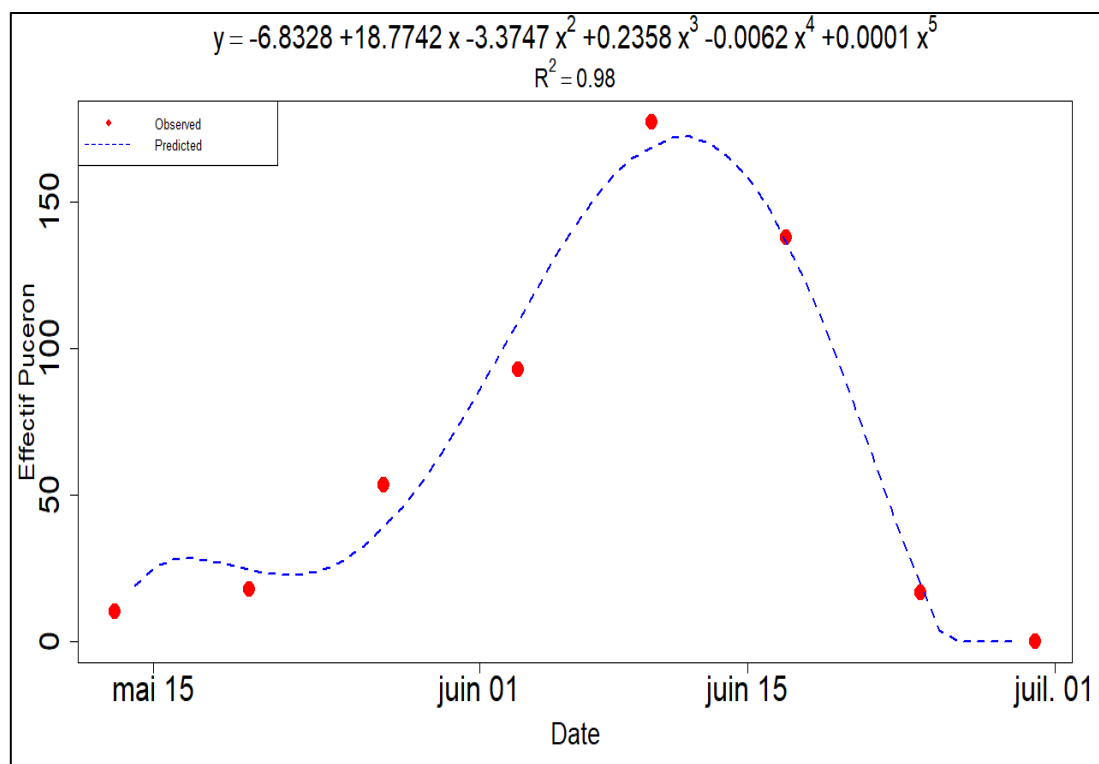


Figure S1. (a) Modélisation de la dynamique temporelle de *D. plantaginea* et (b) comparatif entre les effectifs de pucerons estimés (prédits) et calculée (N_t) par jour.

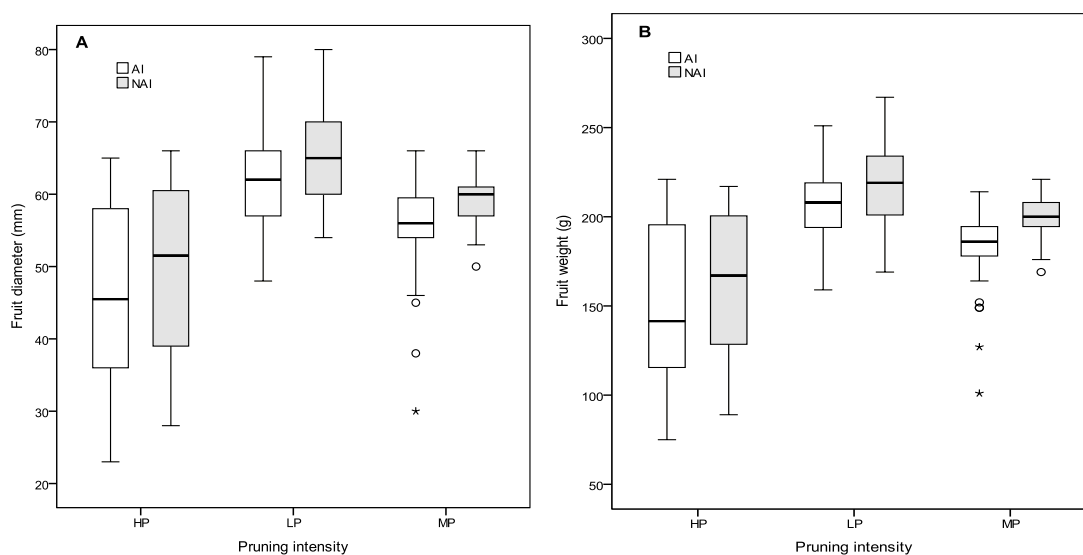


Figure. S 2 Boxplot distribution of fruit diameter and fruit weight of fruits sampled on apple trees of (A) *Dysaphis plantaginae* aphid- infested apple trees (AI) and (B) non aphid infested trees (NAI) under low (LP), medium (MP), and high (HP) pruning intensity.

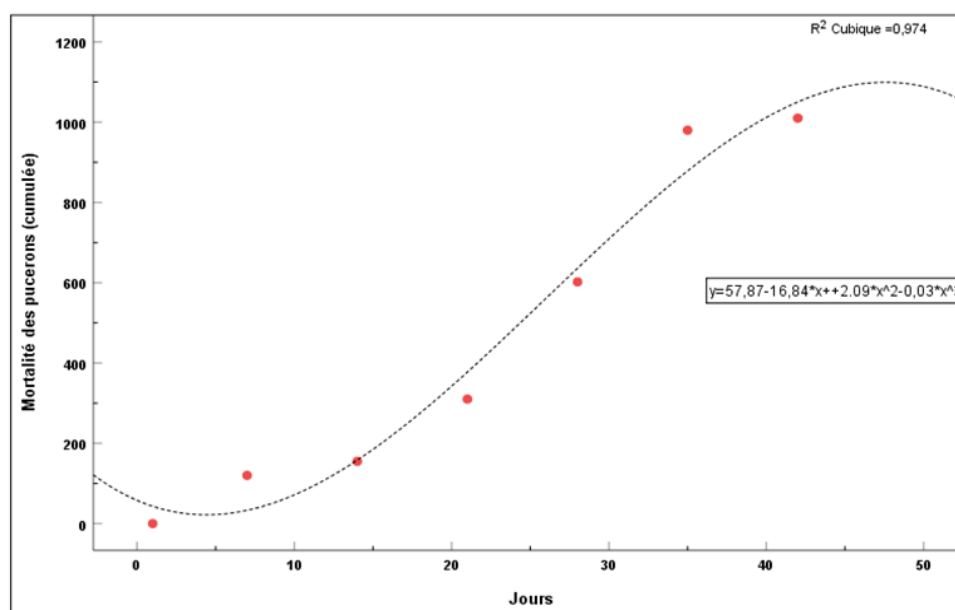


Figure S 3. Modèle de régression polynomiale (d'ordre 3) de la mortalité des pucerons en fonction du temps ($R^2 = 0,974$; $F = 29,65$; $p = 0,004$). Chaque point représente le nombre de pucerons morts par semaine.



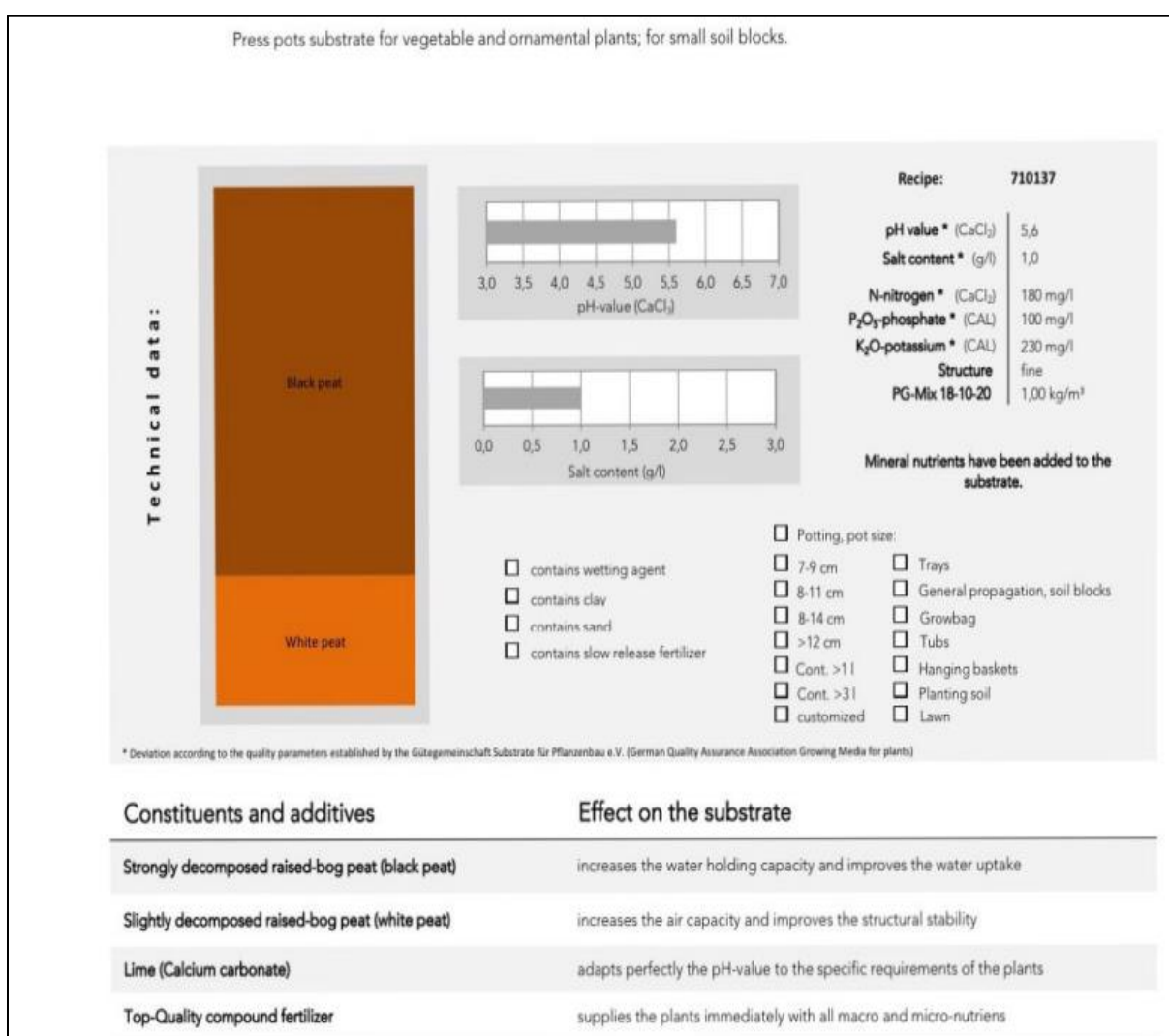
Verger de pommiers Gala et colonie de *Dysaphis plantaginea*



Colonie de Dysaphis plantaginea et enroulement des feuilles du pommier sous serre



Plante hôte secondaire de *D. plnataginea* : *Plantago* sp, dans la région de Mascara



Caractéristiques du substrat plantaflor composé de tourbe améliorée utilisée pour la croissance des plants de pommiers

الأسمدة الصلبة

ENGRAIS SOLIDES

NForce40
progressive nitrogen release
N 30 + 10 SO₃

NForce 40 engrais organo-minéral azoté de couverture représente une véritable alternative aux engrais azotés communs.

L'azote est présenté sous 04 formes différentes pour satisfaire les besoins nutritionnels des cultures et minimiser les pertes par évaporation et lessivages dans le sol.

La combinaison de l'azote avec les acides humiques augmente les capacités d'assimilation du système racinaire.

Stimule à travers l'action de l'azote, la synthèse des protéines en améliorant la qualité des protéines.

La présence du soufre soluble améliore la synthèse des protéines en favorisant la formation des acides aminés soufrés.

Assure une couverture nutritionnelle de 90 jours à 120 jours selon les conditions climatiques.

آن فورس 40
N 30 + 10 SO₃

سماد أزوتي عضوي غطائي.

يمثل بديلاً حقيقياً للأسمدة الأزوتية المتداولة.

يوفر التغطية الغذائية بين 90 و 120 يوماً حسب ظروف الطقس.

أزوت يتم تقديمه في 04 أشكال مختلفة لتلبية الاحتياجات الغذائية للمحاصيل الزراعية و تقليل الخسائر من خلال التبخر و الرش في التربة.

مزيج الأزوت مع الأحماض الدبالية يزيد من القدرة الاستيعابية لنظام الجذور.

يحفز من خلال عمل الأزوت و تخليق البروتين عن طريق تحسين نوعية البروتين.

وجود الكبريت القابل للذوبان يحسن تركيب البروتينات من خلال تشجيع تشكيل الأحماض الأمينية.

Composition Chimique		الخصائص الكيميائية
Azote (N) total		30 %
dont N ammoniacal	3 %	أزوت كيميائي
N uréique	24 %	أزوت اليوريا
N ureaform	2 %	أزوت اليوريا
N organique	1 %	أزوت عضوي
Trioxys de soufre (SO ₃) soluble		10 %
Carbone (C) d'origine biologique		7,5 %
		أكسيد الكبريت (SO ₃) الكربون (C) من أصل بيولوجي



Recommandation d'utilisation :

CULTURES	الجرع كغ /هكتار	DOSES Kg/ha
Céréales-Mais	400 إلى 200	
Les cultures maraîchères en plein champ (pommes de terre, tomate, cucurbitacées, choux, etc..)	500 إلى 300	
Arboricultures fruitières (pommier-poirier-agrumes-abricotier-pêcher etc..)	600 إلى 400	
Olivier	400 إلى 200	
Palmer dattier	400 إلى 200	
Vigne	400 إلى 200	

توصيات الاستعمال

المزروعات
الحبوب - الذرة
الخضروات (البطاطس والطماطم و القرعيات ، والملفوف ، الخ ..)
الأشجار المثمرة (التفاح-حيات-اللوزيات- الحمضيات)
أشجار الزيتون
النخيل
الكروم

Fournisseur **Al Pacconi**



Fiche technique de l'engrais azotée Nforce40 homologué sur pommier

PRODUCTIONS
SCIENTIFIQUES

Productions scientifiques

Communication internationale

BENZINA. S, HARIZIA. A, ELOUISSI. A. Nouvelle stratégie agro écologique de lutte contre les bioagresseurs en verger de pommiers : application du concept « PFI » dans la région de Mascara (Algérie). International Congress Valorization of Bio resources: Application And Impact on Sustainable Development, 26-27 November 2019, University M'hamed Bougara Boumerdes.

Communications nationales

BENZINA. S, HARIZIA. A, ELOUISSI. A. Effets de l'intensité de la taille sur la productivité des rosacées à pépins : cas des vergers conduits en intensif. Conférence Nationale sur l'Environnement et le Développement Durable, 22-23 Janvier 2020, Université Mustapha Stambouli de Mascara.

BENZINA. S, MAHI. T, HARIZIA. A, ELOUISSI. A, BENGUERAÏ. A. Approche innovante de gestion intégrées des productions fruitières (PFI) : application aux vergers intensifs du nord-ouest algérien (Mascara et Sidi Bel Abbès). Journée scientifique sur « L'agriculture en Algérie entre défi, développement et perspectives » à l'université Djillali LIABES de Sidi Bel Abbès.

HARIZIA A., **BENZINA S.**, ELOUISSI A, BENGUERAÏ A, MAHI T., 2024. Conception de systemes horticoles innovants par la gestion agroecologiques des ravageurs clés des rosacées à pépins : le cas de *Dysaphis plantaginea*. 1^{er} seminaire nationl sur la lutte biologique : une alternative pertinente pour la securité alimentaire, Sidi Bel Abbes le 16-11.2024.

Publication internationale

BENZINA, S., HARIZIA, A., ELOUISSI, A. et al. Effects of winter pruning intensity on the interactions between the apple tree and rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* (Hemiptera: Aphididae). *J Plant Dis Prot* **130**, 1239–1250 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41348-023-00789-7>.