



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة - الحراش - الجزائر
Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach - Alger

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3ème cycle LMD en Sciences Agronomiques

Département : Foresterie et Protection de la Nature

Spécialité : Foresterie

Thème

**Etude de l'implication des interactions arbre-défoliateur
dans la dynamique des attaques de la processionnaire du
pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. aux pinèdes du
Barrage Vert**

Présentée par : GUADGUAD Mouffek

Soutenu le : 02/10/2025

Devant le jury :

Président :	BOUBAKER Zoubir	Professeur (ENSA, El-Harrach)
Directeur de thèse :	SBABDJI Mohamed	Professeur (ENSA, El-Harrach)
Co-directeur de thèse :	MOUISSA Habib	MCA (Université de Djelfa)
Examineurs :	CHEBLI Abderrahmane	MCA (ENSA, El-Harrach)
	HADDAD Ahmed	Professeur (CU d'El Bayadh)
	TOUAHRIA-SEBTI Safia	MCA (Université de Blida)

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

Je rends tout d'abord grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour Ses innombrables bienfaits et la force qu'Il m'a accordée pour mener à bien ce travail.

Je souhaite exprimer ma gratitude à Monsieur Sbabdji Mohamed, qui a dirigé ce travail. Je lui suis profondément reconnaissant pour ses conseils avisés, ses orientations et le temps qu'il m'a généreusement consacré. J'ai beaucoup appris à ses côtés, tant sur le plan scientifique que sur le plan humain, notamment son sens du travail et de l'engagement.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Mouissa Habib, codirecteur de cette thèse, pour son accompagnement et ses conseils tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur Xoaquín Moreira Tomé de la Misión Biológica de Galicia (Espagne), pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire, et pour ses conseils éclairés.

Mes sincères remerciements s'adressent au Professeur Boubaker Zoubir du département de foresterie (ENSA), pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Chebli Abderrahmane du département de zoologie agricole et forestière (ENSA), ainsi qu'aux Professeures Haddad Ahmed de Centre Universitaire d'El Bayadh et Touahria-Sebti Safia de l'Université de Blida, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de faire partie du jury, ainsi que pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement mon ami et collègue Chemlal Azzedine pour son aide précieuse et son soutien constant tout au long de ce travail.

Je remercie également Monsieur Bensidi Atia, ainsi que Monsieur Belabiod D, Directeur de la station de l'INRF à Djelfa, et l'ensemble de son équipe, en particulier Messieurs Hassibi Faycel et Chouicha Taïb, pour leur précieuse assistance lors des sorties de terrain.

Je remercie également l'équipe de l'INRF à Baïnem (Alger), Mme Abdellatif Karima, Mme Moutchou, Mme Djimli, Mr Gachi, pour leur disponibilité et leur soutien. Je tiens à adresser mes remerciements également au personnel des laboratoires d'ENSA (Alger), pour leur aide durant les analyses biochimiques.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À celui qui a fait de moi la personne que je suis aujourd'hui, et sans qui ce rêve n'aurait pu se réaliser : mon cher père.

À celle qui m'a donné la vie, pilier de mon existence. : ma douce maman.

À mes frères et sœurs.

À toute ma grande famille, pour leur amour et leur soutien indéfectibles.

À tous ceux qui m'ont aidé dans mes études, de près ou de loin.

À mes chers amis, en particulier Touil Abdellah, fidèle compagnon au long de mon parcours universitaire.

À mes camarades de l'ENSA avec qui j'ai partagé tant de souvenirs.

*À la famille du département de foresterie et protection de la nature
(Enseignants, techniciens, étudiants).*

Et à tous ceux que j'aime, de près ou de loin.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans une démarche visant à proposer de nouvelles approches de gestion d'un ravageur majeur, la chenille processionnaire du pin (*Thaumetopea pityocampa*), qui menace fortement les reboisements de pin d'Alep (*Pinus halepensis*) au niveau du Barrage Vert. L'étude s'est concentrée sur les interactions entre cet insecte et son hôte.

Les résultats montrent que le pin d'Alep développe une réponse de défense induite à la suite de défoliations sévères. L'arbre produit alors un nouveau feuillage enrichi en terpènes spécifiques, potentiellement dotés de propriétés insecticides. Cela suggère que les défoliations intenses pourraient participer à une forme de régulation naturelle des populations de processionnaires.

Par ailleurs, l'étude met en évidence l'importance de la vigueur des arbres dans le processus de sélection de l'hôte par la chenille. Les individus les plus attractifs semblent être les arbres en meilleure santé.

Ces résultats méritent d'être intégrés dans les programmes de gestion de cet insecte, car ils pourraient contribuer à l'élaboration de stratégies de lutte plus efficaces. Toutefois, dans un contexte de changement climatique, des recherches complémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre la réponse des arbres à divers types de stress.

Mots clés : Chenille processionnaire, Pin d'Alep, Barrage vert, Interactions.

ملخص

يأتي هذا العمل في إطار السعي إلى اقتراح مقاربات جديدة لإدارة أحد أهم الآفات التي تهدد غابات الصنوبر الحلبي (*Pinus halepensis*) على مستوى السد الأخضر، وهي دودة (اليرقة الموكبية) (*Thaumetopea pityocampa*) . وقد ركزت الدراسة على فهم التفاعلات البيئية بين هذه الحشرة وعائلها النباتي.

أظهرت النتائج أن الصنوبر الحلبي يمتلك آلية دفاعية مُحفَّزة تظهر بعد تعرضه لتعرية (إزالة أوراق) شديدة، حيث يُنتج أوراق جديدة غنيّة بمواد تربينية محددة يُحتمل أن تكون لها خصائص حشرية قاتلة. مما يشير إلى أن التعرية الشديدة قد تُساهم في تنظيم طبيعي لأعداد هذه الآفة.

كما أبرزت الدراسة دور البنية الفيزيائية وقوة الأشجار في تحديد اختيار العائل من طرف اليرقات، إذ يبدو أن الأشجار الأقوى والأكثر حيوية هي الأكثر جذبًا.

تستدعي هذه النتائج أن تُؤخذ بعين الاعتبار عند وضع برامج إدارة هذه الآفة، لما يمكن أن تُقدمه من مساهمة في تطوير استراتيجيات مكافحة أكثر فاعلية. ومع ذلك، وفي ظل التغيرات المناخية، تظل هناك حاجة إلى مزيد من الدراسات لفهم كيفية استجابة الأشجار للضغوط البيئية المختلفة.

الكلمات المفتاحية: اليرقة الموكبية (*Thaumetopea pityocampa*)، الصنوبر الحلبي (*Pinus halepensis*) ، السد الأخضر، التفاعلات البيئية شجرة – حشرة

Abstract

This study aims to propose new management approaches for a major pest, the pine processionary moth (*Thaumetopea pityocampa*), which poses a serious threat to Aleppo pine (*Pinus halepensis*) plantations in the Green Dam. The research focused on the interactions between the insect and its host tree.

The results indicate that Aleppo pine exhibits an induced defense mechanism following severe defoliation. The tree appears to produce new foliage enriched with specific terpenes that may possess insecticidal properties. This suggests that intense defoliation could contribute to the natural regulation of pest populations.

The study also highlights the role of tree structure and vigor in host selection by the processionary moth. Healthier and more vigorous trees tend to be more attractive to the insect.

These findings should be considered in pest management programs, as they may support the development of more effective control strategies. However, in the context of climate change, further research is needed to better understand how trees respond to various environmental stresses.

Keywords: Pine processionary moth, Aleppo pine, Green Dam, tree-insect interactions.

Table des matières :

Introduction générale	1
-----------------------------	---

<i>Synthèse bibliographique</i>
--

Chapitre I : Généralités sur l'insecte

1. Généralités sur l'insecte	5
1.1 Introduction	5
1.2 Description de l'insecte	5
1.2.1 Systématique	6
1.2.2 Cycle de vie	7
1.2.3 Diversité génétique de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	7
1.3 Les ennemis naturels	8
1.4 Les méthodes de lutte	11
1.4.1 Méthodes Mécaniques	11
1.4.2 Méthodes Biologiques	12
1.4.3 Méthodes Chimiques	12
1.4.4 Méthodes Alternatives	12
1.5 PPM et changement climatique	12
1.6 Risques sanitaires associés à PPM	15

Chapitre II : Interactions arbre-insecte

2. Interactions arbre-insecte	18
2.1 Introduction	18
2.2 Processus de choix d'arbre hôte (Host tree selection)	18
2.3 Interaction trophique (Trophic Interaction)	21
2.4 L'impact de défoliation sur la croissance et la survie de l'arbre	24
2.5 La dynamique spatiotemporelle des attaques	26

<i>Etude expérimentale</i>

Chapitre III : Matériels et méthodes

3. Matériels et méthodes	30
3.1 Objectif et principe méthodologique	30
3.2 Zone d'étude	31

3.2.1	Aperçu sur le barrage vert.....	31
3.2.2	Les peuplements échantillonnés	33
3.2.3	Parcelles d'échantillonnage	36
3.2.4	Etude climatique	37
3.3	Méthodologie d'étude de l'interaction trophique (Relation trophique, Défenses chimiques).....	41
3.3.1	Méthode de défoliation assistée.....	41
3.3.2	Méthode d'élevage des larves au laboratoire.....	41
3.3.3	Méthode de suivi des jeunes colonies sur les arbres.....	43
3.3.4	Méthode de mesures de la taille des larves.....	44
3.3.5	Analyse chimique de feuillage.....	44
3.3.6	Analyses statistiques	48
3.4	Méthode d'étude de l'influence des caractéristiques morphométriques d'arbre et des aiguilles sur le choix de l'hôte.....	50
3.4.1	Choix des parcelles et des arbres	50
3.4.2	Méthode des mesures biométriques du feuillage	51
3.4.3	Analyses statistiques	52

Chapitre IV: Résultats

4.	Résultats	55
4.1	Interaction trophique (Relation trophique, Défenses chimiques).....	55
4.1.1	Survie des larves en élevage au laboratoire	55
4.1.2	Survie des jeunes colonies sur les arbres	56
4.1.3	Croissance des larves	57
4.1.4	Composition chimique de feuillage	58
4.1.5	Variations des composés biochimiques de feuillage	59
4.2	Effets des caractéristiques morphométriques de l'arbre et des aiguilles sur le choix de l'hôte	65
4.2.1	Description morphométriques des arbres échantillons	65
4.2.2	Influence des caractéristiques de l'arbre.....	66
4.2.3	Influence des caractéristiques des aiguilles	66

Chapitre V: Discussion générale

Discussions	71
Conclusion et perspectives.....	78

Références bibliographiques	81
-----------------------------------	----

Liste des abréviations :

C : Carbone

CRAPC : Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico–Chimiques

DGF : Direction Générale des Forêts

ENSA : Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach - Alger

EPPO : Organisation Européenne et Méditerranéenne pour la Protection des Plantes.

Fig : Figure

GC-MS : Chromatographie en Phase Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse

HE : L'huile essentielle

INRF : Institut National de Recherche Forestière

IPCC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

N : Azote

PPM : (*Pine Processionary Moth*) Chenille processionnaire du pin

Tab : Tableau

UAV : (*Unmanned Aerial Vehicle*) , véhicule aérien sans humain à bord, Drones

VOCs : (*volatile organic compounds*) composés organiques volatils.

Liste des tableaux

Tableau 1. Les principaux parasitoïdes de PPM identifiés par Zamoum et al., (2007) ; mentionnés dans Battisti et al., (2014).....	9
Tableau 2. Les effets de certains VOCs sur le papillon de <i>T. pityocampa</i>	21
Tableau 3. Récapitulatif de l'échantillonnage parcelle.....	37
Tableau 4. La température moyenne min et max mensuelles de la région d'étude.....	38
Tableau 5. ANOVA à deux facteurs a (type de feuillage, site de récolte) pour la survie des larves en élevage au laboratoire	56
Tableau 6. Résultats du test ANOVA à deux facteurs (catégorie d'arbre et site) effectué sur la longueur des larves.	57
Tableau 7. Les principaux composés identifiés par l'analyse GC-MS.....	58
Tableau 8. Corrélation des variables avec PC1	60

Liste des figures

Figure 1. Disparité morphologique dans les ailes de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> et <i>Thaumetopoea wilkinsoni</i> (Roques & Battisti, 2015).....	6
Figure 2. Abaque de Démolin (Roques & Battisti, 2013).....	8
Figure 3. Prédation des larves par <i>Scolopendra</i> sp.(<i>Mantidae</i>) (Moudjbara 06/04/2021).....	10
Figure 4. <i>Sphodromantis</i> sp. (<i>Myriapoda</i>) près des nids de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> (Sénalba Chergui 14/10/2022)	10
Figure 5. Projection de la probabilité de présence de PPM sur l'Europe selon un modèle de régression, en fonction des températures actuelles et d'augmentations de +1 °C, +2 °C et +3 °C (Roques et al, 2014).	15
Figure 6. Emplacement des nids d'hiver pendant 2 cycles dans les pinèdes à pin d'Alep de Djelfa (Zamoum, 1998)	20
Figure 7. Effet de l'âge de l'arbre sur le pourcentage de perte de croissance des arbres (Jacquet et al, 2012) (la classe 25-49 % de défoliation est manquante en raison du manque de données). ...	25
Figure 8. Délimitation du barrage (Oldache, 2002 <i>in</i> Oldache 2021)	31
Figure 9. Dépérissement des arbres (21/04/2024)	32
Figure 10. Peuplements échantillonnés.....	33
Figure 11. Reboisement de Moudjebara (06/07/2020)	34
Figure 12. Reboisement de Chbika (06/04/2023).....	35
Figure 13. Forêt naturelle de Sénalba Chergui (14/09/2022)	35
Figure 14. Situation des parcelles d'échantillonnage	36
Figure 15. Amplitude thermique entre les températures maximales et minimales mensuelles ..	38
Figure 16. Diagramme de Bagnouls et Gaussen (1954) de la région d'étude	39
Figure 17. Climagramme d'Emberger de la région d'étude (Djelfa)	40
Figure 18. Incubation des pontes dans des tubes en verres au laboratoire	42
Figure 19. Élevage des larves L1 au laboratoire.....	42
Figure 20. Greffage des jeunes colonies sur les arbres	43
Figure 21. Mesures de la taille des larves	44
Figure 22. Récolte de feuillage	45
Figure 23. Extraction de l'huile essentielle par hydrodistillation	45
Figure 24. L'analyse GC-MS des huiles essentielles	46

Figure 25. L'extraction aqueuse de feuillage	47
Figure 26. Poudre végétale fine de feuillage	48
Figure 27. Dénombrement des pontes de PPM sur les arbres.....	50
Figure 28. Mesures de nombre total et longueur moyenne des aiguilles par rameau	51
Figure 29. Survie des larves en élevage au laboratoire avec $\pm$ SE (Erreur standard).	55
Figure 30 Taux de survie des colonies greffées dans les deux sites E1 et E2 selon la catégorie d'arbre.....	56
Figure 31. Longueur moyenne des larves par catégorie d'arbre dans les sites E1 et E2, avec $\pm$ SE (Erreur standard).	58
Figure 32. Graphique des facteurs individuels ACP de la composition biochimique foliaire.....	59
Figure 33. Moyennes des composés les plus corrélés à la PC1 ($\pm$ SE)	62
Figure 34. Moyennes des paramètres biochimiques de feuillage pour dans les arbres défoliés et non défoliés ($\pm$ SE)	63
Figure 35. Hauteurs des arbres par site	65
Figure 36. Circonférences des arbres par site	66
Figure 37. Volumes de houppier des arbres par site	66
Figure 38. Modèles (GLMM) montrant l'effet de diverses caractéristiques des arbres sur l'abondance des pontes et des nids de PPM.	68
Figure 39. Modèles (GLMM) montrant l'effet de diverses caractéristiques des aiguilles sur l'abondance des pontes et des nids de PPM.	69

Introduction générale

Introduction générale

Dans le cadre des efforts pour lutter contre la désertification, l'Algérie a initié le célèbre projet du Barrage Vert. Ce vaste programme de reboisement s'est principalement appuyé sur la monoculture extensive du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) durant les premières années de réalisation (Ouldache, 2021). Bien que cette espèce soit adaptée aux conditions édapho-climatiques difficiles de la région (Maestre & Cortina, 2004 ; Mechergui *et al.*, 2022), son implantation massive a favorisé l'installation des insectes ravageurs telle que la chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*), désignée sous l'acronyme PPM (Pine Processionary Moth), un ravageur majeur des forêts méditerranéennes (Battisti *et al.*, 2016).

Aujourd'hui, le Barrage Vert occupe une place stratégique dans la politique environnementale nationale, notamment en jouant un rôle clé dans l'atténuation des effets du changement climatique et en contribuant à l'équilibre écologique et socio-économique des zones concernées. Cependant, ce projet soulève également des débats scientifiques concernant son efficacité, en particulier face aux perturbations écologiques, telles que les épidémies et défoliations massives causées par *Thaumetopoea pityocampa*. Les attaques répétées de cet insecte affaiblissent considérablement les pins et ont, de plus des répercussions graves sur la régénération dans les jeunes plantations. Ce qui compromet leur rôle écologique essentiel, menaçant ainsi la durabilité des zones reboisées.

Malgré les efforts déployés par la Direction Générale des Forêts (DGF) pour contrôler ce ravageur, les méthodes actuelles se sont avérées insuffisantes pour prévenir les dégâts causés.

Face à ces limites et tenant compte des risques d'accentuation des attaques par le réchauffement climatique (Battisti & Larsson 2023), il devient impératif d'investir de nouvelles approches pour palier à ce problème. Les interactions complexes entre l'arbre et l'insecte pourraient être l'une de ces approches. Ces interactions, peuvent renseigner sur la manière dont les écosystèmes forestiers répondent aux infestations et pouvant aider à aux choix des mesures rationnelles.

En effet, décrire la réaction de l'arbre par rapport aux attaques pour aboutir à des mesures adéquates pour réduire les attaques. L'actuel travail est envisagé dans ce contexte, il cible la description de la réaction des arbres aux défoliations.

Ce travail vise à explorer des interactions qui existent entre le pin d'Alep et PPM, en combinant des expérimentations sur le terrain et en laboratoire. Les objectifs spécifiques de cette étude sont :

- Comprendre mieux les mécanismes de sélection de l'arbre hôtes par *Thaumetopoea pityocampa* au sein de ces pinèdes.
- Analyser les réactions physiologiques du pin d'Alep après la défoliation, et étudier les relations trophiques entre l'arbre et l'insecte pour déterminer si la défoliation induit un mécanisme de défense chez l'arbre.
- Examiner l'impact de la défoliation sur la dynamique des populations de PPM dans ce massif forestier étudié.

Cette recherche vise à enrichir les connaissances sur les relations écologiques arbre-insecte, et à identifier des pistes innovantes pour la gestion intégrée de ce ravageur dans cette zone.

Le document est structuré en trois parties : une première partie bibliographique consacrée à l'insecte et à ses interactions avec l'arbre hôte ; une partie expérimentale décrivant la zone d'étude ainsi que le matériel et les méthodes utilisés ; enfin, les chapitres IV et V présentent respectivement les résultats obtenus et la discussion générale

*Synthèse
bibliographique*

Chapitre I) Généralités sur l'insecte

1. Généralités sur l'insecte

1.1 Introduction

La chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* est considéré comme étant le défoliateur major des pins dans le bassin méditerranéen (Paiva *et al.*, 2011). Cet insecte oligophage sur les pins et les cèdres provoque des défoliations massives, engendrant des dégâts économiques et écologiques importants (Battisti *et al.*, 2016). De plus, les poils urticants que possèdent les larves peuvent provoquer des réactions allergiques sévères chez l'humain et les animaux domestiques, posant ainsi un problème de santé publique (Battisti *et al.*, 2016). Dans ce chapitre, nous présenterons une description de l'insecte, en abordant son cycle de vie et systématique. Nous examinerons également ses ennemis naturels, les méthodes de lutte, son interaction avec le changement climatique, ainsi que les risques sanitaires qui lui sont associés.

1.2 Description de l'insecte

Décrite pour la première fois en 1775 par Denis et Schiffermüller, (*Thaumetopoea pityocampa*, *Lepidoptera*, *Notodontidae*). Bien que cet insecte ravageur soit connu depuis des siècles, des avancées significatives dans sa compréhension n'ont été réalisées qu'à la fin du XIX^e siècle (Roques & Battisti, 2015). Les travaux pionniers de Démolin à partir des années 1960 ont considérablement enrichi les connaissances sur la biologie et l'écologie de cet insecte, notamment sur son cycle biologique, son comportement de procession et sa régulation par les facteurs climatiques (Roques & Battisti, 2015).

Thaumetopoea est un genre de la famille des *Thaumetopoidae*, ordre des *Lepidoptera*. Les lépidoptères rassemblent divers déprédateurs forestiers de pin, cèdre et chêne vert : *Thaumetopoea pityocampa* Schiff, *Thaumetopoea bonjeani* Powel, *Thaumetopoea libanotica* Kiriakoff et Talhouk, *Thaumetopoea wilkinsoni* Tams, *Thaumetopoea processionae* , et *Thaumetopoea pinivora* Treitschke. Ces espèces sont difficilement distinguables, mais elles présentent des disparités à la fois morphologiques, telles que l'intensité de la couleur des ailes (Fig. 1), et biologiques, telles que la plante hôte et les dates des différentes phases de cycle.

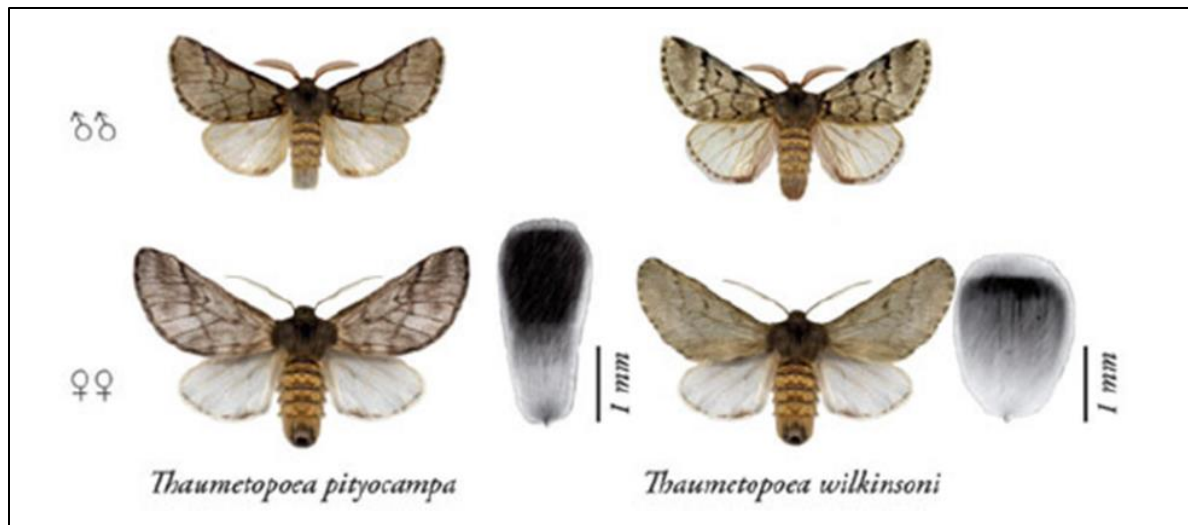


Figure 1. Disparité morphologique dans les ailes de *Thaumetopoea pityocampa* et *Thaumetopoea wilkinsoni* (Roques & Battisti, 2015).

Thaumetopoea pityocampa est un oligophage, se nourrissant principalement d'espèces des genres *Pinus* et *Cedrus*. Il peut également être observé, bien que plus rarement, sur d'autres conifères, notamment ceux du genre *Pseudotsuga* (Battisti *et al.*, 2016). L'aire de répartition actuel de l'insecte s'étend du nord d'Afrique jusqu'au sud de l'Europe et de l'océan atlantique jusqu'au partie ouest de la Turquie (Roques *et al.*, 2015).

1.2.1 Systématique (Denis et schiffermüller, 1775)

Règne : Animalia.

Embranchement : Arthropoda.

Classe : Insecta

Super-ordre : Endopterygota.

Ordre : Lepidoptera

Famille : Thaumetopoeidae

Genre : *Thaumetopoea*

Espèce : *pityocampa*

1.2.2 Cycle de vie

Le cycle de vie de PPM se divise en deux grandes phases : une phase aérienne et une phase souterraine. Des variations importantes dans le déclenchement des phases sont observées en fonction de la latitude et de l'altitude (Démolin, 1969) (Fig. 2). En outre, la durée du cycle varie aussi en fonction des conditions environnementales, telles que la température et l'ensoleillement (Buffo *et al.*, 2007). Par ailleurs, dans les régions méditerranéennes, le cycle peut être plus court en raison des températures plus chaudes, tandis que dans les régions montagneuses, il peut être plus long (Battisti *et al.*, 2006).

En général, le cycle se complète en un an. Cependant, dans certaines conditions, il peut s'étendre plusieurs ans, avec un arrêt du développement au stade nymphal, selon Hódar *et al* (2003) dans les régions plus froides, les chrysalides peuvent entrer en diapause prolongée, retardant l'émergence des adultes jusqu'à ce que les conditions soient favorables. La capacité de l'espèce à ajuster sa phénologie et à entrer en diapause prolongée contribue probablement à son succès dans l'expansion de son aire de répartition en réponse au changement climatique, comme cela a été observé dans les Alpes italiennes (Buffo *et al.*, 2007 ; Hoch *et al.*, 2009).

1.2.3 Diversité génétique de *Thaumetopoea pityocampa*

Thaumetopoea pityocampa présente une diversité génétique dans l'ensemble de son aire de répartition. L'analyse génétique des espèces étudiées *T. pityocampa* - *T. wilkinsoni*, a mis en évidence de nouvelles interrogations taxonomiques, révélant que le groupe est en réalité constitué de trois espèces avec des zones géographiques distinctes. On trouve *T. pityocampa* en Europe et en Afrique du Nord-Ouest, tandis que *T. wilkinsoni* habite principalement au Moyen-Orient. Un autre groupe, provisoirement nommé *T. pityocampa* ENA (pour l'Afrique de l'Est-Nord), est établi entre la Libye et l'est de l'Algérie (Kerdelhué *et al.*, 2014).

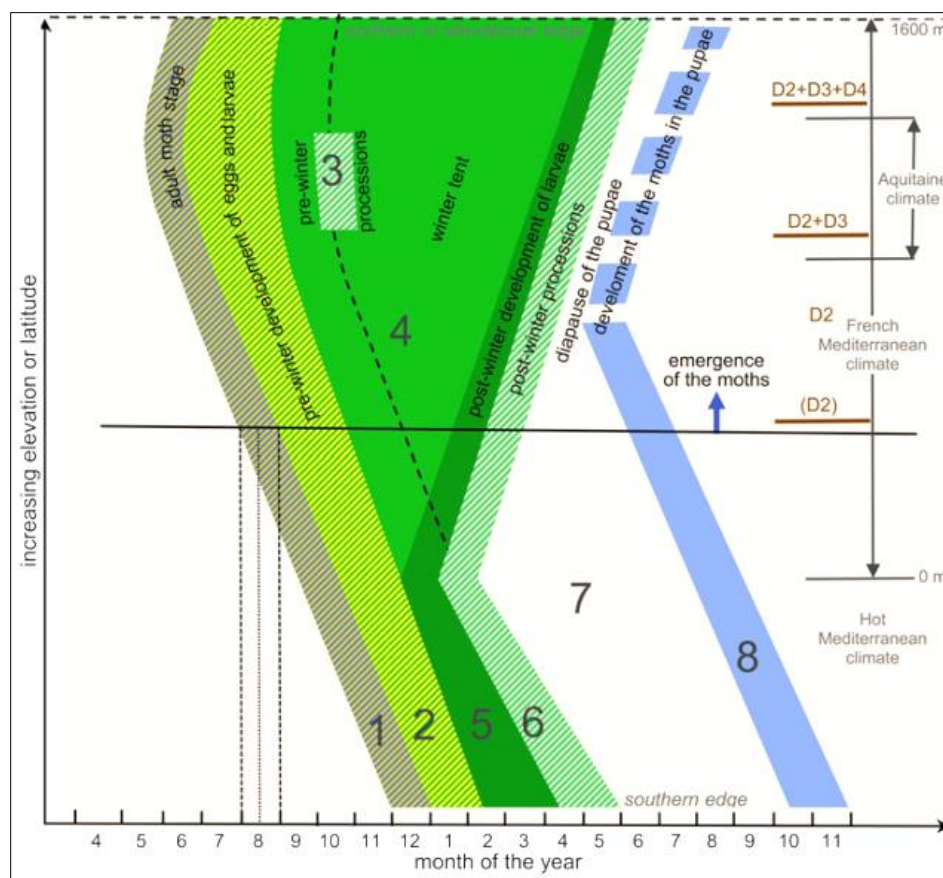


Figure 2. Abaque de Démolin (Roques & Battisti, 2013)

1 - période de vol des papillons ; 2 - développement des oeufs et des larves avant l'hiver ; 3 - processions avant l'hiver ; 4 - tentes d'hiver ; 5 - développement larvaire après l'hiver ; 6 - processions après l'hiver ; 7 - diapause ; 8 - développement de la nymphe. D2, D3, D4 : diapause prolongée en cycles de 2, 3 et 4 ans, les flèches verticales indiquent l'émergence des adultes

1.3 Les ennemis naturels

Les principaux ennemis naturels de *Thaumetopoea pityocampa* sont les parasitoïdes, les prédateurs et les pathogènes (Battisti *et al.*, 2014). Parmi les parasitoïdes des oeufs, on retrouve principalement *Baryscapus servadeii* et *Ooencyrtus pityocampae*. De plus, la mouche tachinide *Phryxe caudata* agit comme un parasite des larves. Dans le tableau ci-dessous (Tab. 1), les principaux parasitoïdes identifiés :

Tableau 1. Les principaux parasitoïdes de PPM identifiés par Zamoum *in* Battisti *et al.*, (2014)

Stage	Parasitoid species	Period of activity (month)	Maximum mortality %
Egg	<i>Baryscapus servadeii</i> (Hym., Eulophidae)	VI–IX	20
	<i>Ooencyrtus pityocampae</i> (Hym., Encyrtidae)	IV–VI and VII–X	8
	<i>Anastatus bifasciatus</i> (Hym., Eupelmidae)	VI and IX	0.5
	<i>Trichogramma embryophagum</i> (Hym., Trichogrammatidae)	V–VI and VII	0.1
	<i>Pediobius bruchicida</i> (Hym., Eulophidae)	III and IV	0.03
	<i>Eupelmus (Macroneura) seculata</i> (Hym., Eulophidae)	V–VI–VII	0.1
	<i>Eupelmus (Macroneura) sp.</i> (Hym., Eulophidae)	V–VI–VII	1
	<i>Eupelmus (Macroneura) vesicularis</i> (Hym., Eulophidae)	--	--
Larvae	<i>Phryxe caudata</i> (Dipt., Tachinidae)	IX–X and II–III	10
	<i>Compsilura concinnata</i> (Dipt., Tachinidae)	IV–V	7
	<i>Exorista segregata</i> (Dipt., Tachinidae)	IV	5
	<i>Erigorgus femorator</i> (Hym., Ichneumonidae)	I–II–III	17
	<i>Cotesia vestalis</i> (Hym., Braconidae)	IX–X–XI	4
	<i>Pteromalus chrysos</i> (Hym., Chalcididae)	IV	--
	<i>Dibrachys lignicola</i> (Hym., Chalcididae)	IV	--
Pupa	<i>Villa brunnea</i> (Dipt., Bombyliidae)	VIII–IX	35
	<i>Coelichneumon rudis</i> (Hym., Ichneumonidae)	V–VI	5
	<i>Conomorium pityocampae</i> (Hym., Pteromalidae)	VI–VI	0.1

Les prédateurs s'attaquent aux œufs, aux larves, aux nids ou aux adultes (Battisti *et al.*, 2014). Parmi les oiseaux, les mésanges (*Parus spp.*) sont des prédateurs efficaces des larves, notamment en hiver, lorsqu'elles percent les nids pour se nourrir. La huppe fasciée (*Upupa epops*) est un prédateur des chrysalides.

Parmi les insectes prédateurs, on retrouve principalement *Xanthandrus comtus* (Syrphidae), *Sphodromantis sp.* (Mantidae) et *Scolopendra sp.* (Myriapoda) (Fig. 3, 4) (Observation personnelle).



Figure 3. Prédation des larves par *Scolopendra* sp.(*Mantidae*) (Moudjbara 06/04/2021)



Figure 4. *Sphodromantis* sp. (*Myriapoda*) près des nids de *Thaumetopoea pityocampa* (Sénalba Chergui 14/10/2022)

Les pathogènes, tels que les bactéries, les virus et les champignons, peuvent provoquer des maladies mortelles chez les populations de PPM (Battisti *et al.*, 2014) :

- Bactéries : *Bacillus thuringiensis* produit des toxines mortelles pour les chenilles et est couramment utilisé en lutte biologique.

- Virus : *Smithiavirus pityocampae* et *Borrelina pityocampae*, appartenant aux Nucléopolyhédrovirus (NPV), sont spécifiques aux lépidoptères et peuvent provoquer des épidémies au sein des populations de chenilles.
- Champignons : *Beauveria bassiana* et *Metarhizium anisopliae* sont des champignons entomopathogènes capables d'infecter les chenilles et les chrysalides, et sont utilisés en lutte biologique.

Les ennemis naturels sont souvent utilisés dans des programmes de lutte biologique pour réduire les populations de ce ravageur. Par exemple, l'introduction ou la conservation de mésanges dans les zones infestées peut aider à contrôler les populations de l'insecte (Jactel *et al.*, 2015).

1.4 Les méthodes de lutte

Pour combattre cette insecte plusieurs techniques de lutter ont été utilisées : les traitements à phéromone de synthèse, la lutte mécanique ou manuellement des nids, la lutte chimique, la lutte biologique, la pulvérisation aérienne avec des insecticides (Cayuela *et al.*, 2011), en terme de couts, c'est l'investissement le plus élevé contre un herbivore forestier dans la région méditerranéen. Cependant, l'efficacité de ces traitements est toujours en question (Vázquez-González *et al*, 2021). Ces méthodes peuvent être classées en quatre catégories : mécaniques, biologiques, chimiques et alternatives :

1.4.1 Méthodes Mécaniques

- Élimination des masses d'œufs sur les arbres : cette technique implique la collecte des pontes présentes sur les arbres avant leur éclosion. Elle a été appliquée à grande échelle dans les jeunes reboisements du Barrage Vert en Algérie dans les années 1980 (Zamoum, 1998). Cependant, cette méthode présente l'inconvénient de ne pas être exhaustive en raison de la difficulté à localiser visuellement les pontes dans le feuillage.
- Échenillage : Couper et brûler les nids d'hiver pendant les mois les plus froids (décembre à février). Cette méthode est efficace mais nécessite des précautions pour éviter les contacts avec les poils urticants.
- Piégeage des papillons adultes : Utilisation de pièges lumineux pour capturer les mâles adultes et réduire la reproduction. Ces pièges sont placés en été, pendant la période de vol des papillons (Zamoum, 1998).

1.4.2 Méthodes Biologiques

Ces méthodes utilisent des organismes vivants pour contrôler les populations.

- Prédateurs naturels : Favoriser la présence d'ennemis naturels comme les mésanges (*Parus* spp.) en installant des nichoirs dans les zones infestées. Protéger les chauves-souris, qui se nourrissent des papillons adultes.
- Parasitoïdes : Introduction de parasitoïdes comme *Ooencyrtus pityocampae* (parasitoïde des œufs) ou *Phryxe caudata* (parasitoïde des chenilles).
- Pathogènes : Utilisation de *Bacillus thuringiensis* (Bt) : le Bt est pulvérisé sur les arbres pendant les premiers stades larvaires (octobre à décembre). L'application de champignons entomopathogènes comme *Beauveria bassiana* ou *Metarhizium anisopliae*.

1.4.3 Méthodes Chimiques

Les insecticides chimiques sont couramment utilisés contre *T.pityocampa* mais avec précaution en raison de leurs impacts sur l'environnement et la biodiversité (Cayuela *et al.*, 2011).

- Pulvérisation d'insecticides : Application d'insecticides chimiques (comme les pyréthrinoides) sur les arbres infestés. Cette méthode est généralement réservée aux zones urbaines ou aux infestations sévères. Les traitements doivent être effectués entre Octobre et Novembre pour cibler les jeunes chenilles (Cayuela *et al.*, 2011).

1.4.4 Méthodes Alternatives

Ces méthodes incluent des approches innovantes ou écologiques pour réduire la population

- Pièges à phéromones : Utilisation de phéromones sexuelles pour attirer et capturer les mâles, réduisant ainsi la reproduction.
- Piégeage des chenilles par (Ecopiège) : Installation de pièges à collier autour des troncs d'arbres pour capturer les chenilles lorsqu'elles descendent de l'arbre pour la procession (Martin, 2015).
- Confusion sexuelle : Diffusion de phéromones pour désorienter les mâles et empêcher l'accouplement.

1.5 PPM et changement climatique

Au cours des dernières décennies, le réchauffement climatique a modifié l'aire de répartition de PPM, favorisant son expansion vers des latitudes et altitudes plus élevées (Hódar & Zamora,

2004 ; Battisti *et al.*, 2005 ; Buffo *et al.*, 2007 ; Robinet *et al.*, 2007, Roques *et al.*, 2014). En raison de cette sensibilité aux variations climatiques, PPM est considérée comme un insecte modèle indicateur du réchauffement climatique par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC) (Roques *et al.*, 2014).

Le changement climatique a influencé le taux de survie de PPM, en particulier en améliorant sa survie hivernale dans des conditions plus chaudes. La combinaison des températures diurnes du nid et des températures nocturnes de l'air détermine le nombre d'heures pendant lesquelles les larves peuvent s'alimenter, un facteur clé pour leur survie. En effet, le nombre d'heures d'alimentation durant la saison froide explique 82 % de la variance de la survie larvaire entre les sites et les espèces hôtes (Buffo *et al.*, 2007). En outre, l'augmentation des températures hivernales facilite l'expansion de PPM, puisque les heures d'alimentation des larves – déterminées par les températures du nid et de l'air influencent fortement leur survie et leur capacité à coloniser de nouvelles zones. Cette meilleure survie hivernale a conduit l'insecte à devenir une menace croissante pour la santé des forêts méditerranéennes au cours des dernières décennies (Roques *et al.*, 2014). Par ailleurs, l'oscillation nord-atlantique (NAO) a été associée aux schémas de pullulation, avec une intensité de défoliation plus élevée observée jusqu'à trois ans après des phases NAO négatives, notamment chez les espèces de pins situées en moyenne et haute altitude en Espagne (Hódar *et al.*, 2011).

Néanmoins, la relation entre PPM et le changement climatique est plus complexe qu'il n'y paraît. En plus de l'impact du réchauffement climatique sur les larves, les vagues de chaleur estivales peuvent également influencer le vol des papillons et favoriser l'expansion de l'espèce vers de nouvelles zones (Battisti *et al.*, 2006). Entre autres, une expansion inhabituelle observée en 2002 et 2003 a été associée à une augmentation significative de la température nocturne durant la période de vol des femelles, avec une hausse de 2,4 à 3,5 °C par rapport à la moyenne enregistrée. Cette élévation des températures a entraîné une multiplication par 5,3 du nombre de nuits dépassant le seuil thermique nécessaire au décollage des femelles (Battisti *et al.*, 2006). Cependant, l'effet du changement climatique n'est pas toujours bénéfique pour l'insecte. Une étude récente de Domingo *et al.*, (2024) suggère que, bien que des hivers plus doux favorisent la progression de PPM, les vagues de chaleur estivales pourraient en revanche réduire les taux de survie des œufs et des premiers stades larvaires. Cet effet compensatoire pourrait limiter

l'incidence croissante de la processionnaire du pin dans les forêts méditerranéennes, conduisant à un équilibre entre les effets du réchauffement climatique sur l'espèce. Par ailleurs, l'étude de Bourougaaoui *et al.*, (2024) met en évidence les effets négatifs des fortes chaleurs estivales sur la survie des œufs. Les résultats de cette étude suggèrent que l'échec d'éclosion est principalement lié à une forte stérilité des œufs et à l'avortement des embryons. En particulier, la faible incidence du parasitisme dans cette mortalité indique que la chaleur constitue le principal facteur influençant le développement embryonnaire

Bien que PPM ait clairement réagi au réchauffement climatique, il existe peu de preuves suggérant que d'autres espèces de processionnaires suivront la même dynamique d'expansion (Battisti *et al.*, 2017).

En outre, l'expansion de PPM peut être modélisée à l'aide des approches statistiques. Plusieurs études ont tenté de modéliser son expansion vers le nord en Europe. Les modèles prédictifs basés sur des données climatiques sont couramment utilisés pour anticiper l'évolution future de son aire de répartition (Robinet *et al.*, 2007, 2010 ; Roques *et al.*, 2014) (Fig . 5). Entre autres, un modèle statistique dérivé des travaux de Huchon et Démolin n'a pas permis de prédire avec précision l'expansion observée (Robinet *et al.*, 2007). Ainsi, un modèle mécaniste basé sur les exigences alimentaires des larves s'est révélé plus performant. Ce modèle identifie comme facteurs clés de l'activité alimentaire des larves une température nocturne de l'air supérieure à 0°C et une température du nid excédant 9°C la veille (Buffo *et al.*, 2007 ; Robinet *et al.*, 2014). Cette approche pourrait s'avérer particulièrement utile pour prédire la distribution potentielle de l'insecte dans le contexte du changement climatique.

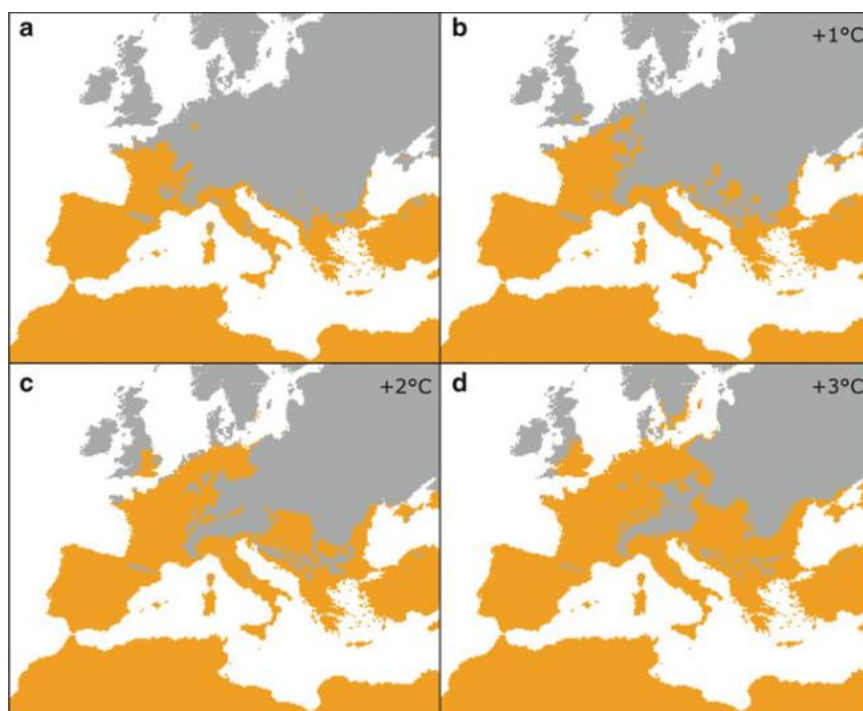


Figure 5. Projection de la probabilité de présence de PPM sur l'Europe selon un modèle de régression, en fonction des températures actuelles et d'augmentations de +1 °C, +2 °C et +3 °C (Roques et al, 2014).

Toutefois, ces modèles restent limités dans de nombreux cas, car la dynamique spatio-temporelle de l'insecte repose sur une multitude de facteurs. Parmi eux, les cycles de gradation, les caractéristiques des peuplements forestiers et les traits individuels des arbres jouent un rôle crucial dans la progression et l'établissement de PPM.

1.6 Risques sanitaires associés à PPM

PPM constitue une menace importante pour la santé humaine et animale en raison de ses poils urticants. Les larves possèdent des poils microscopiques contenant une toxine, la thaumétopoéine, capable de provoquer des réactions allergiques et inflammatoires (Vega *et al.*, 1999). Ces poils, fragiles et facilement détachables, peuvent être dispersés par le vent ou par contact direct, augmentant ainsi le risque d'exposition.

Chez l'humain, le contact cutané avec les poils urticants entraîne fréquemment des dermatites sévères, caractérisées par des rougeurs, des démangeaisons et des éruptions cutanées, qui peuvent s'étendre en cas d'exposition prolongée (Moneo *et al.*, 2014). L'inhalation des poils peut également provoquer des troubles respiratoires tels que toux, bronchite et, dans les cas les

plus graves, des crises d'asthme, en particulier chez les personnes souffrant de pathologies respiratoires.

Les poils urticants peuvent également affecter les yeux, entraînant des conjonctivites, des kératites ou, dans des cas plus graves, des lésions oculaires nécessitant une prise en charge médicale urgente (Moneo *et al.*, 2005).

Les animaux domestiques, en particulier les chiens, sont également très vulnérables. L'ingestion ou le contact avec les poils peut provoquer des nécroses des muqueuses buccales et de la langue, nécessitant souvent une intervention vétérinaire d'urgence (Battisti *et al.*, 2017). Ce risque sanitaire, couplé à la large distribution de l'espèce, en fait une préoccupation croissante dans les régions où *T. pityocampa* est présente.

Chapitre II) Interactions arbre-insecte

2. Interactions arbre-insecte

2.1 Introduction

Les interactions entre les arbres et les insectes herbivores jouent un rôle clé dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Le cycle de vie et le succès reproducteur de l'insecte dépendent en grande partie de l'arbre hôte, et en influençant ainsi la santé et la résilience des arbres infestés. Dans ce chapitre on explore les principaux aspects des interactions arbre-insecte chez *Thaumetopoea pityocampa*. Tout d'abord, la sélection de l'hôte est abordée, mettant en lumière les facteurs influençant le choix d'arbre par les femelles pour la ponte. Ensuite, l'interaction trophique et ainsi que la réaction physiologique de l'arbre face à l'attaque, y compris les mécanismes de défense sont explorées. L'impact de défoliation sur les arbres est également discuté, notamment en ce qui concerne les pertes de croissance radiale. Enfin, la dynamique spatiotemporelle des attaques est abordée à différentes échelles spatiales, du peuplement au paysage, tout en explorant les possibilités offertes par les technologies modernes pour le suivi spatiotemporel des infestations.

2.2 Processus de choix d'arbre hôte (Host tree selection)

La sélection de l'arbre est le premier mécanisme agissant sur les interactions arbre-insecte chez *Thaumetopoea spp* (Damestoy, 2019). Les papillons adultes de *Thaumetopoea pityocampa* ont une durée de vie très courte (1 à 2 jours), ce qui implique que l'accouplement et la ponte se produisent immédiatement après l'émergence (Zhang & Paiva, 1998). Dans ces conditions, les femelles doivent choisir directement les arbres qui assureront la survie de leurs progénitures.

L'hypothèse de l'absence de sélection repose sur le fait que la faible capacité de vol des adultes et leur courte durée de vie limitent fortement leurs possibilités de choix de l'hôte (Hódar *et al.*, 2002). Par ailleurs, une femelle fortement chargée en œufs possède une mobilité réduite, ce qui restreint encore davantage sa capacité de sélection. Cette hypothèse est appuyée aussi par l'étude de Hódar *et al.* (2002), qui ont observé un nombre des pontes similaire entre trois espèces de pins le pin maritime (*Pinus pinaster*), le pin noir (*Pinus nigra*) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). Ces auteures suggèrent que la qualité nutritionnelle des aiguilles est le principal facteur expliquant la variabilité du taux d'infestation et que le comportement alimentaire de l'insecte est

davantage influencé par la composition nutritionnelle de l'arbre hôte que par un véritable processus de sélection.

Cependant, la sélection entre les différentes espèces d'arbres hôtes est bien documentée par plusieurs études (Jactel *et al.*, 2015). *Thaumetopoea pityocampa* présente une large gamme d'espèces hôtes et établit un ordre de préférence entre celles-ci, ce qui met en évidence un processus de sélection. Selon l'EPPO (Organisation Européenne et Méditerranéenne pour la Protection des Plantes) (2004), elle choisit ses espèces hôtes selon l'ordre de préférence suivant : *Pinus nigra* var. *austriaca*, *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra* var. *laricio*, *Pinus pinea*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus canariensis*, suivi par *Cedrus atlantica* et enfin *Larix decidua*. Malgré cela, plusieurs recherches sur ce sujet ne s'accordent pas toujours sur la hiérarchie de cet ordre de préférence, qui semble varier considérablement en fonction des zones géographiques, des protocoles expérimentaux et des méthodologies utilisées (Jactel *et al.*, 2015). Par ailleurs, cette préférence pour certaines espèces hôtes est probablement liée à des processus d'adaptation que l'insecte a développés au cours de son évolution (voir Kerdelhué *et al.*, 2014).

D'un autre côté, des éléments de preuve indiquent qu'une sélection active par des femelles a lieu en ce qui concerne la localisation des arbres hôtes. Les pins isolés, situés en lisière de forêt, sont considérablement plus souvent attaqués (Démolin 1969; Dulaurent *et al.*, 2012 ; Régolini *et al.*, 2014; Jactel *et al.*, 2015). De même, les arbres plus hauts sont également préférés par les femelles, qui tendent à choisir des arbres avec des silhouettes larges et proéminentes (Niccoli *et al.*, 2008 ; Régolini *et al.*, 2014 ; Pérez-Contreras *et al.*, 2008 ; Démolin 1969; Jactel *et al.*, 2015).

De plus, au niveau de l'arbre hôte, l'orientation joue un rôle important. Des observations empiriques sur le houppier des arbres suggèrent que la majorité des pontes sont déposées sur des branches orientées vers le sud (Jactel *et al.*, 2015). Par ailleurs, l'emplacement des pontes et des nids d'hiver pendant 2 cycles dans les pinèdes à pin d'Alep de Djelfa en Algérie, montre une orientation principalement vers le sud et l'est (Zamoum, 1998) (Fig. 6). Ces résultats sont similaires à ceux de Ziouch *et al.*, (2017), qui ont également observé une orientation sud et sud-est des nids d'hiver dans trois pinèdes de la région de Bordj Bou Arreridj. Selon Battisti *et al* (2011), les radiations solaires améliorent les performances larvaires. En revanche, ces études suggèrent que les femelles privilégient les sites exposés au soleil, ce qui favoriserait la survie et

les performances des différents stades larvaires en offrant des conditions microclimatiques plus favorables (Jactel *et al.*, 2015).



Figure 6. Emplacement des nids d'hiver pendant 2 cycles dans les pinèdes à pin d'Alep de Djelfa (Zamoum, 1998)

En outre, le processus de sélection chez *T. pityocampa* est influencé par une combinaison d'indices visuels, chimiques et tactiles qui déterminent si un arbre convient à la progéniture (Prokopy et Owens 1983 ; Hóðar *et al.*, 2002 ; Jactel *et al.*, 2015). Un facteur clé dans cette décision est la composition chimique de l'arbre, en particulier les composés organiques volatils (*volatile organic compounds*) (VOCs) qu'il émet (Jactel *et al.*, 2015). Plusieurs études montrent

un effet de certains VOCs sur le papillon *T. pityocampa*, et en lien avec le choix de l'arbre hôte. Principalement, les terpènes figurent dans le tableau suivant (Tab. 2) par ordre chronologique :

Tableau 2. Les effets de certains VOCs sur le papillon de *T. pityocampa* .

Etude	Classe de terpène	Substance	Effet sur le papillon
Tiberi et al., (1999)	Monoterpenes	(R)-(+)-limonène	(-) répulsif
Zhang et al., (2003)	Monoterpenes	Myrcène / β -phellandrène / trans- β -ocimène / terpinolène.	l'antenne de de <i>T. pityocampa</i> ont répondu à quatre monoterpènes
Niccoli et al, (2008)	Monoterpenes	(1S)-(-)- β -pinene,	(-) répulsif
		(R)-(+)-limonene / (S)-(-)-limonene	(0) inactifs
Mateus (2009)	Monoterpenes	β -pinene (+)	(+) attractif
		β -pinene/ terpinolene, limonene / β -phellandrene/ myrcene and sabinene	Sont les VOCs, les plus pertinents expliquant les différences d'attaque entre espèces
Paiva et al, (2011)	Monoterpenes	Limonènes	(-) répulsif
Panzavolta et al,(2015)	Monoterpenes	(1S)-(-)- β -pinene / (R)-(+)-limonene	(-) répulsif

Pour résumer, certaines preuves suggèrent qu'une sélection active par *Thaumetopoea pityocampa* dépend d'un ensemble de facteurs associés à l'identité de l'arbre, à ses propriétés physiques, et à sa composition chimique, y compris les composés organiques volatils (VOC). La distribution spatiale des infestations dans les peuplements forestiers est affectée par ces processus de sélection.

2.3 Interaction trophique (Trophic Interaction)

Les composés nutritionnels, qu'il s'agisse de la teneur en azote, en carbone, en eau ou d'autres facteurs similaires, exercent une influence significative sur les performances des insectes herbivores. À titre d'exemple, l'azote (N) est un nutriment essentiel pour la croissance et la survie des insectes herbivores (Larsson, 2002). Aussi, les carbohydrates jouent également un rôle crucial, plusieurs études récentes indiquent que les composés glucidiques simples sont des

éléments clés de leur alimentation (Larsson, 2002). La qualité et la quantité des ressources alimentaires disponibles au niveau d'un peuplement influencent directement les populations d'insectes herbivores.

Chez *Thaumetopoea pityocampa*, les caractéristiques physiques et chimiques des aiguilles de pin affectent la dynamique des populations (Jactel *et al.*, 2015). Les larves se nourrissent principalement des aiguilles, et leur développement est étroitement lié à la qualité nutritionnelle (Jactel *et al.*, 2015). Par ailleurs, les premiers stades larvaires (L1 et L2) de *T. pityocampa* dépendent fortement des composés nutritionnels tels que l'azote et de la qualité de la nourriture (Hódar *et al.*, 2004).

Outre que les métabolites primaires, les métabolites secondaires, tels que les terpénoïdes, les composés phénoliques et les alcaloïdes, influencent également les performances des insectes. Ces composés peuvent avoir des effets négatifs sur leur développement et leur survie (Larsson, 2002). Relativement à cela, une étude de (Petrakis *et al.*, 2005) a exploré le comportement alimentaire des larves de PPM, en utilisant des tests d'alimentation en laboratoire et des substrats naturels, cet étude a incorporé des VOCs extraits de 15 espèces de pins, pour analyser comment ces composés influencent le mode de nutrition. Un modèle de régression a été développé pour décomposer ce mode de consommation, les 10 terpènes les plus informatifs pour le modèle sont : caryophyllène oxyde, terpinolène, myrcène, germacrène D, eudesmol, limonène, b-pinène, b-caryophyllène, a-pinène et manoyl oxyde. Selon cette étude, le b-caryophyllène favorise l'attraction vers la surface de feuillage, mais inhibe l'alimentation partielle et complète, et limonène semble inhiber l'alimentation partielle et complète. Néanmoins, aucun composé individuel ne puisse être identifié comme promoteur ou inhibiteur spécifique.

La variabilité inter et intra spécifique dans les traits foliaire agisse non seulement sur le choix des arbres hôtes mais aussi sur les performances des larves (Damestoy, 2019). En rapport avec cela, Pérez-Contreras *et al.*, 2014, ont examiné les facteurs influençant la performance des larves *T. pityocampa* en fonction de deux espèces de pins : le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et le pin maritime (*Pinus pinaster*). Les auteurs explorent si la sélection de l'hôte par les femelles et la plasticité phénotypique des larves expliquent les différences de performance (taux d'éclosion, taille et mortalité des larves). Les résultats suggèrent que le pin d'Alep est plus sélectionné, et que

cette sélection par les femelles est adaptative, car cette espèce offre les meilleures conditions pour la survie et la croissance des larves.

Cependant et en ce qui concerne les interactions insecte-arbre, il y a encore un manque d'informations sur la vulnérabilité des arbres et leur réaction aux défoliations (Jactel *et al.*, 2015).

Alors que, la résistance induite des arbres peut devenir un outil qui contribue à la gestion durable des insectes herbivores dans les écosystème forestiers (Eyles *et al.*, 2010). Cette défense induite se définit comme une augmentation de la production de certaines substances en réponse à l'attaque des insectes, ayant un effet négatif sur ces derniers, soit directement, soit en attirant leurs antagonistes. (Vázquez-González *et al.*, 2021). En parallèle, les phénols et les terpènes sont parmi les principales molécules de défense des pins contre les insectes herbivores (Mumm & Hilker 2006), dans ces derniers, les monoterpènes, les sesquiterpènes et les diterpènes, sont des composés toxiques pour nombreux espèces invasives (Vázquez-González *et al.*, 2021).

Relativement à cela, plusieurs études ont montré que chez certaines espèces de pins, telles que le pin d'Autriche *Pinus nigra*, (Battisti, 1988), le pin sylvestre *Pinus sylvestris* (Hódar *et al.*, 2004), ainsi que le cèdre *Cedrus atlantica* (Sbabdji & Kadik, 2011), le nouveau feuillage qui apparaît après la défoliation a un effet négatif sur la performance des larves de *T. pityocampa*. Ces recherches suggèrent que la défoliation induit une réponse des arbres, se traduisant par la production d'un feuillage dont la composition chimique entrave le développement larvaire. Cette réaction pourrait ainsi constituer un mécanisme de défense, contribuant à la régulation de population de processionnaires.

A ce sujet, Zamoum (1998) a observé un déclin de population dans les reboisements de pin d'Alep, accompagné d'un ralentissement de la croissance larvaire dans les zones sévèrement défoliées l'année précédente, tandis que ce déclin était plus tardif dans les peuplements faiblement attaqués. Par ailleurs, plusieurs composés chimiques ont été étudiés pour expliquer l'entrave du développement des larves de *T. pityocampa* après la défoliation : principalement les phénols, les terpènes, les tanins et la teneur en azote des aiguilles, (Hódar *et al.*, 2015 ; Hódar *et al.*, 2004 ; Hódar *et al.*, 2002).

En revanche, malgré le progrès enregistré dans cet aspect, de nombreux cas demeurent méconnus. le travail de (Hódar *et al.*, 2015) n'a pas abouti à des preuves convaincantes de défense

induite chez trois espèces de pins (*Pinus pinaster*, *Pinus nigra* et *Pinus sylvestris*) contre *T. pityocampa*, la même problématique demeure posée pour le cas du pin d'Alep. Néanmoins, en terme des composés chimiques, la réponse à la défoliation provoquée par cet insecte elle est variable et dépend de l'espèce de pin (Faria *et al.*, 2022).

2.4 L'impact de défoliation sur la croissance et la survie de l'arbre

Les larves de PPM se nourrissent des aiguilles des arbres hôtes, entraînant une défoliation qui peut avoir des effets profonds sur la physiologie et la croissance des arbres. L'un des impacts les plus critiques de la défoliation est la perte de la croissance radiale, un indicateur clé de la santé et de la productivité des arbres (Hódar *et al.*, 2003). Cette croissance radiale est déterminée par la production de nouvelles cellules de cambium, la défoliation réduit la surface foliaire disponible pour la photosynthèse, limitant ainsi la capacité de l'arbre à produire les carbohydrates nécessaires, ce qui affecte directement l'activité cambiale, entraînant une diminution de la formation de nouvelles cellules de xylème et, par conséquent, une réduction de la croissance radiale. Dans les cas extrêmes, une défoliation totale peut entraîner une diminution de croissance allant jusqu'à 80 % (Jacquet *et al.*, 2012).

Par ailleurs, selon l'hypothèse de la Défense Optimale des plantes (ODH), les arbres réorientent leurs ressources vers la production de métabolites secondaires défensifs en réponse à la défoliation (Stamp, 2003). Bien que cette stratégie renforce leur résistance aux herbivores, elle peut diminuer simultanément les ressources allouées à la croissance radiale.

En outre, les processus reproducteurs sont également altérés par la défoliation, cela se traduisant par une baisse du nombre de cônes produits chez les arbres adultes (Hódar *et al.*, 2003). Des défoliations répétées et sévères peuvent ainsi accroître la vulnérabilité des arbres à d'autres stress, tels que la sécheresse ou les maladies, et peut même entraîner leur mortalité (Vázquez-González *et al.*, 2021).

L'étude de la perte de croissance radiale des arbres est souvent effectuée par dendrochronologie. L'analyse de la largeur et de la morphologie des cernes annuels permet de dater et de quantifier les épidémies passées des insectes défoliateurs, une approche connue sous le nom de dendroentomologie (Guiterman *et al.*, 2020). En comparant la croissance des espèces hôtes à celle d'espèces non hôtes et en intégrant des données climatiques, il est possible de

déterminer l'impact spécifique des défoliations sur la croissance des arbres (Guiterman *et al.*, 2020). Plusieurs études ont quantifié les pertes de croissance liées à *T. pityocampa*. À titre d'exemple, en Turquie, une diminution moyenne de 21 % de l'accroissement annuel en diamètre a été observée sur une période de quatre ans chez le pin de Calabre (*Pinus brutia*) (Carus, 2004). Une autre étude a rapporté une réduction d'environ 30 % chez la même espèce (Kanat et al, 2005). En Algérie, Sbabdji *et al.* (2009) ont signalé jusqu'à 50 % de réduction de croissance chez *Cedrus atlantica* suite à une défoliation totale.

Une méta-analyse réalisée par Jacquet *et al.* (2012) a synthétisé les effets de la défoliation par *T. pityocampa* sur la croissance des arbres en analysant 12 études publiées entre 1977 et 2010. La majorité de ces études confirme une réduction significative de la croissance suite à la défoliation, bien que l'ampleur de cette perte varie (de 20 % à 80 % pour une défoliation totale). De plus, cette étude a montré que l'âge des arbres joue un rôle crucial dans leur capacité à tolérer la défoliation, les jeunes arbres subissent des pertes plus importantes (Fig. 7).

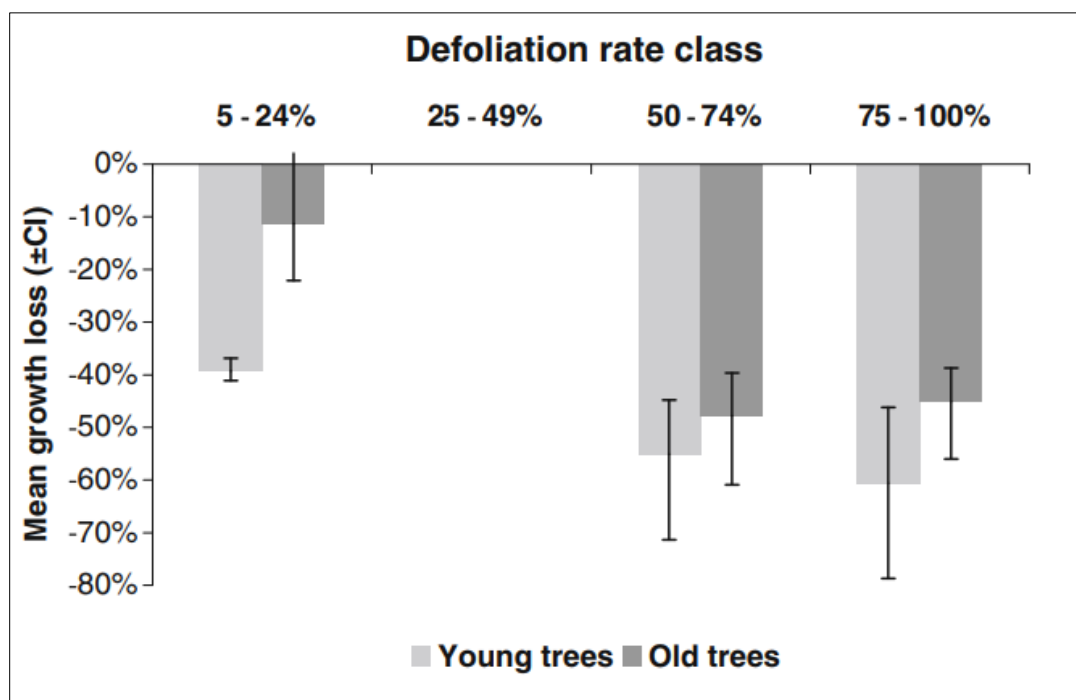


Figure 7. Effet de l'âge de l'arbre sur le pourcentage de perte de croissance des arbres (Jacquet et al, 2012) (la classe 25-49 % de défoliation est manquante en raison du manque de données).

Cependant, Les effets à long terme de la défoliation dépendent de sa fréquence et de son intensité. Selon Sbabdji *et al.* (2009), après trois années d'attaque, la population de l'insecte diminue pendant deux à trois ans, période durant laquelle *Cedrus atlantica* retrouve une croissance normale, suggérant l'absence d'effet cumulatif de défoliation.

Concernant ce temps de récupération, une étude de Jacquet *et al.* (2013) a démontré que *Pinus pinaster* met au moins trois ans à retrouver un fonctionnement physiologique optimal, incluant la restauration de la photosynthèse, de la croissance et des réserves énergétiques. Ce temps de récupération est cohérent aussi avec les observations de Battisti (1988) chez le pin d'Autriche *Pinus nigra*. Toutefois, la vitesse de rétablissement varie en fonction des conditions environnementales, les arbres poussant dans des habitats favorables récupérant plus rapidement que ceux exposés à un stress hydrique ou édaphique (Jacquet *et al.*, 2012).

En bref, la défoliation par *T. pityocampa* a des effets significatifs sur la croissance radiale des arbres. Si certains arbres peuvent récupérer après quelques années, la fréquence et l'intensité des attaques restent des facteurs déterminants de leur résilience. Comprendre ces interactions est essentiel pour la gestion forestière.

2.5 La dynamique spatiotemporelle des attaques

Les attaques de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* suivent une dynamique spatiale et temporelle complexe, influencée par divers facteurs à l'échelle du peuplement et du paysage. L'étude de Pimentel *et al.* (2016) met en évidence l'importance des interactions entre les différentes échelles spatiales dans la dynamique des attaques de PPM. Selon cette étude, l'insecte présente une distribution agrégée sur quelques dizaines de mètres, favorisant une croissance rapide des populations et l'émergence de foyers localisés. Alors que, les femelles pondent préférentiellement sur des mêmes arbres, ce qui entraîne une forte compétition et une régulation densité-dépendante par une mortalité accrue des œufs et des jeunes larves. Ainsi, l'agrégation locale favorise la propagation, tandis que la régulation à l'échelle de l'arbre limite l'expansion des populations.

Par ailleurs, la dynamique spatiale des attaques varie selon l'échelle considérée. À l'échelle du peuplement, l'étude de Régolini *et al.* (2014) montre que l'intensité de l'infestation diminue avec l'augmentation de la densité des arbres et elle est plus forte dans les peuplements âgés. Alors

que, à l'échelle du paysage, la distribution des nids peut présenter une autocorrélation sur plusieurs années. L'étude de Samalens & Rossi (2011) a révélé une autocorrélation spatiale significative de la distribution des nids sur une période de quatre ans, suggérant une influence des caractéristiques environnementales sur la dynamique des attaques à grande échelle.

En plus de la dynamique spatiale, la dynamique temporelle montre aussi une variabilité marquée, avec des fluctuations interannuelles alternant entre phases de pullulation ou de gradation et périodes de latence ou de rétrogradation. Ce phénomène suit un caractère cyclique. D'ailleurs, de nombreuses études ont mis en évidence cette cyclicité des infestations, avec des gradations récurrentes observées dans différentes régions. Toutefois, ces cycles ne sont pas synchronisés à grande échelle, suggérant une influence de facteurs locaux sur leur déclenchement et leur intensité (Li *et al.*, 2015).

Li *et al.* (2015) ont montré que la durée des cycles tend à diminuer avec l'abondance des arbres hôtes. Selon cette étude, plusieurs facteurs peuvent expliquer cette cyclicité des attaques, notamment :

- Les variations de la qualité des arbres hôtes après les épisodes de défoliation.
- La présence et l'efficacité des ennemis naturels.
- La diapause prolongée des larves, qui permet une résurgence des populations après une phase de déclin.

D'un autre côté, Pérez-Romero *et al.* (2019) rapportent une augmentation de la fréquence des cycles épidémiques récurrents de PPM depuis 2014 dans la région sud-est de l'Andalousie (Espagne). Cependant, les données de dendrochronologie sur plus d'un siècle dans l'est de l'Espagne n'ont pas montré de déplacement en altitude ni d'augmentation des défoliations sévères par la PPM, contrairement aux attentes liées au réchauffement climatique (Camarero *et al.*, 2022).

Ainsi, l'étude de la dynamique des attaques de *T. pityocampa* nécessite une approche multi-échelles intégrant à la fois des facteurs locaux et paysagers afin de mieux comprendre les mécanismes de propagation et de régulation des populations. L'utilisation de technologies nouvelles, telles que la télédétection, constitue une avancée significative pour le suivi et la quantification des impacts de PPM à différentes échelles.

Par surcroît, l'utilisation des drones (*Unmanned Aerial Vehicle*) (UAV), représente une avancée majeure pour le suivi et la quantification des impacts de la PPM. Ces outils offrent des perspectives prometteuses, comme en témoignent plusieurs études (Cardil *et al.*, 2017 ; Otsu *et al.*, 2018 ; Pérez-Romero *et al.*, 2019). Contrairement à la télédétection satellitaire, les drones permettent d'observer des signaux de faible intensité spectrale difficiles à détecter depuis les satellites (Otsu *et al.*, 2019). Les images acquises par drones ont ainsi été utilisées pour calibrer et valider des indices calculés à partir des images satellitaire, afin d'identifier les changements de couverture végétale et de déterminer les indices les plus précis pour évaluer la sévérité de la défoliation (Otsu *et al.*, 2018 ; Pérez-Romero *et al.*, 2019).

Etude expérimentale

Chapitre III) Matériels et méthodes

3. Matériels et méthodes

3.1 Objectif et principe méthodologique

Dans le cadre de cette étude, nous avons exploré les interactions écologiques entre l'insecte et l'arbre. Il s'agit, d'une part, de mieux comprendre les mécanismes de sélection de l'arbre hôte par l'insecte, en mettant l'accent sur l'influence des caractéristiques de l'arbre et son feuillage, et d'autre part, d'explorer la réponse physiologique de l'arbre à la défoliation, notamment à travers un changement de la composition chimique des feuilles qui pourrait représenter une défense induite contre la chenille.

L'approche méthodologique adoptée combine des mesures sur terrain, des expérimentations en laboratoire et des analyses biochimiques.

- Dans un premier temps, nous avons réalisé des mesures dendrométriques et des mesures sur le feuillage afin d'évaluer l'influence des caractéristiques morphologiques des arbres (hauteur, circonférence, volume du houppier) ainsi que des paramètres foliaires (longueur et densité des aiguilles) sur la sélection de l'arbre hôte.
- Dans un second temps, l'étude s'est intéressée à la réaction des arbres face à la défoliation et les mécanismes de défense induite. Cette phase expérimentale s'est articulée autour de deux volets :

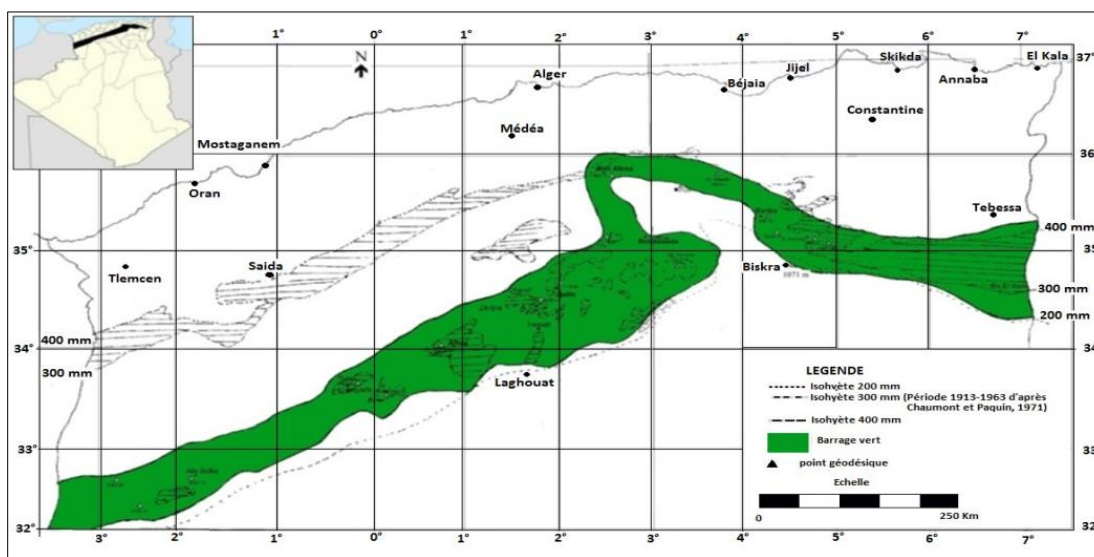
1) Le premier volet s'est focalisé sur le comportement alimentaire des larves L1 en fonction du type de feuillage consommé : feuillage des arbres défoliés et feuillage issu d'arbres non défoliés. Cette partie du travail a été réalisée à travers l'élevage des jeunes larves au laboratoire et le greffage de colonies nouvellement écloses sur des arbres. L'impact trophique des deux types de feuillage a été évalué en mesurant la survie et la taille des larves.

2) Le second volet a consisté à comparer les compositions biochimiques des deux types de feuillage afin de mieux comprendre les différences potentielles dans leur valeur nutritive et leur influence sur le développement des larves.

3.2 Zone d'étude

3.2.1 Aperçu sur le barrage vert

Le Barrage vert (Fig. 8) représente l'un des projets les plus ambitieux de l'Algérie durant la période post-indépendance, il a été conçu pour freiner l'avancée du désert vers le nord. Cette initiative, lancée dans les années 1970, visait à créer une ceinture végétale s'étendant sur 1 500 km de long et 5 à 20 km de large, reliant les frontières ouest et est du pays. Son objectif initial était de servir de bouclier écologique contre la désertification, tout en reconstituant un patrimoine forestier gravement endommagé pendant la guerre de libération nationale (D.G.F 2010).



Le Barrage vert a principalement ciblé les régions de Djelfa, Msila, Batna, Khenchela, Tébessa, Naâma, Laghouat et El-Bayadh. Selon Bensaid (1995), les activités de reboisement ont été dominées par la plantation de pins d'Alep, couvrant 106 000 hectares (86 % du total réalisé), suivies par l'amélioration pastorale (13 000 hectares, 12 %), les plantations fruitières (2 300 hectares) et la fixation des dunes (1 900 hectares), chacune représentant environ 0,5 % des actions.

3.2.1.1 Problème de la monoculture du pin d'Alep

Les reboisements réalisés dans le cadre du Barrage Vert ont été marqués par une monoculture du pin d'Alep, utilisé de manière quasi exclusive jusqu'au début des années 1980. Ce choix se justifiait par l'aptitude naturelle de cette essence par rapport à la région (rusticité et plasticité). Néanmoins, une tendance à la diversification a émergé au fil du temps (Letreuch, 1991). Bien

que le pin d'Alep soit adaptée aux conditions édapho-climatiques difficiles de la région, son implantation massive a favorisé l'installation des ravageurs telle que la chenille processionnaire (Ouldache, 2021). Ces plantations monospécifiques massives ont favorisé la prolifération de cet insecte (Zamoum, 1998), accentuant le stress physiologique d'arbres déjà soumis à des conditions hydriques et climatiques difficiles.

Par ailleurs, le pin d'Alep est une essence hautement inflammable (Jaouadi *et al.*, 2019) qui favorise une propagation rapide des incendies, entraînant fréquemment la destruction complète des peuplements. Dans ce contexte, la diversification des essences, notamment par l'introduction d'espèces fourragères et fruitières permettrait de renforcer la résilience des écosystèmes reboisés, tout en offrant des ressources utiles aux populations locales.

3.2.1.2 Dépérissement actuel des arbres au niveau du barrage vert

Aujourd'hui, le projet du barrage vert connaît un important dépérissement des arbres (Fig. 9), principalement à cause de la sécheresse qui devient de plus en plus fréquente et intense. Par ailleurs, le manque d'eau affaiblit les arbres, ce qui les rend plus sensibles aux attaques d'insectes xylophages, notamment les scolytes, qui profitent de l'état de faiblesse des arbres pour s'y installer et s'y développer.



Figure 9. Dépérissement des arbres (21/04/2024)

3.2.2 Les peuplements échantillonnés

Les observations, les expérimentations et l'échantillonnage ont porté sur trois peuplements différents, les peuplements artificiels de Moudjebara et de Chbika, et le peuplement naturel de Sénalba Chergui (Fig. 10)

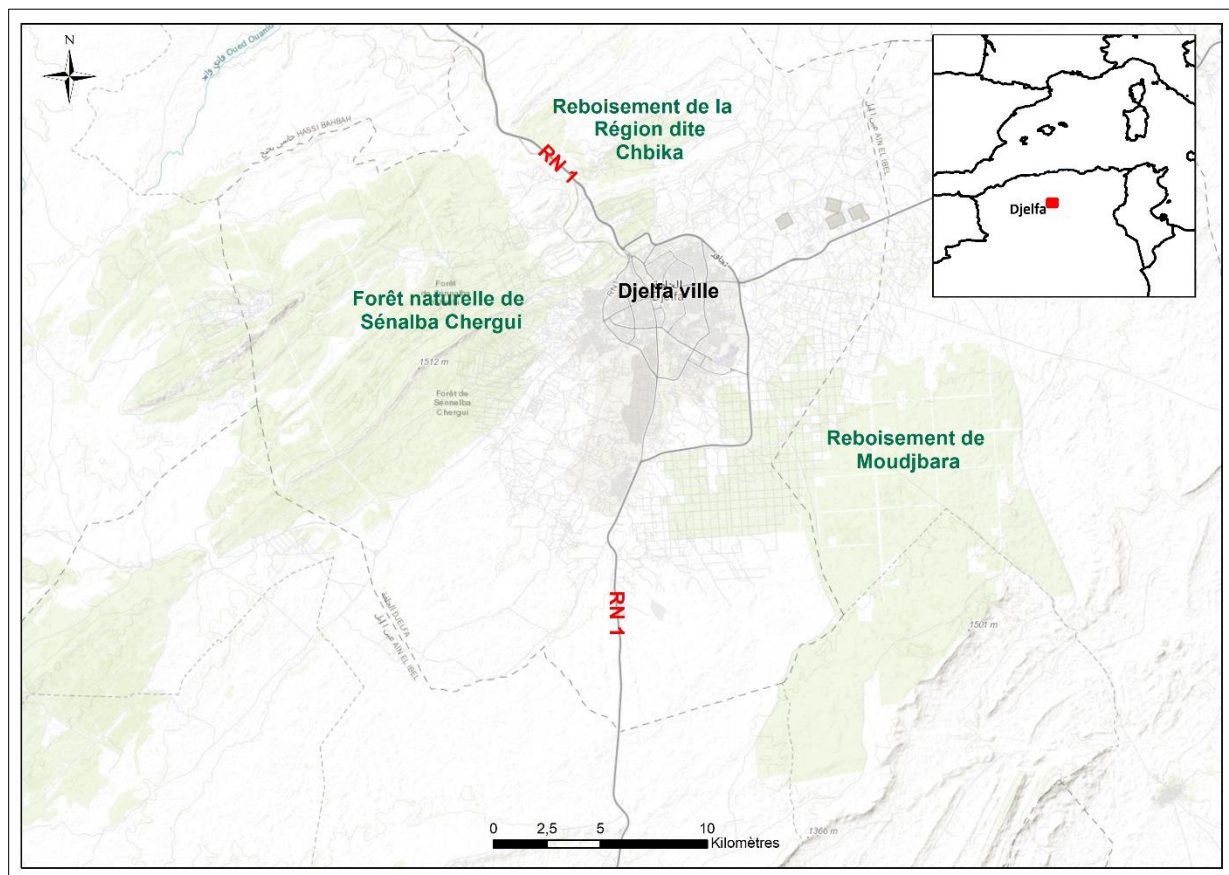


Figure 10. Peuplements échantillonnés

3.2.2.1 Reboisement de Moudjebara

Localisé dans une zone à relief plat et homogène, le reboisement de Moudjebara (Fig. 11) s'étend sur environ 13 000 hectares. Principalement planté en *Pinus halepensis*, le site présente une croissance limitée : la hauteur des arbres varie de 1,70 m sur les pentes à 5,30 m dans les dépressions. La structure du peuplement y est hétérogène, avec un taux de recouvrement oscillant entre 10 % et 100 %, en fonction des conditions stationnelles (Zamoum, 1998).

Situé à proximité immédiate de la ville de Djelfa, ce massif jouxte au sud la forêt dégradée de Djellal Chergui. Les plantations ont été réalisées en lignes, à raison de 2 000 plants par hectare,

et organisées en parcelles de 10 hectares desservies par un réseau de pistes (Zamoum, 1998 ; DGF, 2010).



Figure 11. Reboisement de Moudjebara (06/07/2020)

3.2.2.2 Reboisement de la région dite Chbika

Le reboisement de Chbika (Fig. 12) fait partie intégrante de celui d'Ain Maabed, réalisé dans les années 1970. Ce reboisement constitue une extension de la forêt domaniale de Sahary Guebli, s'étendant vers le massif de Sénalba Gharbi, la hauteur moyenne des arbres comprise entre 2 et 5 mètres. Le sol de la forêt reboisée de Ain Maabed est de type sablo-limoneux sur l'ensemble de ses trois horizons. Il présente un pH basique et une teneur en calcaire faible, variant entre 0,5 % et 3 %. Ce sol issu de grès calcaires, est relativement favorable au développement de la végétation forestière. Toutefois, sa texture sableuse limite sa capacité de rétention d'eau, ce qui rend la régénération naturelle difficile (Zehraoui & Kadik, 2016).



Figure 12. Reboisement de Chbika (06/04/2023)

3.2.2.3 Forêt naturelle de Sénalba Chergui

La série de forêts montagneuses situées au sud-ouest de la ville de Djelfa constitue la forêt naturelle de Senalba Chergui (Fig. 13). Avec le massif de Senalba Gharbi, elle fait partie des plus vastes forêts naturelles de la région, représentant la portion orientale de cet ensemble forestier. La forêt domaniale de Senalba Chergui s'étend sur une superficie de 19 833 hectares. Elle est principalement composée de pin d'Alep (*Pinus halepensis*), espèce dominante dans ce milieu. Le pin d'Alep est fréquemment associé au chêne vert (*Quercus ilex*), ainsi qu'au genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea*). Les sols présentent principalement des caractéristiques pédogénétiques telles qu'une accumulation de calcaire, une faible profondeur et un déficit hydrique marqué (Mouissa *et al.*, 2018).



Figure 13. Forêt naturelle de Sénalba Chergui (14/09/2022)

3.2.3 Parcelles d'échantillonnage

L'échantillonnage a été effectué dans plusieurs Parcelles : deux situées dans le reboisement de Moudjebara, deux dans celui de la région de Chbika, et une autre parcelle choisie dans la forêt naturelle de Sénalba Chergui (Fig. 14 et Tab.3).

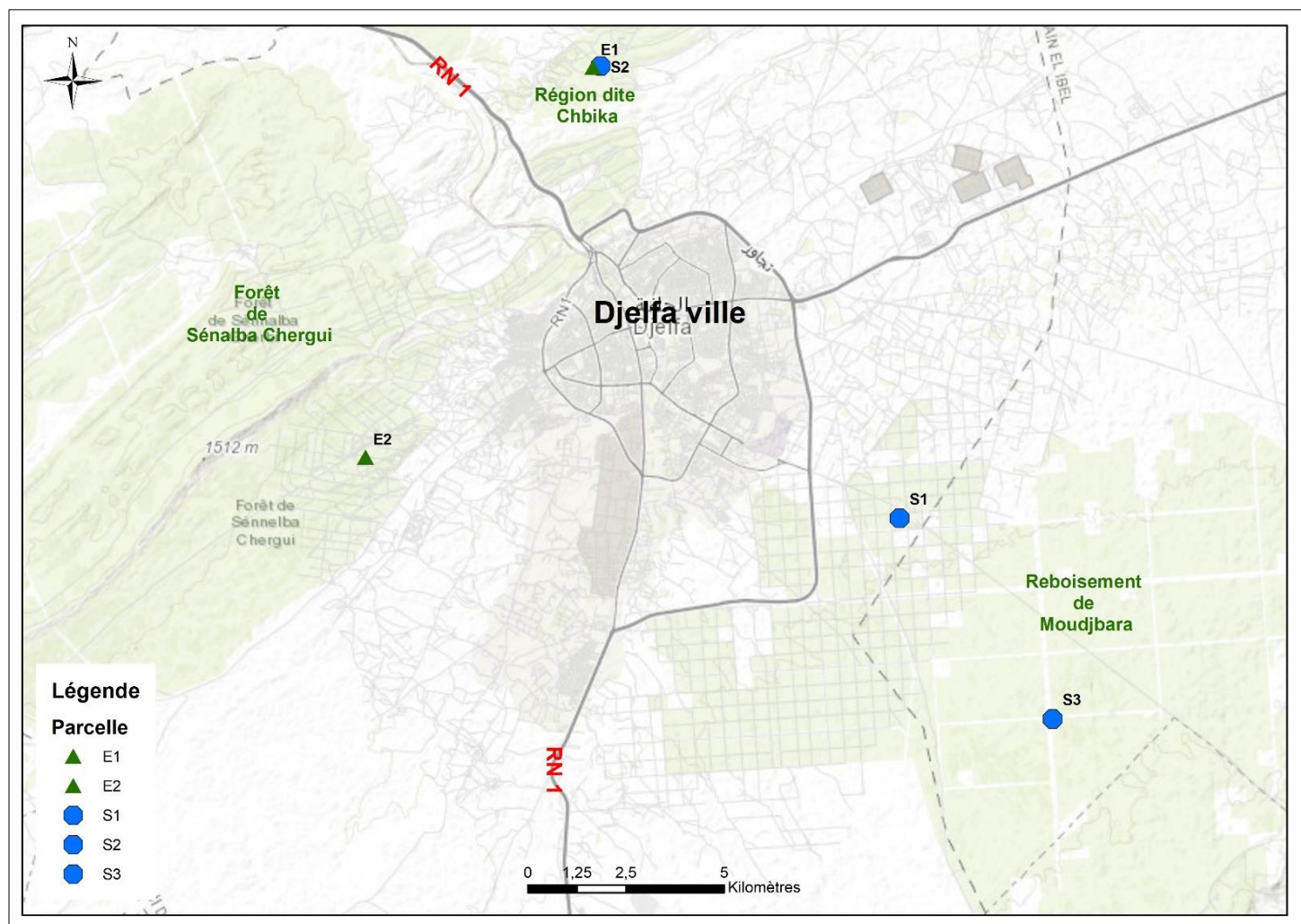


Figure 14. Situation des parcelles d'échantillonnage

Tableau 3. Récapitulatif de l'échantillonnage parcelle

Parcelle	Type du peuplement	Coordonnées	Type d'échantillonnage	Objectif
E1	Reboisement (Chbika)	34°39'4.52"N 3°11'31.55"E	• Défoliation assistée • Prélèvement du feuillage pour l'alimentation des larves	Etude de l'interaction trophique (Relation trophique, Défenses chimiques)
E2	Naturel (Sénalba Chergui)	34°43'28.16"N 3°14'38.60"E	• Prélèvement du feuillage pour les analyses chimiques • Suivi des colonnées greffées sur les arbres	
S1	Reboisement (Moudjebara)	34°38'23.30 N 3°18'51.51 E	• Mesures dendrométriques et biométriques de feuillage • Dénombrement des pontes et des nids d'hiver	Etude de l'influence des caractéristiques d'arbre et des aiguilles sur le choix de l'hôte
S2	Reboisement (Chbika)	34°43'29.10"N 3°14'45.10"E		
S3	Reboisement (Moudjebara)	34°37'28.82"N 3°20'11.83"E		

3.2.4 Etude climatique

La description climatique de la zone d'étude a été réalisé sur la base des données mensuelles des précipitations, et des températures (maximales et minimales mensuelles) extraites de la plateforme Climate Engine (Climate Engine, 2025), pour la période 1995 -2024.

3.2.4.1 Température

La température constitue un facteur limitant majeur pour *Thaumetopea pityocampa*. Le nombre d'heures durant lesquelles les températures sont favorables à l'alimentation des larves est un paramètre clé pour leur survie (voir chapitre 1).

Dans notre région d'étude, la température moyenne des minimales enregistrées durant le mois le plus froid (janvier) est de -0,33 °C, tandis que celle des maximales du mois le plus chaud

(juillet) atteint 35,98 °C (Tab. 4). Cela traduit une amplitude thermique importante entre les températures extrêmes (Fig. 15).

Tableau 4. La température moyenne min et max mensuelles de la région d'étude

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
t min (C°)	-0.33	0.39	2.91	6.10	10.17	15.69	18.08	17.22	13.60	9.25	3.80	0.70
T max(C°)	9.93	11.96	15.21	20.16	24.58	31.34	35.98	34.53	28.17	21.87	14.85	11.05
P (mm)	29.92	23.21	30.00	30.53	30.77	16.99	6.47	17.46	32.08	23.90	31.21	25.98

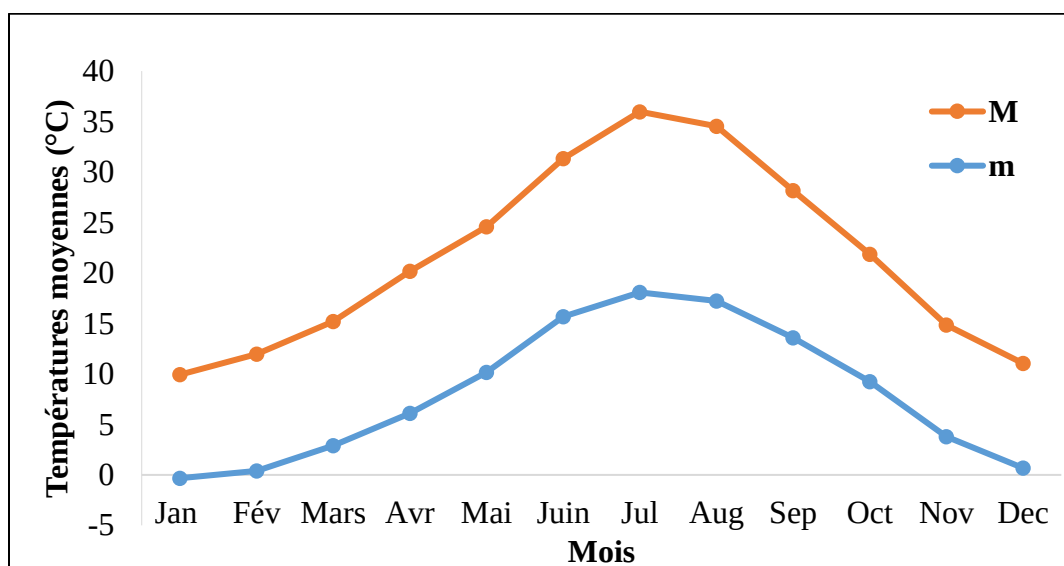


Figure 15. Amplitude thermique entre les températures maximales et minimales mensuelles

3.2.4.2 Diagramme ombrothermique

Les résultats indiquent la présence de six mois secs au cours de la période étudiée (Fig. 16). Une sécheresse estivale marquée s'étend de mai à octobre, tandis que l'hiver est caractérisé par des périodes plus humides, ce qui correspond aux traits d'un climat typiquement méditerranéen.

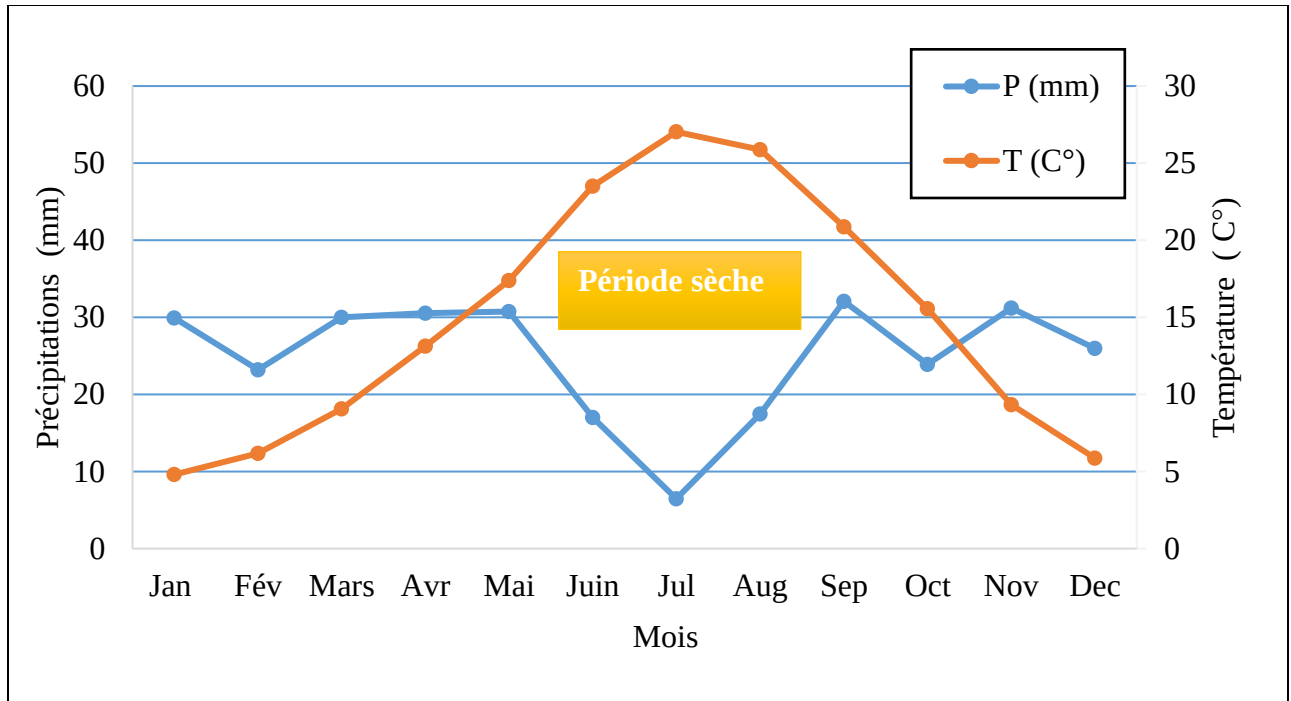


Figure 16. Diagramme de Bagnouls et Gaussen (1954) de la région d'étude

3.2.4.3 Climagramme d'Emberger

Le climagramme d'Emberger est un outil de synthèse climatique permet de situer une station dans un étage bioclimatique. Il repose sur un indice climatique (Q2), calculé à partir de la formule suivante :

$$Q2 = (2000 \times P) / (M^2 - m^2)$$

où :

- P représente la pluviométrie annuelle en millimètres.
- M correspond à la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (en °C).
- m est la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (en °C).

Dans notre cas, l'indice Q2 obtenu est de 33,57 et la valeur de m est de 0,1 °C, ce qui permet de classer la station de Djelfa dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver froid (Figure.17).

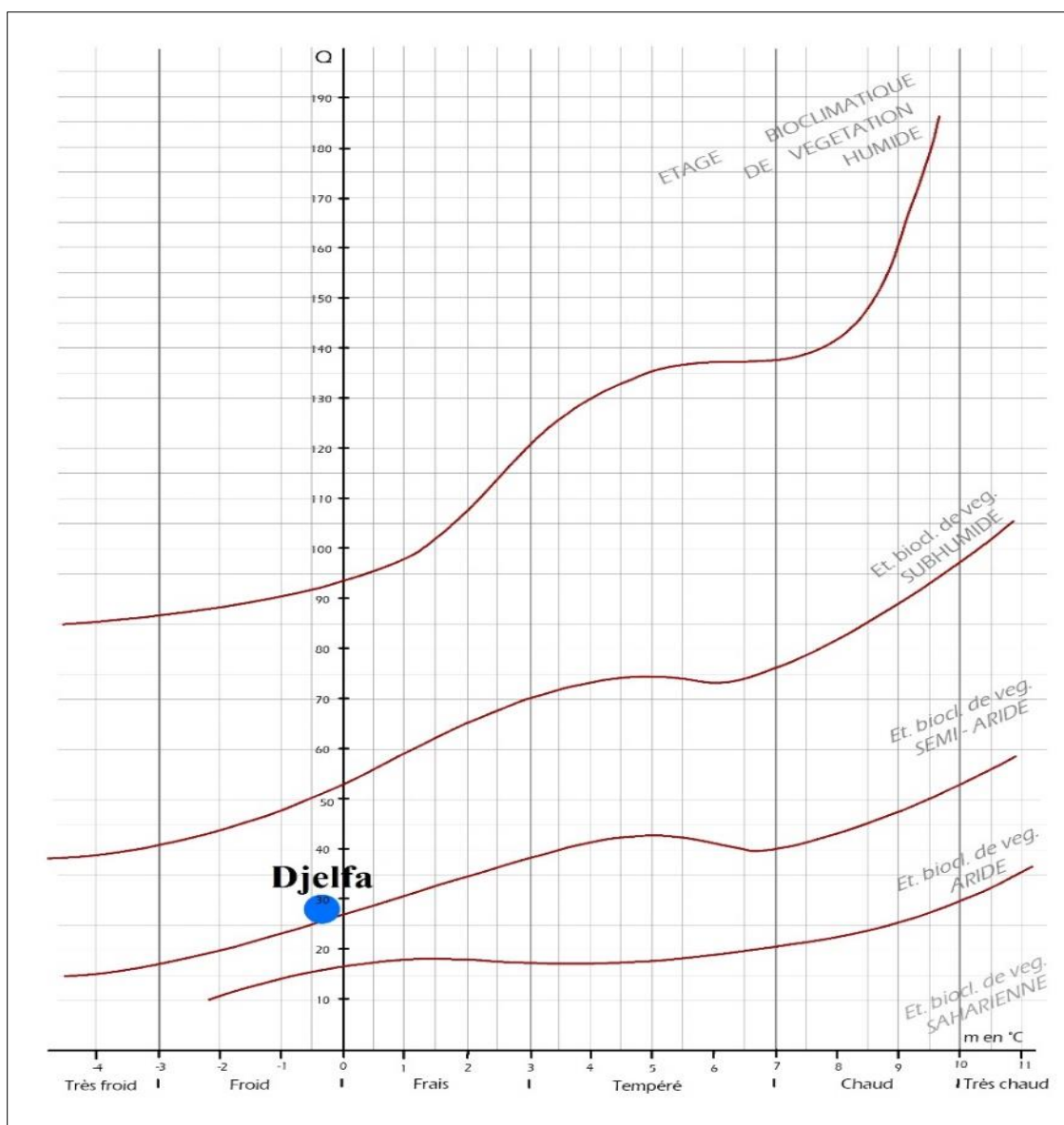


Figure 17. Climagramme d'Emberger de la région d'étude (Djelfa)

3.3 Méthodologie d'étude de l'interaction trophique (Relation trophique, Défenses chimiques)

3.3.1 Méthode de défoliation assistée

En novembre 2021, une défoliation assistée a été réalisée en infestant des arbres avec des nids du troisième stade larvaire, collectées à partir d'arbres voisins. Au total 48 arbres ont fait l'objet de défoliation, 23 au niveau d'E1 et 25 à l'E2. Le nombre de nids utilisées varient d'un arbre à l'autre en fonction de la taille du houppier et en se référant à des constatations sur la relation entre le nombre de nids et les taux de défoliation faite sur des peuplements infestés (Hóðar *et al.*, 2015). Globalement il était prévisible d'utiliser entre 3 et 4 colonies par arbre pour obtenir un taux de défoliation supérieure à 90%. Parallèlement aux arbres échantillonnés pour la défoliation assistée, 19 arbres ont été désignés témoins 9 dans le site E1 et 10 dans E2. Les témoins ont été choisis selon leur ressemblance par rapport aux défeuillés (taille, position sociale) et selon l'absence de tout signe d'attaque, nids, pontes.

- L'ensemble des arbres défoliés et témoins ont été utilisés pour récolter le feuillage destiné aux analyses chimique et pour nourrir les larves en laboratoire, ainsi que pour le greffage des colonies sur ces arbres.

3.3.2 Méthode d'élevage des larves au laboratoire

Cette partie du travail a été effectuée durant les mois d'Aout et septembre 2022 au laboratoire de la station de recherche de l'INRF à Djelfa, sous les conditions ambiantes. Des lots de pontes ont été récoltés aléatoirement et mises en incubation dans des tubes en verres au laboratoire au début du mois d'aout 2022 (Fig. 18).



Figure 18. Incubation des pontes dans des tubes en verres au laboratoire

- Chaque ponte a été transférée dans une boîte de Pétri au moment de l'éclosion. Après l'éclosion, les larves ont été nourries avec du feuillage prélevé sur les arbres au niveau d'E1 et E2, selon la répartition suivante : trois arbres défoliés et trois arbres témoins dans E1, et trois arbres défoliés et trois arbres témoins dans E2.
- Le feuillage utilisé pour nourrir les larves a été renouvelé quotidiennement en remplaçant soigneusement le rameau épuisé par un rameau fraîchement récolté. La couverture de la base du rameau par du coton imbibé d'eau distillée a permis d'éviter un dessèchement rapide des aiguilles (Fig. 19). Le taux de survie a été estimé en comptant le nombre de larves ayant atteint le deuxième stade larvaire L2 par rapport au nombre d'éclosions initiales.



Figure 19. Élevage des larves L1 au laboratoire

3.3.3 Méthode de suivi des jeunes colonies sur les arbres

Ce suivi a été réalisé en greffant (fixant) des pontes sur les arbres (Fig. 20). En septembre 2022, 195 lots de pontes ont été placés sur 65 arbres, répartis en 31 arbres pour le site E1 et 34 pour le site E2, avec 3 lots de pontes par arbre après confirmation qu'aucun autre ponte n'était présente (Hódar *et al.*, 2015). Les arbres ont été contrôlés quotidiennement afin d'observer l'émergence de jeunes larves sur les cimes.

- Une fois le deuxième stade larvaire L2 atteint, deux paramètres ont été pris en compte :
 - Le nombre de pré-nids trouvé sur les arbres a permis d'estimer le taux de survie des jeunes colonies
 - Les colonies ont ensuite été transférées au laboratoire pour mesurer la taille des larves.



Figure 20. Greffage des jeunes colonies sur les arbres

3.3.4 Méthode de mesures de la taille des larves

Les mesures de longueurs des larves ont été effectuées sur un échantillon de 200 larves prélevées de 40 colonies (5 larves par colonies), correspondant à 40 arbres (une colonie par arbre). Les mesures ont été prélevées à l'aide d'une loupe micrométrique graduée d'un grossissement « X10 » (Fig .21). Après avoir été mises dans le formol pendant 24 h, les larves ont été étalées sur des lames en verre et fixées à l'aide d'une colle transparente.



Figure 21. Mesures de la taille des larves

3.3.5 Analyse chimique de feuillage

L'ensemble des analyses ont porté sur les terpènes (monoterpènes, sesquiterpènes, diterpènes), le phénol total ainsi que sur le taux d'azote (N) et de carbone (C). Les analyses des terpènes et le dosage de phénol total ont été effectués au laboratoire du CRAPC (Alger), tandis que les dosages en azote et en carbone ont été réalisés dans les laboratoires de l'École Nationale Supérieure Agronomique (ENSA) d'Alger.

3.3.5.1 Méthodes d'analyse des terpènes

L'analyse des terpènes a été effectuée par la méthode de GC-MS. Les échantillons de feuillage ont été récoltés au début de Septembre 2022 en coïncidence avec la période d'éclosion (Zamoum, 1998). Les rameaux d'aiguilles récoltés de différentes parties du houppier ont été mis soigneusement dans du papier aluminium et placés dans des sacs scellés puis transportés au

laboratoire, conservés dans des glacières (Fig . 22). L'extraction de l'huile essentielle a été réalisée dans le laboratoire de Biochimie à l'INRF Alger, par la méthode d'hydro distillation.



Figure 22. Récolte de feuillage

3.3.5.1.1 Extraction de l'huile essentielle se fait par hydrodistillation

- Un poids de 100 à 150 g de matière fraîche est prélevé de chaque sachet pour extraire l'huile essentielle des aiguilles sur une durée de 2H 30Mn (Fig .23).



Figure 23. Extraction de l'huile essentielle par hydrodistillation

- L'huile essentielle récupérée est séchée au sulfate de sodium anhydre puis conservée dans des tubes hermétiquement fermés au froid.

3.3.5.1.2 Conditions d'analyse GC-MS

L'analyse GC-MS des huiles essentielles a été réalisée à l'aide d'un système informatisé Hewlett Packard (Fig. 24) comprenant un chromatographe en phase gazeuse 6890 couplé à un spectromètre de masse 5973A, équipé de colonnes capillaires en silice (HP-5MS, longueur de 30 m, diamètre intérieur de 0,25 mm et épaisseur du film de 0,25 μm). L'hélium (pureté de 99,99 %) était le gaz porteur progressant à un débit de 0,6 mL/min. Le volume d'injection était de 0,2 μL (split 1:80, température 250°C). Pour les conditions MS, le temps de balayage et la gamme de masse étaient respectivement de 283 s et de 29 à 550 m/z. Le gradient de température du four, a été maintenu à 45°C pendant 8 min, puis programmé à 250°C à 2°C/min et maintenu en isotherme pendant 10 min. L'identification des constituants des huiles essentielles a été basée sur la comparaison de leurs indices de Kovats (KI), qui ont été calculés en utilisant les temps de rétention d'une série homologue de n-alcanes (C8-C28, Sigma-Aldrich, SanLuis, Missouri, USA) avec ceux de la littérature (Adams, 2007) (Babushok et al, 2011). L'identification a été confirmée en comparant les spectres de masse obtenus avec ceux d'échantillons authentiques figurant dans les bibliothèques de systèmes de données (MS NIST 2020 et Wiley 07) et avec les données de la littérature (Adams, 2007). Les concentrations des composés (%) ont été calculées en intégrant les surfaces des pics chromatographiques correspondants à l'aide du logiciel ChemStation.



Figure 24. L'analyse GC-MS des huiles essentielles

3.3.5.1.3 Méthode de dosage de phénol total

Le dosage de phénol total a été réalisé selon la méthode de Singleton et al., (1999), en utilisant le réactif de Folin-Ciocalteu. Ce réactif, réduit par les composés phénoliques présents dans l'échantillon, forme un complexe de couleur bleue, dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en phénols.

L'extraction aqueuse de feuillage (Fig. 25) a été suivie d'une quantification par spectrophotométrie utilisant le réactif de Folin-Ciocalteu. L'absorbance a été mesurée à 765 nm, avec une courbe d'étalonnage basée sur l'acide gallique (10-200 µg/ml) (Annexe II). Les résultats sont exprimés en µg EAG/mg d'extrait.



Figure 25. L'extraction aqueuse de feuillage

3.3.5.1.4 Azote et carbone

Pour ces analyses les prélèvements ont été effectués en Octobre sur les mêmes arbres. Les échantillons ont ensuite été purifiés, séchés, et broyés à l'aide d'un moulin électrique jusqu'à obtenir une poudre végétale fine (Fig. 26). L'analyse de l'azote (N) a été réalisée selon la méthode de Kjeldahl (Bremner, 1960), tandis que le poids total de carbone dans la matière végétale est estimé en multipliant le poids de la matière végétale incinérée $\times 0,72$.

Le principe de la méthode de Kjeldahl repose sur trois étapes principales :

- **Minéralisation** : L'échantillon (1 g de poudre végétale) est digéré avec 20 ml de l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur. Cette étape permet de transformer l'azote organique en ion ammonium (NH_4^+).

- Distillation : Après minéralisation, 25 ml de NaOH (soude) est ajoutée pour libérer l'ammoniac (NH_3). Celui-ci est ensuite entraîné par distillation et capté dans 10 ml de solution d'acide borique à 4%, contenant un indicateur coloré.
- Titration : L'ammoniac piégé est dosé par titrage avec une solution d'acide sulfurique de 0,05 mol/L. Le volume d'acide utilisé permet de calculer la quantité d'azote présente dans l'échantillon.



Figure 26. Poudre végétale fine de feuillage

3.3.6 Analyses statistiques

3.3.6.1 Analyses des données sur les larves

- 1) Un test *T* de Student a été utilisé pour comparer :
 - Le taux de survie des larves en élevage de laboratoire
 - La longueur des larves issue de colonies fixées sur les arbres.
- 2) Un ANOVA à deux facteurs a été employée pour analyser l'effet combiné de deux variables (ex : défoliation des arbres et site d'étude E1/E2) sur :
 - Le taux de survie des larves L1
 - La longueur des larves.

3.3.6.2 Analyse des données de la composition chimiques du feuillage

- 1) Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour l'ensemble des variables obtenus de l'analyse chimique des feuillages, comprenant : 50 terpènes identifiés, monoterpènes, sesquiterpènes, diterpènes, le phénol total, l'azote (N) et le carbone (C).

Tous les composés ont été inclus, car certains terpènes, même en faibles quantités, pourraient jouer un rôle dans la défense des arbres (Whitehill *et al.*, 2023).

- 2) Un test T a ensuite été appliqué aux variables les plus fortement corrélées avec le premier axe (PC1) de l'ACP pour identifier les différences significatives entre groupes.

Les données ont été préalablement testées pour vérifier leur normalité et leur homoscedasticité. Toutes les ACP, les tests statistiques et la création des graphiques ont été réalisés à l'aide du logiciel R version 4.3.3 (R Core Team 2024)

3.4 Méthode d'étude de l'influence des caractéristiques morphométriques d'arbre et des aiguilles sur le choix de l'hôte

3.4.1 Choix des parcelles et des arbres

En septembre 2021, trois sites (S1, S2 et S3, voir Fig. 14 et Tab. 3) ont été sélectionnés dans des zones présentant une infestation modérée par *Thaumetopoea pityocampa* (PPM). Les arbres présents sur ces sites mesuraient entre 1,3 et 4 mètres de hauteur. Chaque site couvre une superficie d'environ 30×30 mètres, et les arbres choisis ne présentaient aucun signe de dépérissement ni de défoliation sévère l'année précédente. En septembre, le nombre de pontes a été dénombré sur l'ensemble du houppier de chaque arbre (Fig. 27), et en février, le nombre des nids d'hiver a été relevé.



Figure 27. Dénombrement des pontes de PPM sur les arbres

Pour chaque arbre, plusieurs caractéristiques ont été mesurées :

- Hauteur totale
- Circonférence du tronc

- Volume de houppier. Ce dernier a été estimé à l'aide de la formule du volume d'un ellipsoïde :

$$V = 4/3\pi abc$$

Où a, b, et c représentent respectivement les demi-axes correspondant à la hauteur, la longueur et la largeur de houppier.

3.4.2 Méthode des mesures biométriques du feuillage

Pour l'analyse des caractéristiques de feuillage, six arbres ont été sélectionnés sur chacun des trois sites (soit un total de 18 arbres). Sur chaque arbre, trois rameaux d'aiguilles ont été prélevés, chacun sur une branche orientée différemment au sein du houppier.

Pour chaque rameau, deux variables ont été mesurées :

- Le nombre total d'aiguilles.
- La longueur moyenne des aiguilles.

Ces données ont permis de caractériser la densité et la taille des aiguilles, deux paramètres susceptibles d'influencer la sélection de l'arbre hôte par la processionnaire (Fig.28).



Figure 28. Mesures de nombre total et longueur moyenne des aiguilles par rameau

3.4.3 Analyses statistiques

- 1) Nous avons d'abord réalisé une analyse descriptive de peuplements nos stations. Pour cela, nous avons utilisé des boxplots afin de visualiser les caractéristiques mesurées sur les arbres de chaque station (hauteur des arbres, circonférence, volume foliaire)
- 2) Ensuite, nous avons utilisé des modèles linéaires mixtes généralisés (GLMM) avec une distribution de Poisson pour évaluer l'effet de diverses caractéristiques des arbres et des aiguilles sur l'abondance des pontes et des nids de (PPM). Les caractéristiques des arbres telles que la hauteur, la circonférence et le volume du houppier, ainsi que les caractéristiques de feuillage telles que la longueur des aiguilles et le nombre d'aiguilles par rameau, ont été traitées comme des facteurs fixes dans les modèles. En outre, le site a été inclus comme effet aléatoire pour tenir compte de la variabilité spatiale entre les trois sites d'étude.

Toutes les analyses et la création des graphiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R version 4.3.3 (R Core Team 2024).

Chapitre IV) Résultats

IV.1 Interaction trophique (Relation trophique, Défenses chimiques)

4. Résultats

4.1 Interaction trophique (Relation trophique, Défenses chimiques)

4.1.1 Survie des larves en élevage au laboratoire

L'élevage des larves L1 en laboratoire a montré que le taux de survie des larves alimentées sur le feuillage prélevé des arbres non défoliés est deux fois plus élevé par rapport à celui des larves nourries sur du feuillage prélevé des arbres défoliés. Les taux moyens sont $58.2 \pm 15.4\%$ et $28.96 \pm 06.77\%$ respectivement ce qui correspond à une perte de 29,24% (Fig. 29), qualifié significatif par le test *T* de Student (T-test $t = -4.2577$, $df = 6.865$, $p\text{-value} = 0.003$).

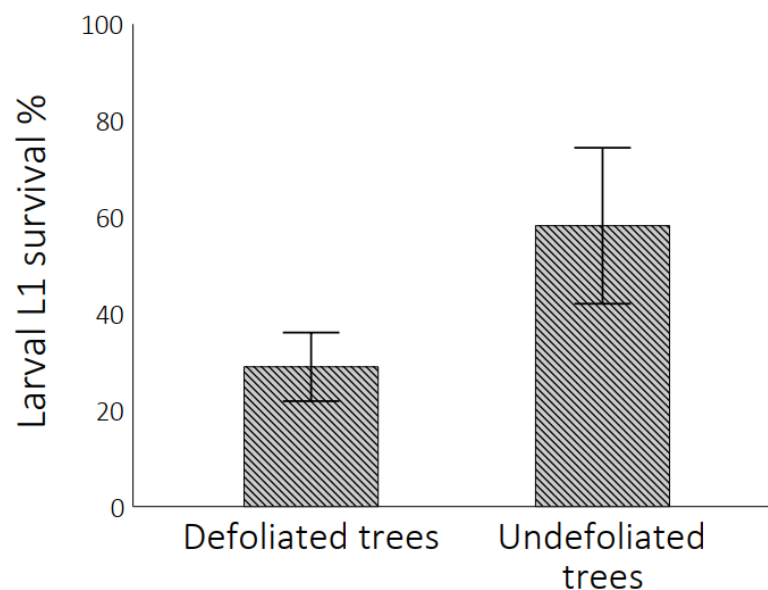


Figure 29. Survie des larves en élevage au laboratoire avec $\pm$ SE (Erreur standard).

De plus, l'analyse ANOVA à deux facteurs a révélé que le taux de survie des larves L1 dépendait du type de feuillage plutôt que du site de récolte (Tab. 5). Ceci indique que le feuillage des arbres non défoliés fournit un support supérieur pour la survie des larves L1 par rapport au feuillage des arbres défoliés.

Une mortalité élevée a été constatée parmi les larves alimentées sur les nouvelles aiguilles qui apparaissent après la défoliation. Cette constatation est similaire à celles faites pour d'autres espèces de pins (Battisti, 1988 : Hódar *et al.*, 2004) et le cèdre de l'Atlas (Sbabdji & Kadik, 2011).

Tableau 5. ANOVA à deux facteurs a (type de feuillage, site de récolte) pour la survie des larves en élevage au laboratoire

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (<F)
Site	1	0.00028	0.00028	0.016	0.90
Feuillage	1	0.25	0.256	14.88	0.005 **
Site × Feuillage	1	0.00331	0.0033	0.192	0.672
Residuals	8	0.138	0.017		

4.1.2 Survie des jeunes colonies sur les arbres

Une constatation similaire a été faite pour la survie des colonies greffées. En effet, les résultats révèlent que le taux de survie des colonies était significativement plus élevé sur les arbres non défoliés. Les valeurs moyennes sont 48% pour le site E1 et 44,4% pour le site E2 pour le cas des arbres non défoliés alors qu'elles sont uniquement de 21,79% pour E1 et 15,9% pour E2 en ce qui concerne les colonies greffées sur les arbres défoliés (Fig. 30).

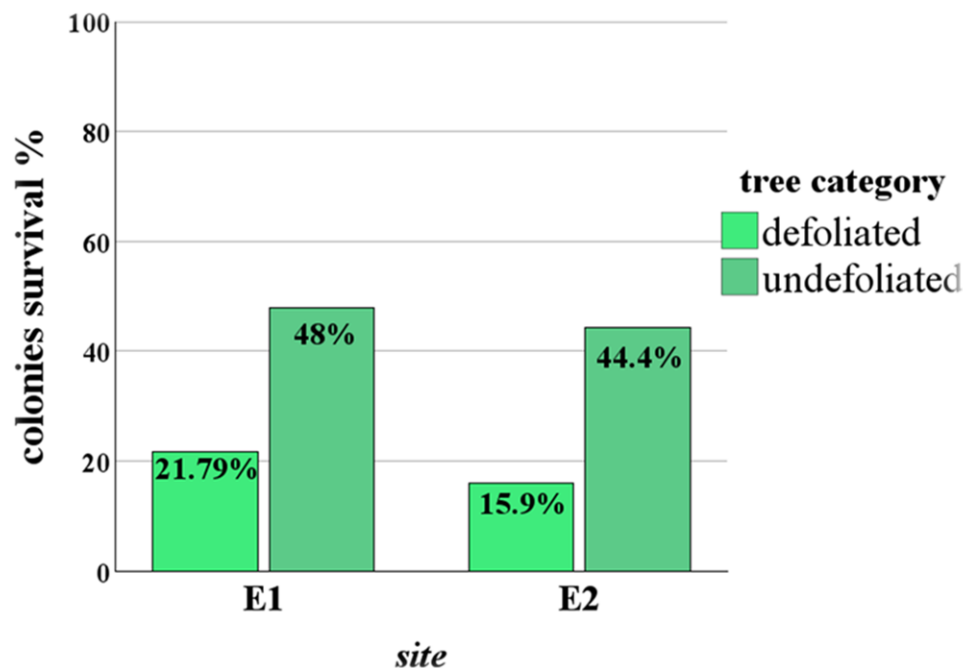


Figure 30 Taux de survie des colonies greffées dans les deux sites E1 et E2 selon la catégorie d'arbre.

Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle il existe une relation directe entre la défoliation antérieure de *Pinus halepensis* et la survie des larves de PPM. (Zamoum & Démolin, 2004).

4.1.3 Croissance des larves

En ce qui concerne la croissance, Les résultats de l'ANOVA à deux facteurs (Tab. 6) indiquent que la catégorie d'arbre (défolié ou non défolié) a un impact significatif sur la longueur des larves. Par contre, le facteur site (E1 ou E2) n'a pas d'influence significative. Sur les arbres non défoliés, la longueur moyenne des larves était de $5,96 \pm 1,22$ mm pour le site E1 et de $6,14 \pm 1,48$ mm pour le site E2. Par contre, sur les arbres défoliés, la longueur moyenne des larves est de $5,20 \pm 0,75$ mm pour E1 et de $5,41 \pm 1,22$ mm pour E2 (Fig. 31), soit une perte de croissance de l'ordre de 0,76 mm en E1 significatif par le test *T* de Student ($t = -3,5555$, $df = 65,811$, $p\text{-value} = 0,0007$) et de 0,73 mm en E2 ($t = -2,6724$, $df = 97,519$, $p\text{-value} = 0,009$).

Tableau 6. Résultats du test ANOVA à deux facteurs (catégorie d'arbre et site) effectué sur la longueur des larves.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(<F)
Site	1	3.93	3.934	2.74	0.10
Catégorie d'arbre	1	27.14	27.135	18.90	0.0000222 ***
Site × Catégorie d'arbre	1	0.01	0.008	0.006	0.94
Residuals	195	279.98	1.436		

Ce résultat souligne l'importance du feuillage mature pour un développement larvaire optimal. Cette réduction de croissance chez les insectes herbivores pourrait être attribuée aux mécanismes de défense de l'arbre, comme l'ont suggéré (Clancy 2002)

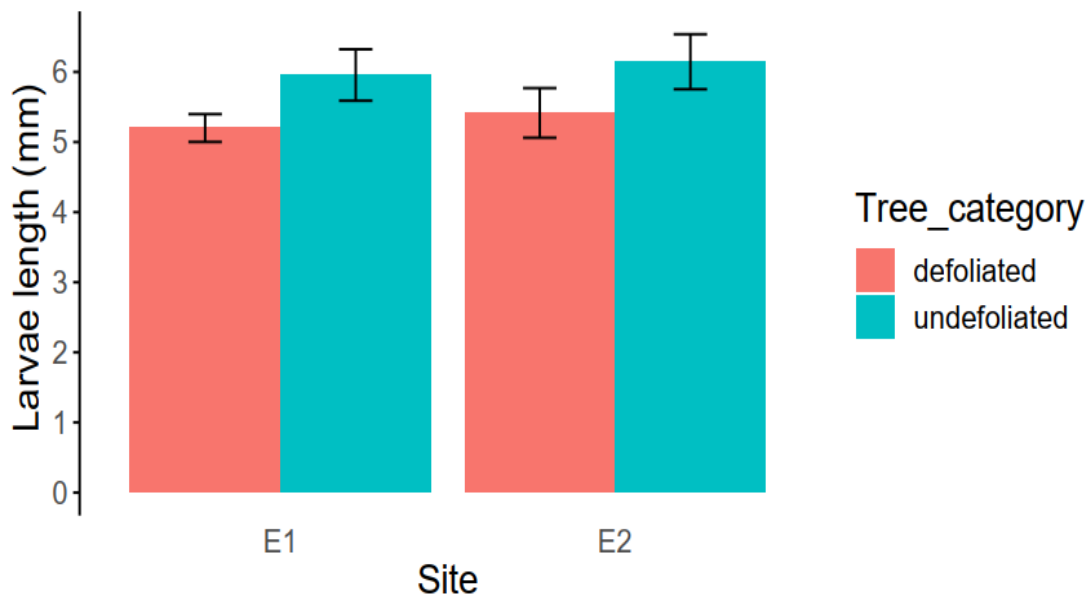


Figure 31. Longueur moyenne des larves par catégorie d'arbre dans les sites E1 et E2, avec $\pm$ SE (Erreur standard).

4.1.4 Composition chimique de feuillage

L'utilisation d'une analyse chimique par GC-MS (Chromatographie en Phase Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse) a permis de déterminer la composition chimique des huiles essentielles (HE), conduisant à l'identification de 50 composés différents. La somme de leurs concentrations correspond à une moyenne de $98,03 \pm 1,33$ % ($\pm$ écart-type) des HE, indiquant un degré de précision très élevé dans l'identification des composés volatils des HE. Les principaux composés identifiés sont (Tab.7) :

Tableau 7. Les principaux composés identifiés par l'analyse GC-MS

Composé	Concentration
trans-caryophyllène	(22,13 $\pm$ 7,20 %)
isovalerate de phénéthyle	(18,52 $\pm$ 4,02 %)
α -pinène	(8,06 $\pm$ 4,13 %)
β -myrcène	(5,60 $\pm$ 1,37 %)
α -humulène	(5,17 $\pm$ 1,46 %)

Cependant, la présence exclusive d'acétate de bornyle, dans les échantillons de feuillage des arbres défoliés à une concentration de $0,25 \pm 0,14$ %, mérite d'être soulignée.

La composition des échantillons de HE est très similaire à celle rapportée dans les études menées dans la même région (Djelfa) (Djerrad et al., 2015 ; Haichour 2023). Globalement un total de 19 monoterpènes, 15 sesquiterpènes et 13 diterpènes ont été identifiés.

4.1.5 Variations des composés biochimiques de feuillage

4.1.5.1 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) a permis de distinguer efficacement les deux catégories de feuillage, le feuillage des arbres défoliés et le feuillage des arbres non défoliés. Cependant, les sites E1 et E2 n'ont montré aucune influence significative (aucune distinction). Le premier axe, PC1, explique 33,90 % de la variance totale (Fig. 32), et le deuxième axe, PC2, 20,10 %, ces deux axes cumulant 54,01 % de la variance. PC1 a permis une séparation entre les deux catégories de feuillage, avec un $R^2 = 0,49$ et une valeur de p-value = 0,01.

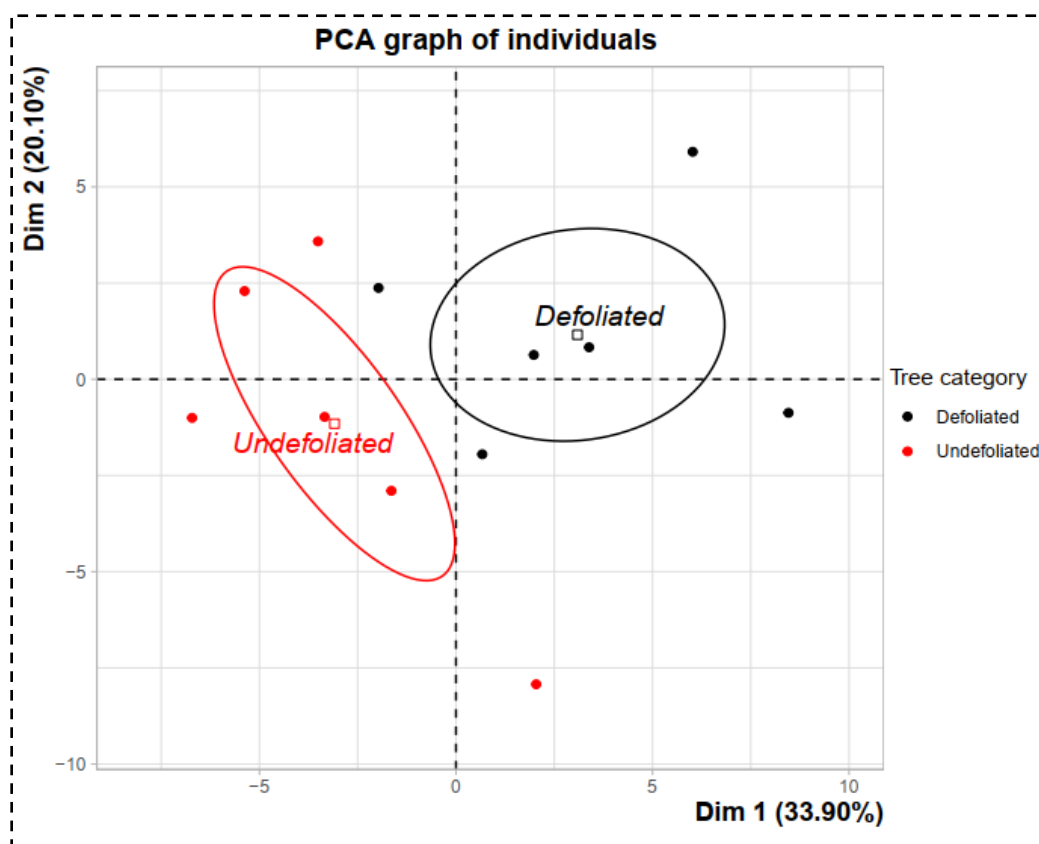


Figure 32. Graphique des facteurs individuels ACP de la composition biochimique foliaire

L'axe PC1 a été associé à 28 variables, les corrélations les plus significatives étant observées pour le méthyl déshydroabiéstate, l' α -humulène, le trans-caryophyllène, le déshydroabiétal et les

sesquiterpènes (Tab. 8). Les terpènes présentant la corrélation la plus positive avec PC1 étaient le méthyl déshydroabiéstate, le déshydroabiétal et le p-cymène.

Tableau 8. Corrélation des variables avec PC1

Variables	Correlation with PC1
Methyl dehydroabietate	0.94
Dehydroabietal	0.85
p- cymene	0.79
(3E)-Cembrene A	0.77
Cembrene	0.77
C % (dry weight)	0.76
Methyl abietate	0.76
diterpenes	0.75
(3Z)-Cembrene A	0.75
C/N	0.70
Camphene	0.66
Pulegone	0.62
Phyllocladene	0.61
Eudesm-7(11)-en-4-ol	0.61
Cembrienol	0.60
Phenols	0.59
γ -Terpinene	-0.62
δ -Cadinene	-0.63
α -Cubebene	-0.68
Linalool	-0.69
(E)- α -Bisabolene	-0.69
(E)- β -Ocimene	-0.75
(E)- β -Farnesene	-0.76
α -Ylangene	-0.81
Germacrene D	-0.84
sesquiterpenes	-0.84
Trans-caryophyllene	-0.93
α-Humulene	-0.94

4.1.5.2 Tests *T* de Student

Le test *T* de Student a révélé une différence significative entre les feuillages des arbres défoliés et non défoliés pour les variables suivantes :

- p-cymène ($t = 3,365$, $df = 9,991$, $p\text{-value} = 0,007$)
- α -humulène ($t = -3,279$, $df = 7,854$, $p\text{-value} = 0,01$)
- trans-caryophyllène ($t = -3,85$, $df = 9,989$, $p\text{-value} = 0,003$)

En revanche, le méthyl déshydroabiéstate et le déshydroabiétal n'ont montré aucune différence significative.

La concentration en p-cymène est de $0,60 \pm 0,13$ % (moyenne $\pm$ écart-type) dans le feuillage des arbres défoliés, contre $0,34 \pm 0,13$ % pour les arbres non défoliés. À l'inverse, les concentrations de trans-caryophyllène et d' α -humulène sont plus élevées chez les arbres non défoliés, avec respectivement $27,46 \pm 4,72$ % et $6,18 \pm 0,74$ %, comparé aux valeurs des arbres défoliés ($16,80 \pm 4,87$ % et $4,16 \pm 1,32$ %) (Fig. 33).

La concentration en azote (N) est significativement plus élevée dans le feuillage des arbres défoliés avec $1,13 \pm 0,004$ % en poids sec par rapport à $1,12 \pm 0,004$ % pour les arbres non défoliés ($t = 2,503$, $df = 9,9827$, $p\text{-value} = 0,03$). En revanche, les sesquiterpènes sont plus concentrés chez les arbres non défoliés ($59,39 \pm 6,59$) par rapport aux arbres défoliés ($46,96 \pm 5,16$), cette différence étant significative par le test *T* de Student ($t = -3,6332$, $df = 9,453$, $p\text{-value} = 0,005$). En fin, aucune différence significative n'a été observée par le même test pour lephénol total, les monoterpènes, les diterpènes, le carbone (C) ou le rapport C/N entre les deux types de feuillage (Fig. 34).

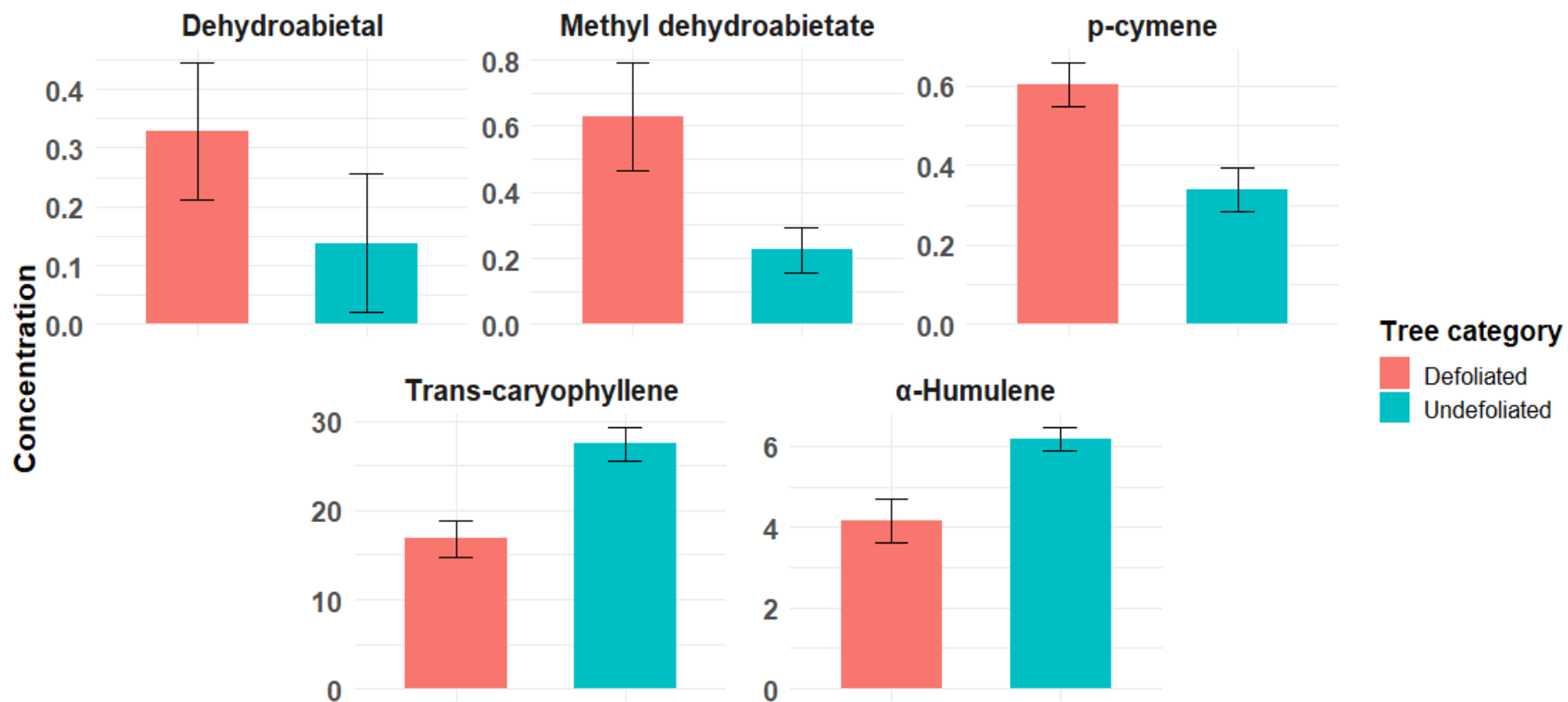


Figure 33. Moyennes des composés les plus corrélés à la PC1 ($\pm$ SE)

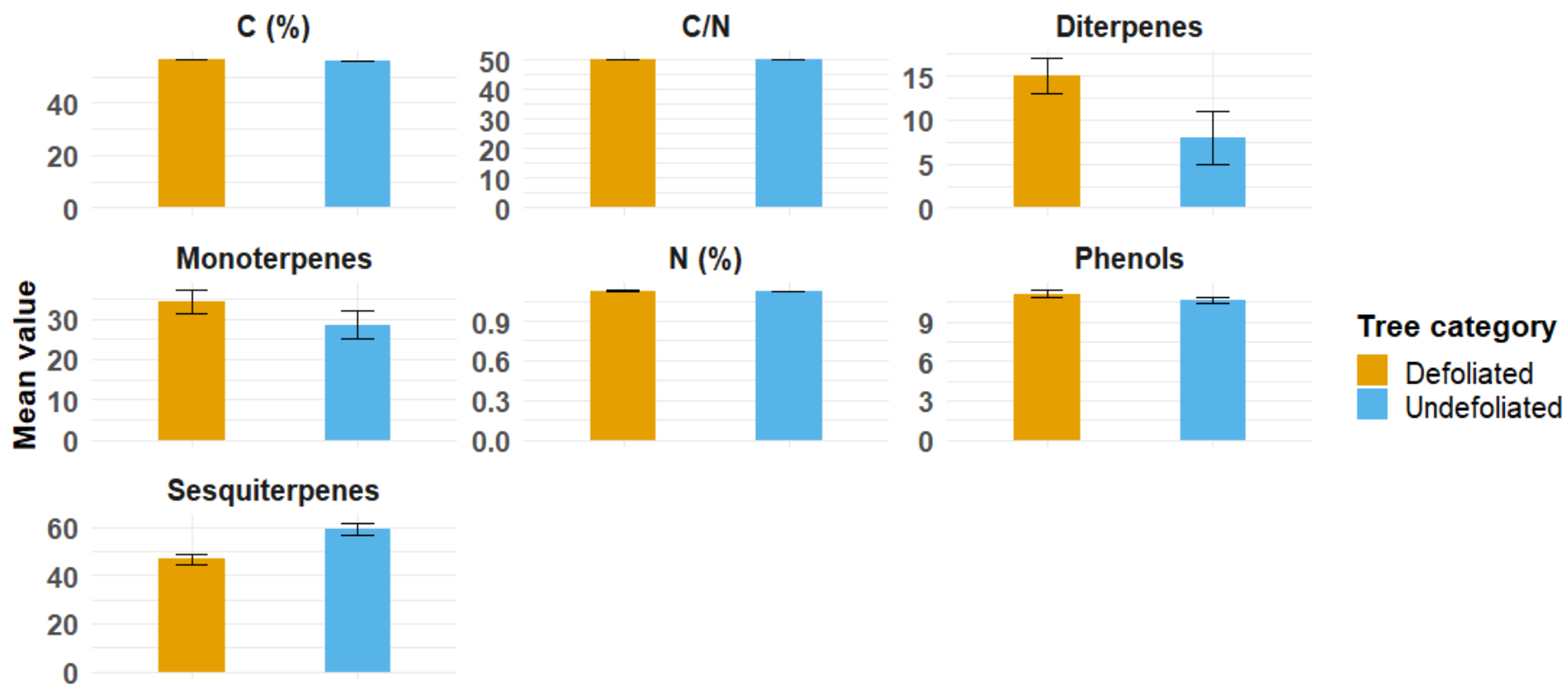


Figure 34. Moyennes des paramètres biochimiques de feuillage pour dans les arbres défoliés et non défoliés ($\pm$ SE)

IV. 2 Effets des caractéristiques morphométriques de l'arbre et des aiguilles sur le choix de l'hôte

4.2 Effets des caractéristiques morphométriques de l'arbre et des aiguilles sur le choix de l'hôte

4.2.1 Description morphométriques des arbres échantillons

Les figures 35, 36 et 37 illustrent les variations des hauteurs, des circonférences et des volumes de houppier des arbres dans les trois sites étudiés. Les hauteurs sont globalement similaires entre les sites S1 et S2, avec des médianes avoisinant 1,8 m et une faible dispersion. En revanche, le site S3 se distingue par une plus grande variabilité, incluant à la fois des arbres très bas et d'autres très hauts, ce qui peut refléter des conditions de croissance hétérogènes ou des stades de développement différents. De manière similaire, les circonférences des arbres sont assez proches entre S1 et S2 (médianes autour de 30 cm), tandis que le site S3 présente une dispersion plus importante, avec des valeurs allant de moins de 20 cm à plus de 45 cm et une médiane plus faible, indiquant la présence des arbres plus fins et une structure de peuplement plus hétérogène. Enfin, bien que les volumes de houppier montrent des médianes comparables entre les trois sites (environ 4 à 5 m³), le site S3 révèle une variabilité nettement plus marquée, avec des valeurs extrêmes dépassant 30 m³.

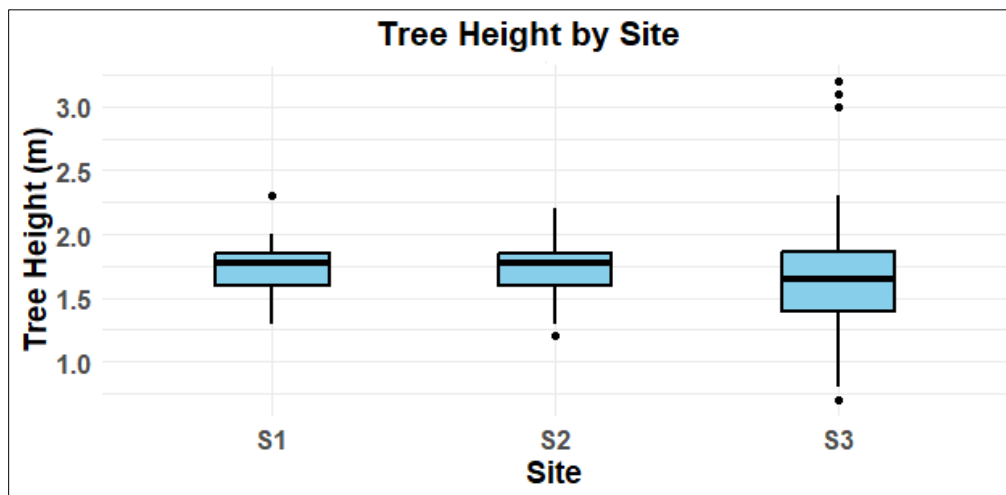


Figure 35. Hauteurs des arbres par site

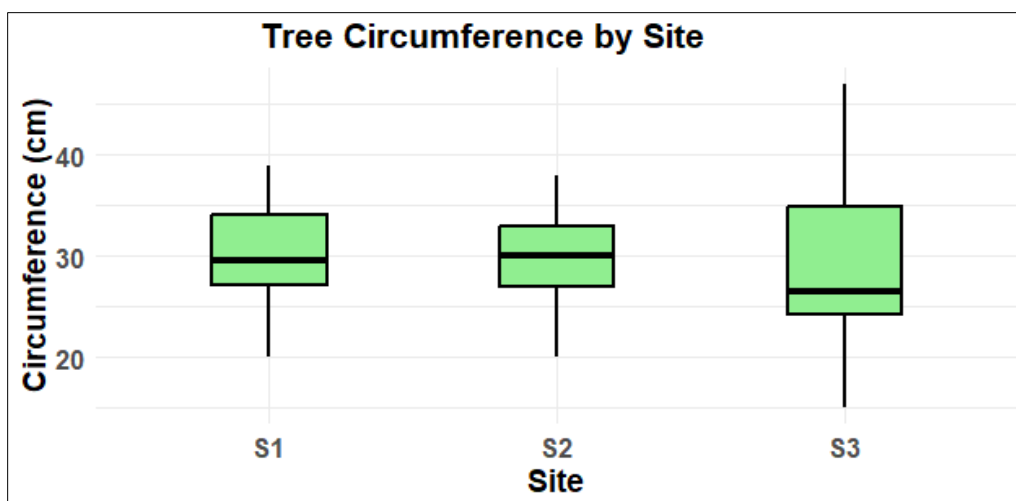


Figure 36. Circonférences des arbres par site

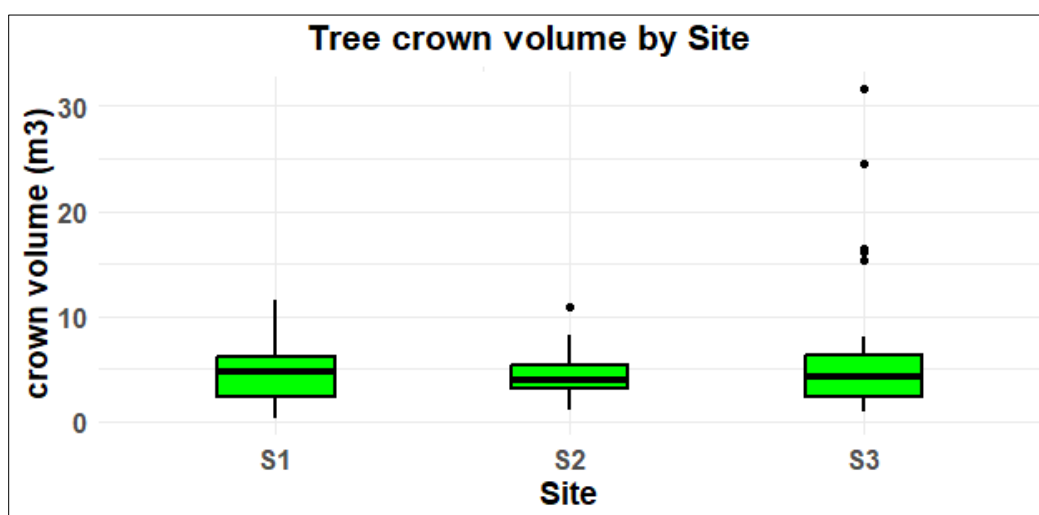


Figure 37. Volumes de houppier des arbres par site

4.2.2 Influence des caractéristiques de l'arbre

Les caractéristiques des arbres, y compris la hauteur totale, la circonférence à 30 cm et le volume du houppier, ont influencé de manière significative le choix de l'arbre hôte par la PPM (Fig. 38). Les arbres plus grands avec un volume de houppier plus important ont accueilli significativement plus de pontes (Fig. 38 A-C) et de nids (Fig. 38 D-F).

4.2.3 Influence des caractéristiques des aiguilles

Les résultats indiquent que la relation entre longueur des aiguilles et l'abondance des pontes n'est pas significative (p -value = 0,20) (Fig. 39A, C). En revanche ils montrent que la densité du

feuillage influence significativement le nombre des pontes sur l'arbre ($p\text{-value} = 0,004$) (Fig. 40B). En effet, les pontes sont plus abondants sur les arbres à feuillage dense. La densité du feuillage n'a toutefois pas exercé d'influence significative sur le nombre de nids de PPM observés (Fig. 39D).

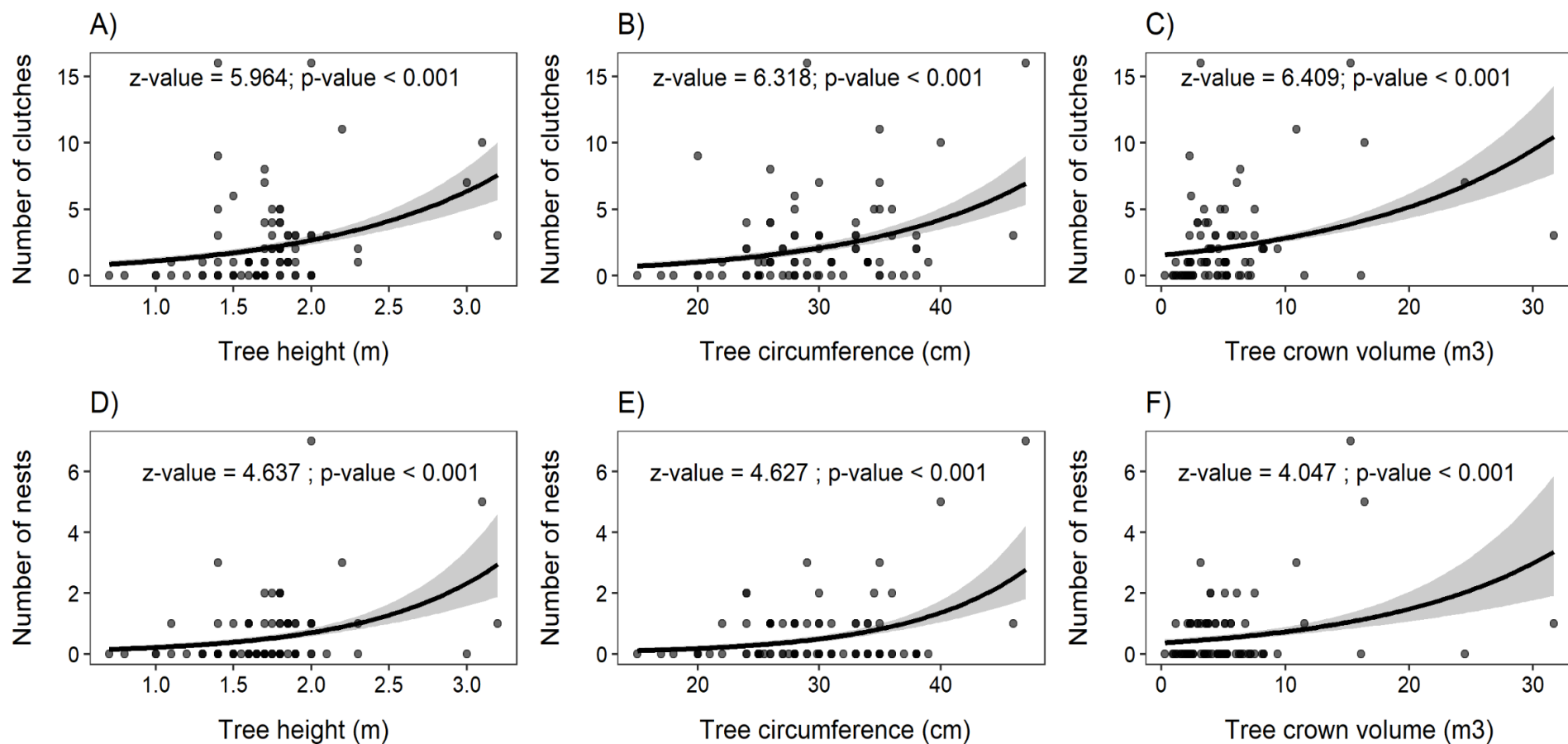


Figure 38. Modèles (GLMM) montrant l'effet de diverses caractéristiques des arbres sur l'abondance des pontes et des nids de PPM.

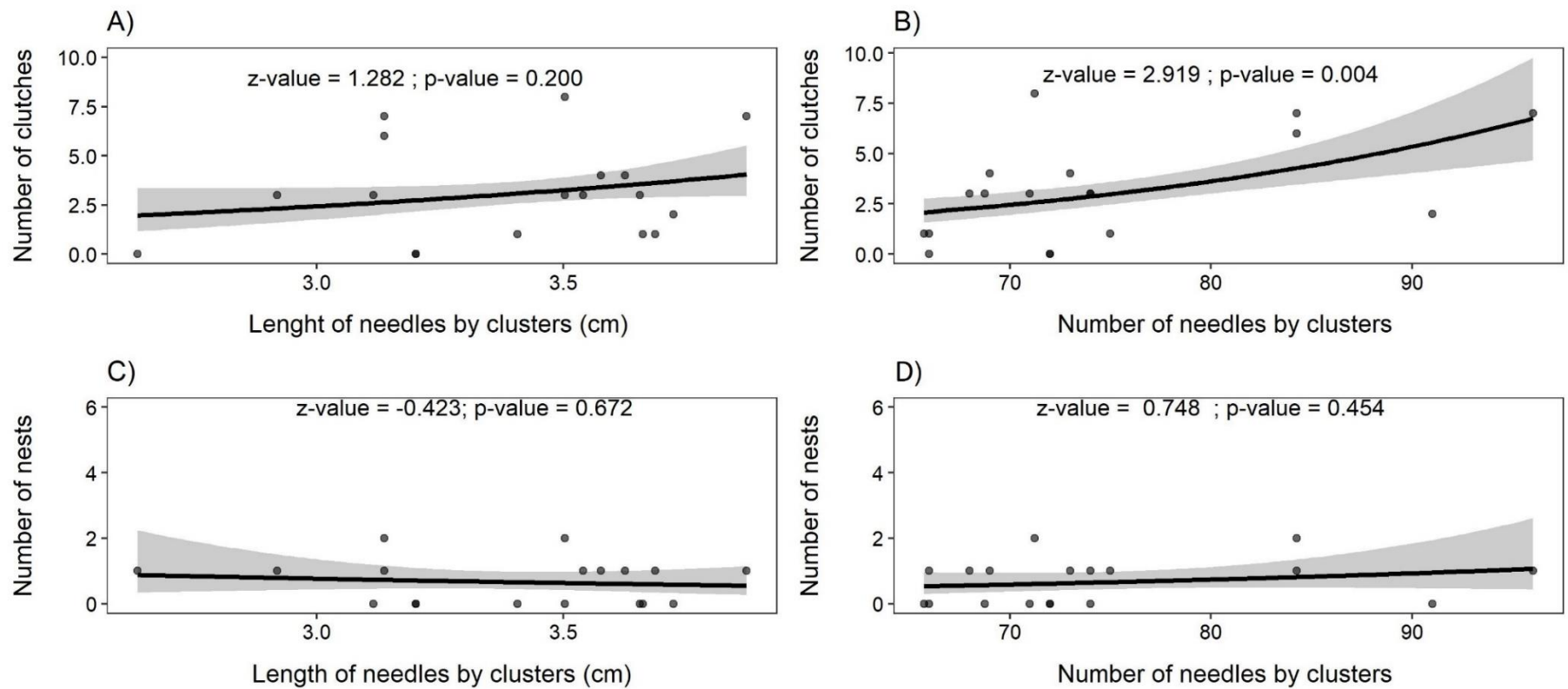


Figure 39. Modèles (GLMM) montrant l'effet de diverses caractéristiques des aiguilles sur l'abondance des pontes et des nids de PPM.

Chapitre V) Discussion générale

Discussions

Le présent travail a été envisagé par rapport aux attaques de la processionnaire sur les peuplements du pin d'Alep au niveau du barrage vert dans la région de Djelfa. Il vise à identifier à travers la description des interactions arbre-insecte, des pistes innovantes pour la gestion intégrée des attaques de ce défoliateur affectant fortement et fréquemment ces peuplements.

En effet, les interactions entre l'arbre et son défoliateur peuvent dévoiler d'autres possibilités pour réduire les attaques et leurs effets sur la vitalité des arbres. Selon Eyles *et al* (2010), lorsqu'un arbre est attaqué par un insecte herbivore, il peut activer divers mécanismes physiologiques et biochimiques de défense visant à protéger ses tissus.

Les résultats obtenus offrent une gamme d'informations intéressante constituant un complément pour celles fournies par les travaux précédents. Ils montrent en premier lieu que le nouveau feuillage qui se développe après la défoliation affecte négativement la performance larvaire chez les larves de PPM. Le taux de mortalité parmi ces dernières est élevé chez les larves alimentées sur les nouvelles aiguilles issues des arbres défoliés comparativement à leurs homologues alimentées sur des aiguilles récoltées sur des arbres non défoliés. Ce constat a été fait par plusieurs auteurs pour différents couples « arbre-défoliateur » : par Battisti (1988) pour le pin noir-processionnaire du pin, par Hódar *et al.*, (2004) pour le pin sylvestre-processionnaire du pin et par Sbabdji et Kadik (2011 et 2012) pour le cèdre-processionnaire du pin. En plus de l'effet sur la survie, le nouveau feuillage émis par les arbres après leur défoliation affecte aussi la croissance des jeunes larves. Celles nourries avec du nouveau feuillage présentent une longueur moindre par rapport à celles nourries avec du feuillage des arbres non défoliés. Cette réduction de croissance pourrait être attribuée aux mécanismes de défense de l'arbre, comme l'a supposé Clancy (2002). Zamoum (1998) a constaté, dans ce contexte, un retard de croissance larvaire dans les zones fortement défoliées par rapport aux zones peu ou pas défoliées. Selon Kersch-Becker & Thaler (2018), les défenses végétales induites par les insectes herbivores agissent spécifiquement sur des traits biologiques de ces derniers, notamment en altérant leur taux de croissance ou leur cycle de développement.

Les résultats révèlent la présence de Bornyl Acetate (monoterpène) uniquement dans le nouveau feuillage qui apparaît après la défoliation. Mumm & Hilker (2006), affirme que certains

monoterpènes possèdent un effet néfaste sur les insectes. Foti *et al.* (2020) précisent que la présence exclusive dans le nouveau feuillage de ce monoterpène (Bornyl Acetate), s'est avérée être la réaction la plus significative face à l'attaque de PPM chez le pin de Calabre (*Pinus nigra* subsp. *laricio* (Poiret) Maire). En outre, l'étude de Cates *et al.* (1989) a montré que ce composé avait engendré un effet inhibiteur de la croissance et il a affecté la survie des larves de *Choristoneura occidentalis*, suggérant ainsi qu'il pourrait agir en tant que toxine ou comme un inhibiteur alimentaire. Selon Feng Y.X *et al.* (2020), le Bornyl Acetate est un composé caractéristique des extraits des plantes de la famille des valérienacées qui possèdent une efficacité insecticide. De plus, il a été démontré que l'acétate de bornyle possède une activité insecticide contre une multitude d'espèces d'insectes (Song *et al.*, 2022, Feng *et al.*, 2020 ; 2019).

Les résultats de l'analyse du feuillage ont révélé également que le monoterpène P-cymène est positivement corrélé à la défoliation et que sa concentration est plus élevée dans le feuillage des arbres défoliés. Selon Gharib *et al.*, (2024) le p-cymène possède une activité larvicide contre *Musca domestica* (Diptera : Muscidae). En outre, le p-cymène est un constituant important des HE dérivées des feuilles et des inflorescences de *Chenopodium ambrosioides* (L.), dont la toxicité contre *Tribolium confusum* a été démontrée (Kasrati *et al.*, 2024).

En ce qui concerne les diterpènes, les résultats ont montré que le méthyl déhydroabiétate et le déhydroabiétal sont corrélés à la défoliation. Ce résultat est en concordance avec l'affirmation de Suárez-Vidal *et al.* (2019) sur l'induction chez le pin d'Alep des diterpènes, les acides abiétiques et déhydroabiétique, notamment, en réponse à une attaque par le charançon du pin *Hylobius abietis*. Selon Hao *et al.* (2022), l'acide déhydroabiétique et ses dérivés possèdent diverses activités insecticides. Dans le même contexte, Hwang *et al.* (2022) relie la présence des deux composés méthyl déhydroabiétate et déhydroabiétal dans la résine de *Pinus rigida* Mill, à la résistance marquée de cette espèce au nématode du pin (PWN). Ces auteurs indiquent que cette résine a une influence directe sur la mobilité et la mortalité du PWN.

La comparaison entre les compositions des deux feuillages a fait ressortir également que le transcaryophyllène, connu sous le nom de (β -caryophyllène), et l' α -humulène, connu sous le nom de (α -caryophyllène), des sesquiterpènes sont négativement corrélés à la défoliation. La concentration élevée de ces deux composés dans le feuillage des arbres non défoliés, par rapport au nouveau feuillage qui se développe après la défoliation, est particulièrement révélatrice. Cette

observation est cohérente avec les résultats rapportés par Achotegui-Castells *et al.* (2013) chez le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). Cet auteur suggère que la diminution de la concentration en sesquiterpènes dans le feuillage suite à la défoliation peut résulter d'une réponse compensatoire entre les différents terpènes de l'arbre après l'attaque. Cette hypothèse est soutenue, entre autres, par l'étude de Hwang *et al.* (2022), qui indiquent que les niveaux de sesquiterpène sont plus faibles dans la résine de *Pinus rigida* Mill, une espèce qui est plus résistante aux nématodes du pin (PWN).

Un feuillage de faible qualité nutritive peut être le résultat d'une stratégie de défense basée sur le fait que les tissus végétaux ne parviennent pas à satisfaire adéquatement les besoins nutritionnels des défoliateurs (Clancy 2002). Dans la présente étude, le taux d'azote (N) revêt une importance particulière en ce qui concerne le nouveau feuillage après la défoliation. En revanche, aucune différence significative n'a été observée dans la teneur en carbone et dans les rapports C/N entre les deux types de feuillage. L'augmentation observée de la mortalité larvaire dans le feuillage post-défoliation suggère que la qualité nutritive (richesse en azote) n'affecte pas la survie des larves L1 de PPM. Il est également à noter que la concentration en azote dans le nouveau feuillage a augmenté après la défoliation, comme cela a déjà été observé par Hódar *et al.* (2004) et Hódar *et al.* (2015).

En réponse à la défoliation, les arbres subissent souvent une croissance compensatoire, ce qui implique une augmentation de la photosynthèse et de la teneur en azote foliaire (Clancy 2002 ; Hódar *et al.*, 2015). Ce résultat contre dit l'hypothèse CNB (*Carbon-Nutrient Balance*), qui postule que l'abondance de nutriments, comme l'azote, stimule la croissance des plantes et inhibe leurs défenses chimiques, favorisant ainsi la croissance et la reproduction au détriment des défenses chimiques (Stamp 2003). En revanche, ce résultat est cohérent avec l'hypothèse GDB (*Growth-Differentiation Balance*), qui postule un compromis entre la croissance et la production de composés de défense (Stamp 2003 ; Vázquez-González *et al.*, 2021).

La teneur totale en composés phénoliques du feuillage ne diffère pas significativement entre les arbres défoliés et non défoliés. Bien que l'accumulation de phénols puisse constituer l'un des principaux mécanismes de défense des plantes, plusieurs études ont montré que cette réponse n'est pas systématiquement déclenchée en réaction à la défoliation causée par PPM (Hódar *et al.*, 2004 ; Hódar *et al.*, 2015).

Les résultats de notre étude montrent que les terpènes qui sont associés à la défense induite du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) contre la PPM. Contrairement à ce qui a été suggéré par Hódar *et al.* (2015) pour (*Pinus pinaster*, *Pinus nigra* et *Pinus sylvestris*), l'analyse en composante principale (ACP) des composés chimiques nous a permis de distinguer clairement le feuillage après défoliation du feuillage non défolié. Cette différenciation peut être due aux mécanismes de défense induits contre PPM chez le pin d'Alep. Il convient de noter que les défenses chimiques contre les herbivores chez les espèces de pins méditerranéens présentent une diversité considérable, même au sein des populations (Vázquez-González *et al.*, 2021).

Plusieurs études ont examiné la relation entre les terpènes et la défoliation par la PPM. Cependant, les recherches sur ces terpènes et leurs contributions à la gestion du problème posé par ce défoliateur sont encore à un stade préliminaire (Faria *et al.*, 2022). Le présent travail constitue donc la première observation de quatre terpènes qui pourraient être impliqués dans la réponse de défense du pin d'Alep contre l'un de ses principaux herbivores. Les composés identifiés dans notre étude, à savoir l'acétate de bornyle, le p-cymen, le déhydroabiétate de méthyle et le déhydroabiétal, peuvent représenter un point de départ potentiel pour le développement d'un bio-insecticide contre la PPM. En effet, selon Pavela & Benelli, (2016) les huiles essentielles (HE) et leurs composants, tels que les terpènes, peuvent être synthétisés et formulés en bioinsecticides stables pour être utilisés dans des stratégies de lutte contre les insectes herbivores. Ces formulations offrent une alternative écologique aux produits chimiques synthétiques, réduisant ainsi la dépendance aux insecticides conventionnels (Pavela & Benelli, 2016 ; Mossa, 2016). Cependant, il est important de noter que ces résultats sont encore préliminaires et nécessitent une validation supplémentaire. Des investigations plus approfondies utilisant un plus grand nombre d'échantillons sont nécessaires pour évaluer l'efficacité de ces terpènes contre la PPM, ce qui consolidera ces résultats.

Par ailleurs, cette réaction des arbres aux défoliations explique en partie l'affirmation de Zamoum (1998) indiquant que les gradations de la population de la processionnaire à Djelfa sont cycliques. . En effet, les résultats de ce travail laissent supposer qu'une défoliation sévère constitue un facteur clé dans la baisse des populations de l'insecte. Ceci accorde plus d'importance aux résultats obtenus par rapport à la gestion des défoliations. La cyclicité des gradations conditionnée par l'intensité des défoliations appuiera la prévision par rapport aux attaques.

Toutefois, un programme de gestion des attaques nécessite un suivi de population à grande échelle. A ce propos, l'intégration des outils de la télédétection et de la cartographie s'avère nécessaire. Cependant, en l'absence de données historiques couvrant plusieurs cycles de défoliations, il est difficile de distinguer les variations causées par la PPM de celles induites par d'autres facteurs environnementaux, comme les sécheresses ou les maladies. Ces données de terrain historiques permettent de calibrer et de valider les modèles d'interprétation des images satellitaires en établissant des corrélations fiables entre les signatures spectrales captées par les satellites et les niveaux réels de défoliation observés sur le terrain (Otsu *et al.*, 2018). Par ailleurs, les UAV peuvent constituer une source de validation alternative (Otsu *et al.*, 2019 ; Pérez-Romero *et al.*, 2019).

En ce qui concerne la deuxième partie qui a porté sur l'influence des caractéristiques morphométriques et caractéristiques biométrique des aiguilles, sur le choix de l'arbre hôte, les résultats obtenus sont également importants et répondent à la problématique des attaques. En effet, ils indiquent que les paramètres morphométriques, à savoir la hauteur, la circonférence mesurée à 30 cm du sol et le volume du houppier, peuvent constituer des indicateurs facilitant la lutte basée sur recherche des pontes, des pré-nids et des nids. Les arbres plus grands avec un volume de houppier plus important ont accueilli significativement plus de pontes. Ces résultats sont cohérents avec les recherches précédentes, qui suggèrent que PPM choisissent de préférence des arbres plus grands et plus vigoureux comme hôtes (Nicoli *et al.*, 2008 ; Pérez-Contreras *et al.*, 2008 ; Régolini *et al.*, 2014 ; Panzavolta *et al.*, 2015). Selon Vanninen, 2004 ; Saarinen *et al.* (2022), les grands arbres possédant des houppiers plus larges offrent plus de surface pour la ponte, car une cime plus large offre plus de branches et d'aiguilles. Paillet *et al.* (2017), Spînu *et al.* (2024), adhèrent à cet opinion en indiquant que les arbres plus grands offrent probablement de meilleurs microhabitats pour la survie des larves, plus de feuillage pour l'alimentation et rassurent un meilleur abri contre les facteurs de stress environnementaux. Field *et al.* (2019) et Jactel *et al.* (2019a) affirment à propos du même sujet que les arbres plus sains et plus vigoureux, avec une hauteur et une circonférence plus importante constituent, un environnement stable aux insectes herbivores pour achever leur cycle de vie, ce qui en fait des hôtes plus attrayants.

Concernant les caractéristiques des aiguilles par rapport la sélection de hôte par la PPM, les résultats révèlent que la densité du feuillage avait un effet significatif sur la sélection. Ceci peut

être relié à de différents critères de sélections des arbres par l'insecte. Tout d'abord, les arbres ayant une densité de feuillage plus élevée peuvent offrir une plus grande surface pour la ponte (Roslin *et al.*, 2006 ; Badenes-Perez *et al.*, 2014). En deuxième lieu, le feuillage dense peut assurer une meilleure protection aux œufs contre les facteurs de stress environnementaux tels que l'ensoleillement, le vent et la pluie, ainsi que des prédateurs potentiels tels que les oiseaux ou d'autres insectes (Barbaro et Battisti 2011 ; Castagneyrol *et al.*, 2014). En troisième lieu, les arbres au feuillage possèdent des signaux chimiques ou visuels plus forts, tels que des marqueurs olfactifs ou l'apparence d'un feuillage sain (Holopainen et Gershenzon 2010 ; Zhao *et al.*, 2017), plus attractifs pour les papillons.

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Le barrage vert occupe une place stratégique sur les plans écologique, socioéconomique, et environnemental en Algérie. Toutefois, les peuplements de pin d'Alep en monoculture dans ce projet sont fortement menacés entre autres par les infestations récurrentes de la chenille processionnaire du pin *Thaumetopea pityocampa*. Ce travail s'inscrit parmi les investigations visant la recherche de nouvelles approches de gestion de pour réduire les attaques de ce défoliateurs.

Les résultats des expérimentations menées sur les larves au laboratoire et sur le suivi des colonies sur les arbres, ont fourni des données essentielles pour comprendre la performance de l'insecte durant les générations post défoliations. Ces données indiquent que le pin d'Alep possède un mécanisme de défense induit suite par les défoliations sévères ou totales. En réponse à une attaque sévère, l'arbre semble en mesure d'émettre un nouveau feuillage enrichi en terpènes spécifiques, aux propriétés potentiellement insecticides, réduisant ainsi les chances d'une seconde infestation consécutive. Ces résultats apportent un éclairage précieux pour la gestion, ils permettent d'améliorer la prévision des attaques et de mieux anticiper les dynamiques de population de la processionnaire dans ces pinèdes.

Les résultats suggèrent que la défoliation intense pourrait contribuer à une régulation naturelle des populations de la processionnaire, ce qui ouvre la voie à de nouvelles stratégies de lutte plus respectueuses de l'environnement. En effet, les terpènes identifiés pourraient constituer une base prometteuse pour le développement futur d'un bio-insecticide ciblé.

Cependant, dans un contexte de changement climatique, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre comment les stress environnementaux peuvent influencer la durabilité et l'efficacité du fonctionnement de ce système relationnel arbre-insecte. En effet, le réchauffement climatique pourrait à la fois favoriser les populations de processionnaire et affecter négativement les capacités de persistance et de défense des arbres par rapport aux attaques (Battisti & Larsson, 2023 ; Jactel *et al.*, 2019b).

Les résultats évoquent également le rôle de la structure physique et de la vigueur des arbres dans le choix de l'hôte par la processionnaire. Les individus les plus attractifs semblent être ceux en meilleure santé, ce qui pourra aider lors de pratiques de lutte.

Les futures recherches devraient approfondir l'étude de la relation entre les traits des arbres et la sélection de l'hôte par l'insecte, en élargissant l'analyse à des facteurs écologiques et environnementaux plus globaux.

Enfin, une gestion plus efficace des peuplements de pin d'Alep du Barrage Vert doit s'accompagner d'un programme de suivi à grande échelle. Celui-ci devrait aboutir à l'établissement des cartes spatiotemporelles des niveaux d'infestation, afin de mieux prévoir les zones susceptibles. L'utilisation de technologies avancées, comme les drones, pourrait aussi faciliter la surveillance des attaques et suivant leur dynamique qui intègre entre autres l'effet des défoliations sur la performance de l'insecte.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Achotegui-Castells A, Llusà J, Hódar JA, Peñuelas J (2013). Needle terpene concentrations and emissions of two coexisting subspecies of Scots pine attacked by the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*). *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(10): 3047–3058. –doi :10.1007/s11738-013-1337-3
- Adams R. Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectrometry: Allured Publishing Corporation, Carol Stream 2007
- Babushok, V.; Linstrom, P.; Zenkevich, I. Retention Indices for Frequently Reported Compounds of Plant Essential Oils. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2011, 40(4), 43101-43148.<http://dx.doi.org/10.1063/1.3653552>
- Badenes-Perez FR, Gershenzon J, Heckel DG (2014) Insect attraction versus plant defense: young leaves high in glucosinolates stimulate oviposition by a specialist herbivore despite poor larval survival due to high saponin content. *PLoS ONE* 9:e95766
- Barbaro L, Battisti A (2011) Birds as predators of the pine processionary moth (Lepidoptera: *Notodontidae*). *Biol Control* 56:107-114
- Battisti A (1988). Host-plant relationships and population dynamics of the Pine Processionary Caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermuller). *Journal of Applied Entomology* 105: 393–402. –doi : 10.1111/j.1439-0418.1988.tb00202.x
- Battisti A, Holm G, Fagrell B, Larsson S (2011) Urticating hairs in arthropods: their nature and medical significance. *Ann Rev Entomol* 56:203-220
- Battisti A, Larsson S (2023). Climate Change and Forest Insect Pests. In: “Forest Entomology and Pathology: Volume 1: Entomology” (Allison JD, Paine TD, Slippers B , Wingfield MJ eds). Springer International Publishing, pp. 773–787. doi :10.1007/978-3-031-11553-0_22
- Battisti A, Larsson S, Roques A (2017) Processionary moths and associated urtication risk: global change–driven effects. *Ann Rev Entomol* 62:323-342
- Battisti A, Stastny M, Netherer S, Robinet C, Schopf A, Roques A, Larsson S (2005). Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications* 15: 2084-2096.

- Battisti, A., Branco M, Mendel Z (2016). Defoliators in native insect systems of the mediterranean basin. In “Insects and Diseases of Mediterranean Forest Systems”(Paine TD, Lieutier F eds). Springer International Publishing, pp. 29–45. doi :10.1007/978-3-319-24744-1_3
- Battisti, A., Avcı, M., Avtız, D. N., Jamaa, M. L. B., Berardi, L., Berretima, W., ... & Frérot, B. (2014). Natural history of the processionary moths (*Thaumetopoea* spp.): new insights in relation to climate change. In Processionary moths and climate change: An update (pp. 15-79). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Battisti, A., Larsson, S., & Roques, A. (2016). Processionary Moths and Associated Urtication Risk: Global Change-Driven Effects. *Annual Review of Entomology*, 62(1), 323–342. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031616-034918>
- Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E., & Larsson, S. (2006). A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12, 662–671.
- Bensaïd, S. (1995). Bilan critique du barrage vert en Algérie. *Sécheresse*, 6(3), 247-255.
- Bourougaaoui, A., Robinet, C., Ben Jamâa, M. L., & Laparie, M. (2024). A retrospective analysis on the effects of climate warming on the pine processionary moth at the southern edge of its range. *Oikos*, 2024(12). p. e10989.
- Bremner, J. M. (1960). Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *The Journal of Agricultural Science*, 55(1), 11–33.
- Buffo, E., Stastny, M., Battisti, A., & Larsson, S. (2007). Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the Italian Alps. *Agricultural and Forest Entomology*, 9(1), 65–72. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2006.00321.x>
- Camarero, J. J., Tardif, J., Gazol, A., & Conciatori, F. (2022). Pine processionary moth outbreaks cause longer growth legacies than drought and are linked to the North Atlantic Oscillation. *Science of The Total Environment*, 819, 153041.
- Cardil, A., Vepakomma, U., & Brotons, L. (2017). Assessing pine processionary moth defoliation using unmanned aerial systems. *Forests*, 8(10), 402.
- Carus, S. (2004). Impact of defoliation by the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*) on radial, height and volume growth of Calabrian pine (*Pinus brutia*) trees in Turkey. *Phytoparasitica*, 32, 459-469.

- Castagneyrol B, Jactel H, Charbonnier Y, Barbaro L, Dulaurent-Mercadal AM (2014) Egg mortality in the pine processionary moth: habitat diversity, microclimate and predation effects. *Agric For Entomol* 16:284-292
- Cates, R.G., Henderson, C.B. & Redak, R.A. Responses of the western spruce budworm to varying levels of nitrogen and terpenes. *Oecologia* 73, 312–316 (1987). <https://doi.org/10.1007/BF00377524>
- Cayuela L, Hódar JA, Zamora R (2011). Is insecticide spraying a viable and cost-efficient management practice to control pine processionary moth in Mediterranean woodlands? *Forest Ecology and Management*, 261(11) : 1732–1737. –doi :10.1016/j.foreco.2011.01.022
- Clancy KM (2002). Mechanisms of Resistance in Trees to Defoliators. In: “Mechanisms and deployment of resistance in trees to insects” (Wagner MR, Clancy KM, Lieutier F, Paine TD eds). Springer Netherlands. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS NEW YORK, BOSTON, DORDRECHT, LONDON, MOSCOW, pp. 76–105.
- Climate Engine. (2025). Desert Research Institute and University of California, Merced. Accessed on (10/04/2025). <http://climateengine.org>, version 2.1.
- D.G.F, Direction Générale des forêts, 2004, Rapport national de l’Algérie sur la mise en œuvre de la Convention de Lutte Contre la Désertification, DGF, Algérie, 35 p. <http://www.unccd.int/cop/reports/africa/national/2004/algeria-fre.pdf>
- D.G.F. 2010. Orientations pour une stratégie d’élaboration d’un programme à moyen et long terme de renouveau rural. ed. Rapport, 21
- Damestoy, T. (2019). Interactions entre les chênes et la chenille processionnaire du chêne, *Thaumetopoea processionea* L : de l’arbre à la forêt (Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux, École doctorale Sciences et Environnements, France, pp. 126.
- Démolin G (1969) Comportement des adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Dispersion spatiale, importance écologique. *Ann Sci For* 26:89-102
- Djerrad Z, Kadik L, Djouahri A (2015). Chemical variability and antioxidant activities among *Pinus halepensis* Mill. essential oils provenances, depending on geographic variation and environmental conditions. *Industrial Crops and Products*, 74: 440–449. – doi : 10.1016/j.indcrop.2015.05.049

- Domingo, D., Vicente-Serrano, S. M., Gómez, C., Olano, J. M., & Sangüesa-Barreda, G. (2024). Summer heat waves could counterbalance the increasing incidence of pine processionary due to warmer winters in Mediterranean pine forests. *Forest Ecology and Management*, vol 555, 121695.
- Dulaurent, A. M., Porte', A. J., van Halder, I., Ve'tillard, F., Menassieu, P., & Jactel, H. (2012). Hide and seek in forests: Colonization by the pine processionary moth is impeded by the presence of nonhost trees. *Agricultural and Forest Entomology*, 14, 19–27.
- EPPO. (2004). EPPO Standards: *Thaumetopoea pityocampa*-PM7/37. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin, 34, 295-298.
- Eyles A, Bonello P, Ganley R, Mohammed C (2010). Induced resistance to pests and pathogens in trees. *New Phytologist*, 185(4): 893–908. –doi : 10.1111/j.1469-8137.2009.03127.x
- Faria JMS, Rodrigues AM, Bhattacharya S (2021). Volatile Organic Compounds Influence Pine Processionary Moth Behavior. *Biology and Life Sciences Forum (MDPI)*, 10(1):4. –doi :10.3390/iece-10527
- Feng YX, Wang Y, Chen ZY, Guo SS, You CX, Du SS (2019). Efficacy of bornyl acetate and camphene from *Valeriana officinalis* essential oil against two storage insects. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(16) : 16157–16165. - doi.org/10.1007/s11356-019-05035-y
- Feng YX, Wang Y, Geng ZF, Zhang D, Almaz B, Du SS (2020). Contact toxicity and repellent efficacy of *Valerianaceae* spp. to three stored-product insects and synergistic interactions between two major compounds camphene and bornyl acetate. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190 :110106. –doi :10.1016/j.ecoenv.2019.110106
- Field E, Schönrogge K, Barsoum N, Hector A, Gibbs M (2019) Individual tree traits shape insect and disease damage on oak in a climate-matching tree diversity experiment. *Ecol Evol* 9:8524-8540
- Foti V, Araniti F, Manti F, Alicandri E, Giuffrè AM, Bonsignore CP, Castiglione E, Sorgonà A, Covino S, Paolacci AR, Ciaffi M, Badiani M (2020). Profiling volatile terpenoids from calabrian pine stands infested by the pine processionary moth. *Plants*, 9(10) :1–22. –doi :10.3390/plants9101362

- Gharib AM, El-Shewy AM, Hamouda SSA, Gad HA, Abdelgaleil SAM (2024). Insecticidal, biochemical and histological effects of monoterpenes against *Musca domestica* (Diptera: *Muscidae*). Journal of Asia-Pacific Entomology, 27(2): 102256. –doi : 10.1016/j.aspen.2024.102256
- Guiterman, C. H., Lynch, A. M., & Axelson, J. N. (2020). dfoiatR: An R package for detection and analysis of insect defoliation signals in tree rings. Dendrochronologia, 63, 125750.
- Haichour R (2023). Phytochimie et activités biologiques de *Pinus halepensis* de l'est algérien. Thèse doctorat, Université Farhat-Abbas Sétif 1, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Algérie, pp. 105.
- Hao M, Xu J, Wen H, Du J, Zhang S, Lv M, Xu H (2022). Recent Advances on Biological Activities and Structural Modifications of Dehydroabietic Acid. Toxins (MDPI), 14(9) : 632. –doi :10.3390/toxins14090632
- Hoch, G., Toffolo, E. P., Netherer, S., Battisti, A., & Schopf, A. (2009). Survival at low temperature of larvae of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* from an area of range expansion. Agricultural and Forest Entomology, 11(3), 313-320.
- Hódar JA, Castro J, Zamora R (2003). Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warming. Biological Conservation, 110(1) : 123–129. –doi :10.1016/S0006-3207(02)00183-0
- Hódar JA, Torres-Muros L, Zamora R, Pérez-Luque AJ, Senhadji K (2015). No evidence of induced defence after defoliation in three pine species against an expanding pest, the pine processionary moth. Forest Ecology and Management, 356: 166–172. –doi :10.1016/j.foreco.2015.07.022
- Hódar JA, Zamora R (2004) Herbivory and climatic warming: a Mediterranean outbreaking caterpillar attacks a relict, boreal pine species. Biodivers Conserv 13:493-500
- Hódar JA, Zamora R, Castro J (2002) Host utilization by moth and larval survival of pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* in relation to food quality in three *Pinus* species. Ecol Entomol 27:292-301

- Hódar JA, Zamora R, Castro J, Baraza E (2004). Feast and famine : previous defoliation limiting survival of pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* in Scots pine *Pinus sylvestris*. *Acta Oecologica*, 26 : 203–210. –doi :10.1016/j.actao.2004.05.004
- Hódar, J. A., Zamora, R., & Cayuela, L. (2011). Climate change and the incidence of a forest pest in Mediterranean ecosystems: can the North Atlantic Oscillation be used as a predictor? *Climatic Change*, 113(3–4), 699–711. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0371-7>
- Holopainen JK, Gershenzon J (2010) Multiple stress factors and the emission of plant VOCs. *Trends Plant Sci* 15:176-184
- Hwang HS, Kim YR, Han JY, Choi YE (2022). Nematicidal Properties and Chemical Composition of *Pinus rigida* Mill. Resin against Pinewood Nematodes. *Forests*, 13(7) :1131. –doi :10.3390/f13071131
- Jacquet J-S, Bosc A, O’Grady A, Jactel H (2013) Pine growth response to processionary moth defoliation across a 40-year chronosequence. *For Ecol Manage* 293:29-38
- Jacquet, J. S., Orazio, C., & Jactel, H. (2012). Defoliation by processionary moth significantly reduces tree growth: a quantitative review. *Annals of forest science*, 69, 857-866.
- Jactel H, Barbaro L, Battisti A, Bosc A, Branco M, Brockerhoff E, Castagneyrol B, Dulaurent AM, Hódar JA, Jacquet JS, Mateus E, Paiva MR, Roques A, Samalens JC, Santos H, Schlyter F (2015). Insect-tree interactions in *Thaumetopoea pityocampa*. In: “Processionary Moths and Climate Change. An Update” (Roques A ed). Springer, Dordrecht, Netherlands and Quae, Versailles, France, pp. 265-310. –doi ;10.1007/978-94-017-9340-7
- Jactel H, Koricheva J, Castagneyrol B (2019 b). Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35:103–108.–doi :10.1016/j.cois.2019.07.010
- Jactel H, Poeydebat C, van Halder I, Castagneyrol B (2019 a) Interactive effects of tree mixing and drought on a primary forest pest. *Front Plant Sci* 2:77
- Jaouadi W, Naghmouchi S, Alsubeie M (2019). Should the silviculture of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) stands in northern Africa be oriented towards wood or seed and

cone production? Diagnosis and current potentiality. *iForest* 12: 297-305. – doi: 10.3832/for2965-012

- Kadik B (1983) Contribution à l'étude de Pin d'Alep en Algérie : Ecologie, dendrométrie, morphologie .Thèse Doctorat d'Etat .Aix – Marseille III, 313 pp.
- Kanat, M., Alma, M. H., & Sivrikaya, F. (2005). Effect of defoliation by *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.)(Lepidoptera: *Thaumetopoeidae*) on annual diameter increment of *Pinus brutia* Ten. in Turkey. *Annals of forest science*, 62(1), 91-94.
- Kasrati A, Sakar EH, Aljaiyash A, Hirri A, Tamegart L, Abbad I, Alaoui Jamali C (2024). Chemical Profiling, Insecticidal, and Phytotoxic Effect of Essential Oils from Leaves and Inflorescence of Moroccan *Chenopodium ambrosioides* (L.). *Plants*, 13:483. –doi :10.3390/plants13040483
- Kerdelhué, C., Battisti, A., Burban, C., Branco, M., Cassel-Lundhagen, A., İpekdağ, K., ... & Kerdelhué, C. (2014). Genetic diversity and structure at different spatial scales in the processionary moths. In *Processionary moths and climate change: an update* (pp. 163-226). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Kersch-Becker MF, Thaler JS (2019). Constitutive and herbivore-induced plant defences regulate herbivore population processes. *Journal of Animal Ecology*, 88: 1079– 1088. –doi :1111/1365-2656.12993
- Larsson, S. (2002). Resistance in trees to insects—an overview of mechanisms and interactions. *Mechanisms and deployment of resistance in trees to insects*, 1-29.
- Leutrech B.N., 1991. Les reboisements en Algérie et leurs perspectives d'avenir, vol 1 et 2, OPU. 641p.
- Li, S., Daudin, J. J., Piou, D., Robinet, C., & Jactel, H. (2015). Periodicity and synchrony of pine processionary moth outbreaks in France. *Forest Ecology and Management*, 354, 309-317.
- Maestre, F. T., & Cortina, J. (2004). Are *Pinus halepensis* plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas?. *Forest ecology and management*, 198(1-3), 303-317.
- Martin, J. C. (2014). Development of environment-friendly strategies in the management of processionary moths. In *Processionary moths and climate change: An update* (pp. 411-427). Dordrecht: Springer Netherlands.

- Mateus E, Barata RC, Zrostlíková J, Gomes da Silva MGR, Paiva MR (2010). Characterization of the volatile fraction emitted by *Pinus* spp. By one- and two-dimensional chromatographic techniques with mass spectrometric detection. *Journal of Chromatography A*, 1217(11): 1845–1855. –doi :10.1016/j.chroma.2010.01.045
- Mechergui K, Naghmouchi S, Alsubeie M, Jaouadi W, Ammari Y (2022). Biomass, radial growth and regeneration capacity of Aleppo pine, and its possible use as rootstock in arid and degraded areas. *iForest* 15: 213-219. – doi: 10.3832/ifor3954-015
- Moneo, I., Battisti, A., & Dufour, B. (2005). Medical and veterinary impact of the urticating processionary larvae. *Clinical Toxicology*, 43(2), 123-130.
- Moneo, I., Battisti, A., Dufour, B., García-Ortiz, J. C., González-Muñoz, M., Moutou, F., ... & Roques, L. (2014). Medical and veterinary impact of the urticating processionary larvae. In *Processionary moths and climate change: an update* (pp. 359-410). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Mossa AH (2016). Green pesticides: Essential oils as biopesticides in insect-pest management. *Journal of Environmental Science and Technology*, 9(5): 354-378.–doi :10.3923/jest.2016.354.378
- Mouissa, H., Fournier, R. A., Oldache, E. H., & Bellatreche, M. (2018). Détection des changements au niveau d'un couvert forestier en milieu semi-aride entre 1984–2009: Cas de la forêt de Senalba Chergui de Djelfa (Algérie). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 44(2), 113-130.
- Mumm R, Hilker M (2006). Direct and indirect chemical defence of pine against folivorous insects. *Trends in Plant Science*, 11(7): 351–358. doi:10.1016/j.tplants.2006.05.007
- Nicoli A, Panzavolta T, Marziali L, Peverieri GS, Florenzano GT, Tiberi R (2008) Further studies on the role of monoterpenes in pine host selection and oviposition of *Thaumetopoea pityocampa*. *Phytoparasitica* 36:313-321
- Oldache, E. H. (2021). Le barrage vert: bilan physique et perspectives. *Annales de la recherche forestière en Algérie*, 11(1), 7-20.
- Otsu, K., Pla, M., Duane, A., Cardil, A., & Brotons, L. (2019). Estimating the threshold of detection on tree crown defoliation using vegetation indices from UAS multispectral imagery. *Drones*, 3(4), 80.

- Otsu, K., Pla, M., Duane, A., Cardil, A., & Brotons, L. (2019). Estimating the threshold of detection on tree crown defoliation using vegetation indices from UAS multispectral imagery. *Drones*, 3(4), 80.
- Paillet Y, Archaux F, Boulanger V, Debaive N, Fuhr M, Gilg O, Gosselin F, Guilbert E (2017) Snags and large trees drive higher tree microhabitat densities in strict forest reserves. *For Ecol Manage* 389:176-186
- Paiva MR, Mateus E, Santos MH, Branco MR (2011). Pine volatiles mediate host selection for oviposition by *Thaumetopoea pityocampa* (Lep., Notodontidae). *Journal of Applied Entomology*, 135(3): 195-203. –doi :10.1111/j.1439-0418.2010.01550.x
- Panzavolta T, Florenzano GT, Tiberi R (2015) Pine monoterpene deterrence of pine processionary moth oviposition. *Urban For Urban Green* 14:538-543
- Pavela R, Benelli G (2016). Essential oils as ecofriendly biopesticides? Challenges and constraints. *Trends in plant science*, 21(12):1000-1007.
- Pérez-Contreras T, Soler JJ, Soler M (2008) Needle asymmetry, pine vigour and pine selection by the processionary moth *Thaumetopoea pityocampa*. *Acta Oecol* 33:213-221
- Pérez-Contreras, T., Soler, J. J., & Soler, M. (2014). Host selection by the pine processionary moth enhances larval performance: An experiment. *Acta oecologica*, 55, 15-22.
- Pérez-Romero, J., Navarro-Cerrillo, R. M., Palacios-Rodriguez, G., Acosta, C., & Mesas-Carrascosa, F. J. (2019). Improvement of remote sensing-based assessment of defoliation of *Pinus* spp. caused by *Thaumetopoea Pityocampa* Denis and Schiffermüller and related environmental drivers in Southeastern Spain. *Remote Sensing*, 11(14), 1736.
- Petrakis, P. V., Roussis, V., Papadimitriou, D., Vagias, C., & Tsitsimpikou, C. (2005). The effect of terpenoid extracts from 15 pine species on the feeding behavioural sequence of the late instars of the pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa*. *Behavioural Processes*, 69(3), 303-322.
- Pimentel, C. S., Ferreira, C., Santos, M., & Calvão, T. (2017). Spatial patterns at host and forest stand scale and population regulation of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa*. *Agricultural and Forest Entomology*, 19(2), 200-209.
- Prokopy RJ, Owens ED (1983) Visual detection of plants by herbivorous insects. *Annu Rev Entomol* 28:337-364

- R Core Team (2024) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.r-project.org/>.
- Régolini, M., Castagneyrol, B., Dulaurent-Mercadal, A. M., Piou, D., Samalens, J. C., & Jactel, H. (2014). Effect of host tree density and apparency on the probability of attack by the pine processionary moth. *Forest ecology and Management*, 334, 185-192.
- Robinet C, Baier P, Pennerstorfer J, Schopf A, Roques A (2007) Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France. *Glob Ecol Biog* 16:460-471
- Robinet, C., Rousselet, J., Goussard, F., Garcia, J., & Roques, A. (2010). Modelling the range expansion with global warming of an urticating moth: a Case study from France. Chapter 3: Climate change impacts on biodiversity. *Atlas of biodiversity risk*.
- Roques A, Rousselet J, Avci M, Avtzis DN, Basso A, Battisti A, Ben Jamaa ML, Bensidi A, Berardi L, Berretima W, Branco M, Chakali G, Cota E, Dautbašić M, Delb H, El Alaoui El Fels MA, El Mercht S, El Mokhefi M, Forster B, Garcia J, Georgiev G, Glavendekić MM, Goussard F, Halbig P, Henke L, Hernandez R, Hódar JA, Ipekdağ K, Jurc M, Klimetzek D, Laparie M, Larsson S, Mateus E, Matošević D, Meier F, Mendel Z, Meurisse N, Mihajlović L, Mirchev P, Nasceski S, Nussbaumer C, Paiva MR, Papazova I, Pino J, Podlesnik J, Poirot J, Protasov A, Rahim N, Peña GS, Santos H, Sauvard D, Schopf A, Simonato M, Tsankov G, Wagenhoff E, Yart A, Zamora R, Zamoum M, Robinet C (2015). Climate warming and past and present distribution of the processionary moths (*Thaumetopoea* spp.) in Europe, Asia Minor and North Africa. In: “Processionary Moths and Climate Change: an Update” (Roques A ed). Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 81-161. - doi: 10.1007/978-94-017-9340-7_3
- Roques, A., Battisti, A. (2015). Introduction . In: Roques, A. (eds) Processionary Moths and Climate Change : An Update. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9340-7_1
- Roslin T, Gripenberg S, Salminen J-P, Pulkkinen P (2006) Seeing the trees for the leaves - Oaks as mosaics for a host-specific moth. *Oikos* 113:106-120
- Samalens, J. C., & Rossi, J. P. (2011). Does landscape composition alter the spatiotemporal distribution of the pine processionary moth in a pine plantation forest?. *Population ecology*, 53(2), 287-296.

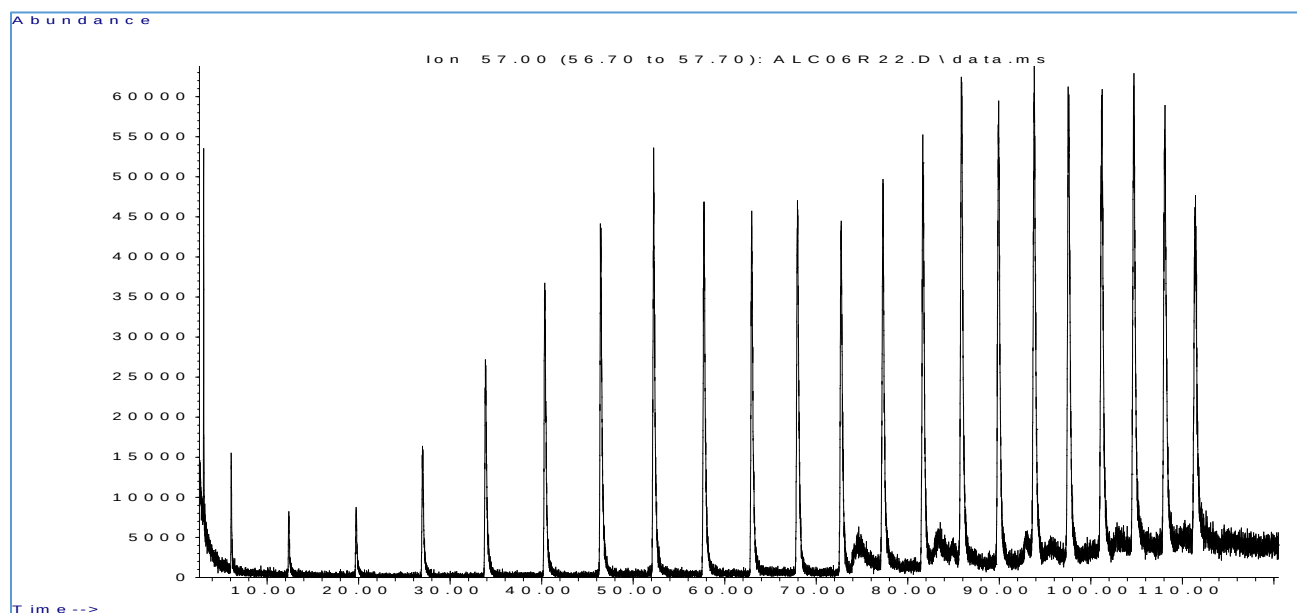
- Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J. J., García-Martín, A., Hernández, R., & de la Riva, J. (2014). Remote-sensing and tree-ring based characterization of forest defoliation and growth loss due to the Mediterranean pine processionary moth. *Forest Ecology and Management*, 320, 171-181.
- Sbabdji M, Kadik B (2011). Effects of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) defoliation on performance of the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*). *Journal of Pest Science*, 84(2): 213–217. -doi :10.1007/s10340-010-0346-x
- Sbabdji, M., El Hadi, O., Haddad, A., Kadik, B., & Lambs, L. (2009). Cedar tree growth (*Cedrus atlantica* Manetti) in Chréa National Park, Algeria, and the influence of defoliation by the pine processionary caterpillar (*Thaumetopoea pityocampa* Sc hiff.). *Revue d'écologie*, 64(4), 323-332.
- Singleton VL, Orthofer R, Lamuela- Raventós RM (1999). [14] Analysis of Total Phenols and Other Oxidation Substrates and Antioxidants by Means of Folin-Ciocalteu Reagent. *Methods In Enzymology*, 299: 152-178.
- Song H-J, Yong S-H, Kim H-G, Kim D-H, Park K-B, Shin K-C, Choi M-S (2022). Insecticidal Activity against *Myzus persicae* of Terpinyl Acetate and Bornyl Acetate in *Thuja occidentalis* Essential Oil. *Horticulturae*, 8(10): 969. –doi :10.3390/horticulturae8100969
- Spînu AP, Nicolaie MA, Asbeck T, Kozak D, Paillet Y, Cateau E, Mikoláš M, Svoboda M, Bauhus J (2024) Temporal development of microhabitats on living habitat trees in temperate European forests. *Ecosystems* 27:690–709
- Stamp N (2003). Out of the quagmire of plant defense hypotheses. *Quarterly Review of Biology*, 78(1): 23–55). –doi :10.1086/367580
- Suárez-Vidal E, Sampedro L, Voltas J, Serrano L, Notivol E, Zas R (2019). Drought stress modifies early effective resistance and induced chemical defences of Aleppo pine against a chewing insect herbivore. *Environmental and Experimental Botany*, 162 : 550–559. –doi :10.1016/j.envexpbot.2019.04.002
- Tiberi, R., Niccoli, A., Curini, M., Epifano, F., Marcotullio, M. C., & Rosati, O. (1999). The role of the monoterpene composition in *Pinus* spp. needles, in host selection by the pine processionary caterpillar, *Thaumetopoea pityocampa*. *Phytoparasitica*, 27, 263-272.

- Vanninen P (2004) Allocation of above-ground growth in *Pinus sylvestris* - Impacts of tree size and competition. *Silva Fenn* 38:425
- Vázquez-González C, Sampedro L, López-Goldar X, Zas R (2021). Genetic and Ecological Basis of Resistance to Herbivorous Insects in Mediterranean Pines. In: “Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin” (Ne'eman G, Osem, Y eds). Springer, Cham, pp199-233. –doi :10.1007/978-3-030-63625-8_11
- Vega, J. M., Moneo, I., & Armentia, A. (1999). Allergy to the pine processionary caterpillar (*Thaumetopoea pityocampa*). *Clinical and Experimental Allergy*, 29(10), 1418-1423.
- Whitehill, J. G. A., Bohlmann, J., & Krokene, P. (2023). Forest Insect-Plant Interactions. In *Forest Entomology and Pathology: Volume 1: Entomology* (Vol. 1, pp. 169–204). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11553-0_7
- Zamoum M (1998). Données sur la bioécologie, les facteurs de mortalité et la dynamique de populations de *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiffermuller (Lep. *Thaumetopoeidae*) dans les pineraies subsahariennes de la région de Djelfa (Algérie). Thèse de Doctorat. Université de Rennes I, UFR Sciences de la vie et de l'environnement, France, pp. 247.
- Zamoum, M., & Démolin, G. (2004). Mécanismes de régulation des populations de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiffermüller (Lep., *Thaumetopoeidae*) en zone semi-aride (Algérie). *Annales de l'Institut national de la recherche agronomique de Tunisie*, 6, 155–173.
- Zehraoui, R., & Kadik, L. (2016). Résultats préliminaires de l'étude de l'impact des reboisements du barrage vert sur la biodiversité floristique cas de la région de Djelfa (Algérie). *Biocenoses*, 7(1), 22-30.
- Zhang, Q. H., & Paiva, M. R. (1998). Female calling behaviour and male response to the sex pheromone in *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.)(Lep., *Thaumetopoeidae*). *Journal of applied entomology*, 122(1-5), 353-360.
- Zhang, Q. H., Schlyter, F., Battisti, A., Birgersson, G., & Anderson, P. (2003). Electrophysiological responses of *Thaumetopoea pityocampa* females to host volatiles: implications for host selection of active and inactive terpenes. *Anzeiger für Schädlingkunde= Journal of pest science*, 76, 103-107.

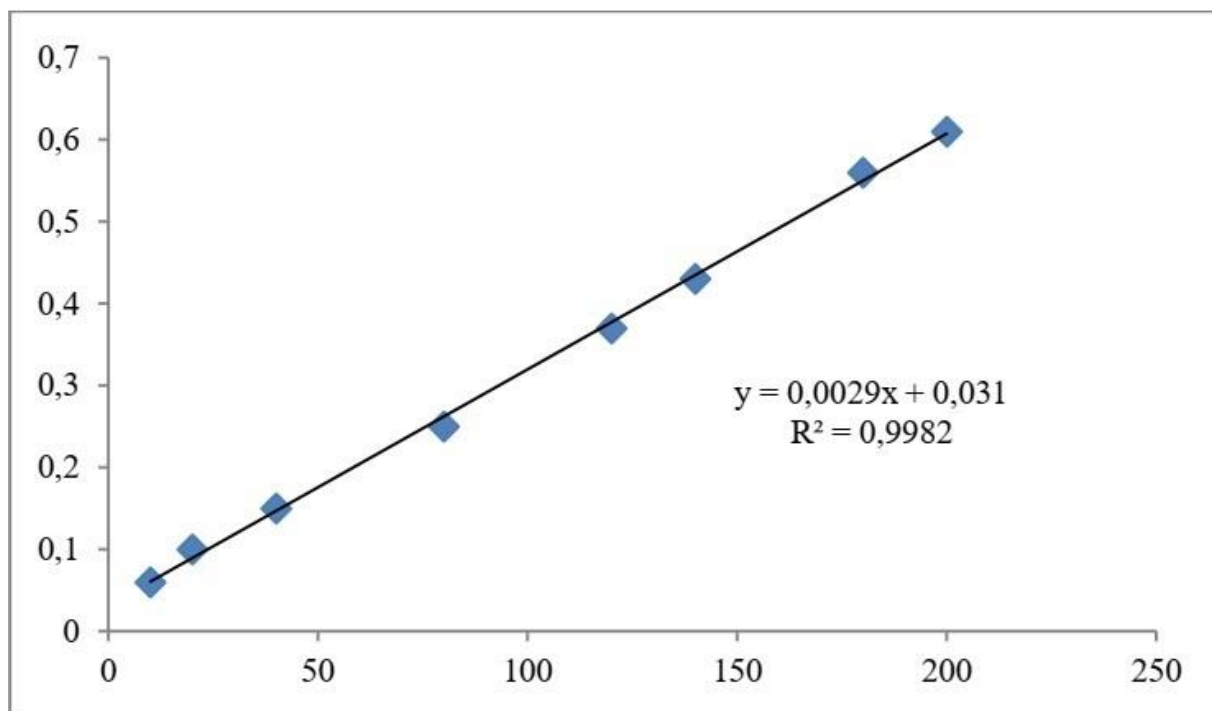
- Zhao J, Xu W, Li R (2017) Visual preference of trees: The effects of tree attributes and seasons. *Urban For Urban Green* 25:19-25
- Ziouche, S., Baali, F., Moutassem, D., & Djazouli, Z. E. (2017). Strategies for choosing location of winter nests of *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermüller, 1775) in three pine forests of Bordj Bou Arreridj region (Algeria).

Annexes

I. Chromatogramme d'étalonnage alcalin pour l'analyse GC-MS :



II. La courbe d'étalonnage basée sur l'acide gallique (10-200 µg/ml) pour le dosage de phénol total



III. Tableau des concentrations des composés issus de l'analyse GC-MS

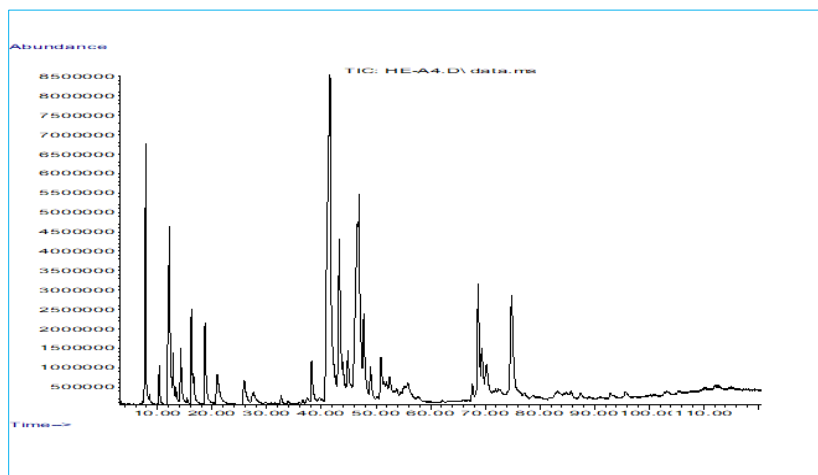
RT	KI*	KI	COMPOUNDS	Concentration (%)											
				A1	A2	A3	A4	A5	A6	N1	N2	N3	N4	N5	N6
7,48	923	922	Tricyclene	0.03	0,04	0,03	0,02	0,15	0.05	0,01	0,02	0,02	0,04	0,01	0.02
7,95	928	930	α -Thujene	0.24	0,33	0,27	0,08	0,15	0.21	0,09	0,61	0,53	0,17	0,10	0.1
8,36	936	936	α -Pinene	7.45	5,68	8,37	4,45	20,23	9.24	5,52	8,38	8,36	7,28	4,71	7.06
9,12	950	948	Camphene	0.36	0,31	0,46	0,10	0,58	0.45	0,17	0,20	0,27	0,17	0,23	0.2
11	973	978	Sabinene	1.75	1,81	2,16	0,80	3,29	2.23	1,58	2,51	2,13	1,49	0,93	1.8
12,04	992	995	β -Myrcene	6.45	5,30	4,05	7,29	5,95	4.84	4,74	8,11	6,19	6,04	3,11	5.11
12,83	1011	1006	δ -3-Carene	1.65	1,09	1,48	1,22	4,54	1.59	0,95	1,50	1,38	0,22	0,37	0.8
13,36	1017	1013	α -Terpinene	0.78	1,09	0,34	0,53	0,24	0.59	0,00	1,13	0,54	0,28	0,23	0.43
14,1	1025	1023	p- cymene	0.69	0,55	0,78	0,40	0,52	0.68	0,37	0,38	0,31	0,51	0,10	0.36
14,25	1030	1025	Limonene	1.58	1,13	1,04	1,42	2,10	1.05	1,31	2,39	1,35	1,02	1,15	1.36
15,34	1038	1040	(Z)- β -Ocimene	0.16	0,14	0,04	0,16	0,17	0.14	0,00	0,11	0,15	0,18	0,19	0.16
16,13	1050	1051	(E)- β -Ocimene	3.65	3,59	1,44	2,46	2,60	1.78	0,47	3,23	3,90	3,44	4,64	4.32
16,55	1060	1057	γ -Terpinene	0.76	2,24	0,55	0,91	0,27	0.46	0,00	1,37	1,18	0,62	1,17	1.3
18,7	1087	1086	Terpinolene	2.96	7,25	2,88	2,46	2,98	3.71	0,17	7,35	5,26	1,58	2,04	2.26
20,5	1099	1110	Linalool	1.63	2,37	0,63	1,88	1,37	1.08	1,87	1,21	3,45	1,95	1,89	2.06
25,59	1177	1181	Terpin-4-ol	3.54	3,38	1,78	1,52	0,74	2.12	0,43	2,19	1,07	0,74	0,00	0.88
26,95	1190	1199	α -Terpineol	1	1,14	1,11	1,06	0,19	0.9	0,20	0,03	0,45	0,58	0,09	0.27
29,52	1237	1237	Pulegone	0	0,00	0,74	0,00	0,00	0.14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
32,47	1285	1280	Bornyl acetate	0.32	0,22	0,07	0,29	0,46	0.12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
36,5	1351	1341	α -Cubebene	0.16	0,13	0,03	0,08	0,05	0.09	0,07	0,09	0,09	0,16	0,28	0.13
38,15	1370	1366	α -Ylangene	1.42	0,96	0,35	1,71	0,64	1.2	1,87	2,24	1,93	1,45	2,11	1.96
39,03	1390	1380	β -Elemene	0.19	0,28	0,00	0,24	0,19	0.1	0,25	0,27	0,00	0,32	0,21	0.21
40,2	1393	1399	Phenethyl isobutyrate	0.28	0,27	0,32	0,33	0,38	0.32	0,19	0,25	0,19	0,28	0,32	0.24
41,7	1420	1422	<i>Trans</i> -caryophyllene	14.95	21,06	11,63	23,68	12,04	17.42	21,03	24,40	34,14	26,28	31,27	27.62

43,3 4	145 3	144 9	α -Humulene	3.95	5,34	2,85	5,98	2,68	4.16	5,39	6,09	6,64	5,44	7,33	6.18
43,8 3	145 6	145 7	(E)- β -Farnesene	0.35	0,42	0,38	0,27	0,26	0.33	0,28	0,42	0,49	0,40	0,60	0.48
44,7 5	147 6	147 1	γ -Murolene	1.24	0,83	0,29	1,23	0,34	0.72	0,99	1,11	0,56	0,62	0,88	0.83
45,6 4	148 0	148 7	Germacrene D	0	0,27	0,00	0,00	0,00	0.05	0,00	0,23	0,18	0,22	0,31	0.18
46,2 2	149 1	149 6	Phenethyl isovalerate	15.68	17,23	24,52	15,44	21,66	23.9 6	19,0 9	17,3 1	12,1 0	13,3 8	21,9 2	19.9
47,7 5	152 4	152 2	δ -Cadinene	1.8	1,97	1,42	1,91	0,97	1.24	0,95	1,96	1,29	1,78	2,86	1.78
48,9 2	154 0	154 3	(E)- α - Bisabolene	0.9	0,62	0,90	1,06	0,67	0.82	0,87	1,12	1,70	2,20	2,66	1.71
50,7 8	158 1	157 5	Caryophyllene oxide	1.54	1,04	1,64	1,32	1,09	1.35	6,28	1,00	1,63	3,01	2,82	0.92
51,3 6	158 5	158 5	β -Phenylethyl tiglate	0.65	0,09	0,51	0,20	0,26	0.32	0,40	0,52	0,16	0,37	0,40	0.37
52,4 1	165 2	165 3	α -Eudesmol	0.23	0,56	1,13	0,58	0,00	0.5	0,86	0,24	0,63	1,47	0,28	0.69
53,7 1	165 4	166 4	α -Cadinol	0.15	0,00	0,17	0,14	0,25	0.14	0,66	0,00	0,00	0,16	0,00	0.16
55,6 7	167 1	168 2	bulnesol	0.06	0,13	0,00	0,18	0,09	0.1	0,66	0,00	0,00	0,26	0,00	0.18
56,9 2	170 0	169 3	Eudesm-7(11)- en-4-ol	1.02	0,73	1,07	0,30	0,00	0.62	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0
68,7 5	193 8	191 7	Cembrene	4.95	2,32	7,84	3,81	3,09	2.96	2,77	0,08	0,22	3,88	1,94	2.26
69,4 5	194 8	193 1	(3E)-Cembrene A	1.65	0,79	3,71	1,22	1,19	1.46	1,26	0,12	0,00	1,65	0,72	1.2
70,0 6	196 6	194 4	(3Z)-Cembrene A	1.25	0,57	1,87	1,21	0,76	1.13	1,58	0,23	0,00	1,24	0,51	0.71
72,5	201 9	199 5	Cembrene C	0	0,65	0,44	0,41	0,00	0.3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0
72,9	201 7	200 4	Phyllocladene	0	0,00	0,36	0,21	0,00	0.11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
74,7 8	204 7	204 5	Thunbergol	6.55	4,57	3,44	7,32	0,00	4.36	10,7 1	0,00	0,30	6,29	0,26	3.51
77,1	216 0	209 6	Cembrienol	0.3	0,00	0,64	0,39	0,00	0.26	0,72	0,08	0,00	0,00	0,00	0.16
83,5 9	224 5	224 6	Palustral	0.48	0,33	0,00	0,59	0,84	0.44	0,90	0,41	0,00	0,04	0,16	0.32
84,2 7	226 3	226 2	Dehydroabietal	0.23	0,00	0,78	0,10	0,53	0.33	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0.11
85,5 9	229 7	229 3	Methyl isopimarate	0.46	0,38	0,43	0,11	0,65	0.4	0,00	0,41	0,32	0,33	0,37	0.28
87,1 8	232 9	233 2	Methyl dehydroabietat e	0.6	0,09	1,15	0,31	1,00	0.63	0,50	0,11	0,27	0,30	0,03	0.14
88,7 8	237 7	237 2	Methyl abietate	0.2	0,00	0,20	0,23	0,38	0.2	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0

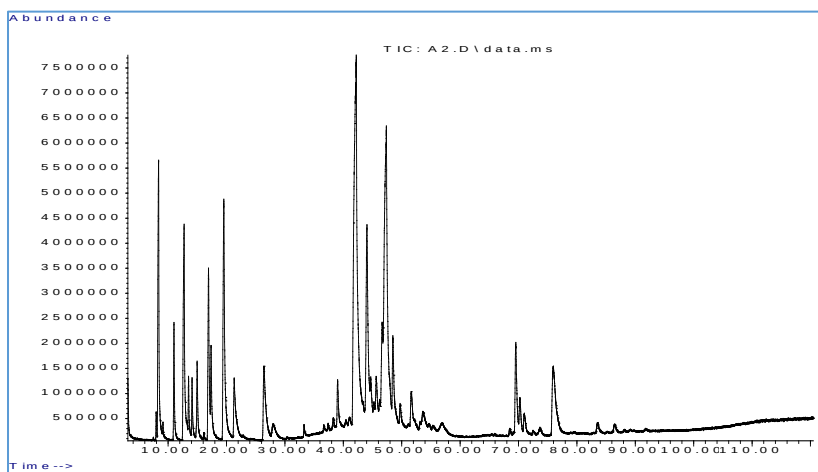
90,9 3	244 3	242 6	Methyl neoabietate	0.25	0,13	0,29	0,42	0,25	0.26	0,45	0,16	0,00	0,47	0,00	0.21
-----------	------------------------	------------------------	-----------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

IV. Chromatogrammes issus d'analyses GC-MS du feuillage :

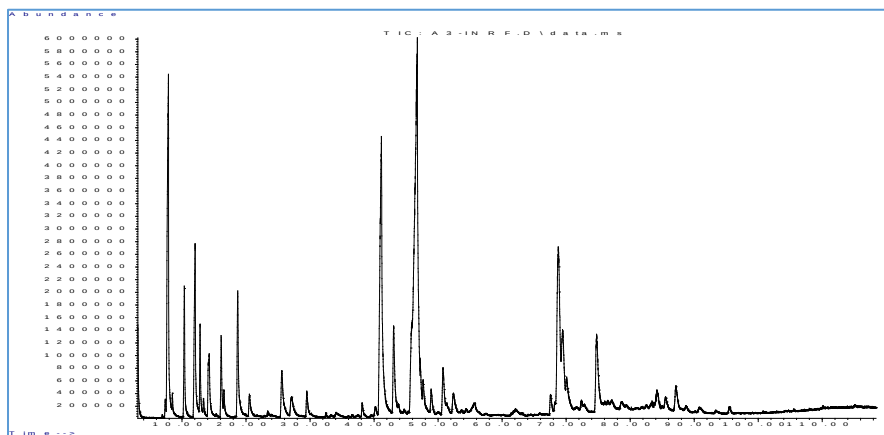
A1:



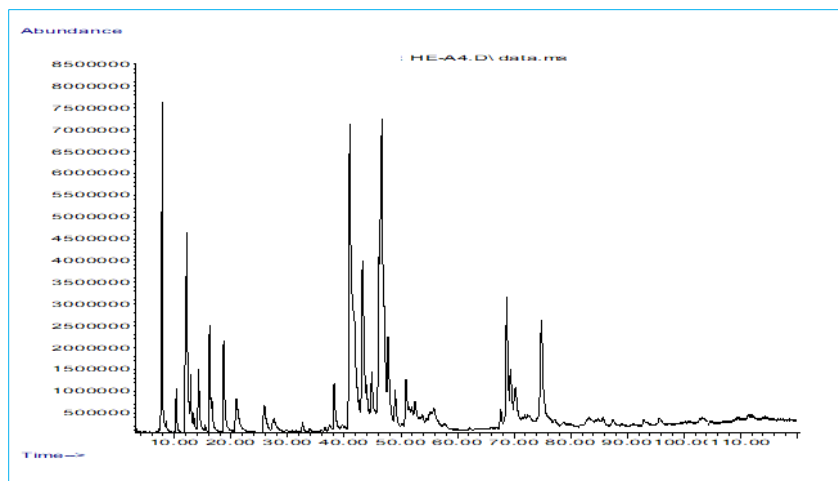
A2:



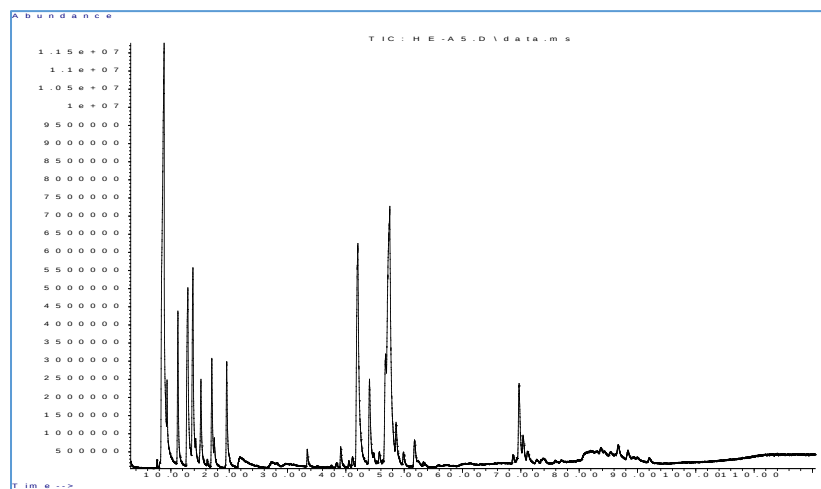
A3:



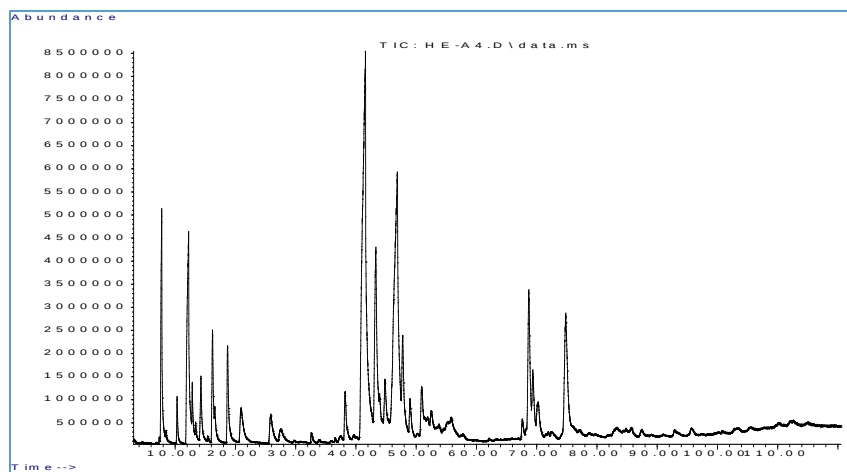
A4:



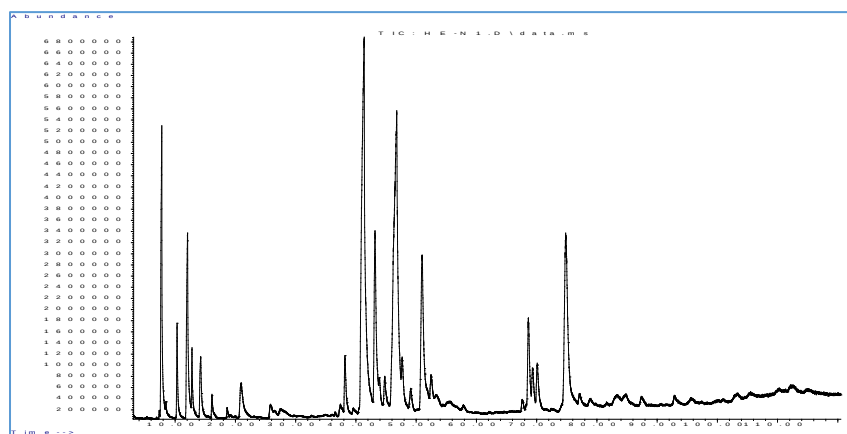
A5:



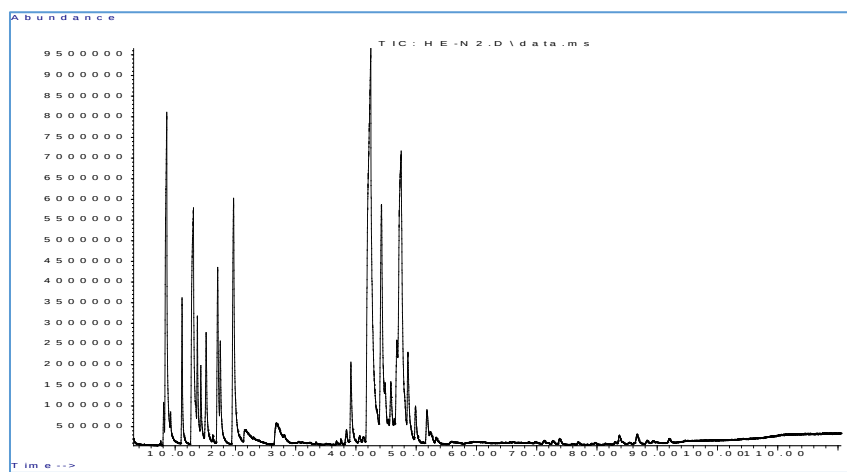
A6:



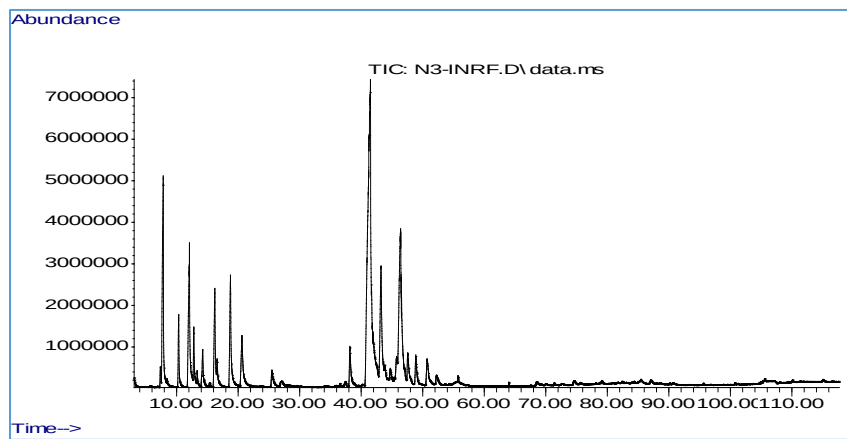
N1:



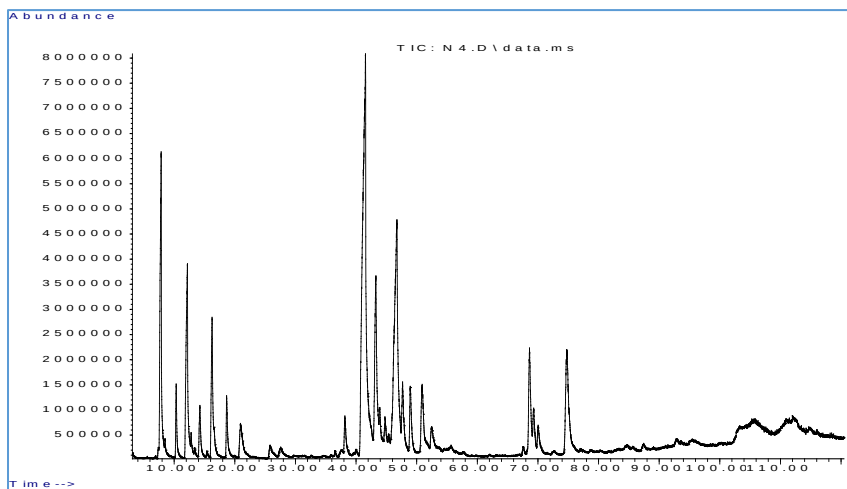
N2:



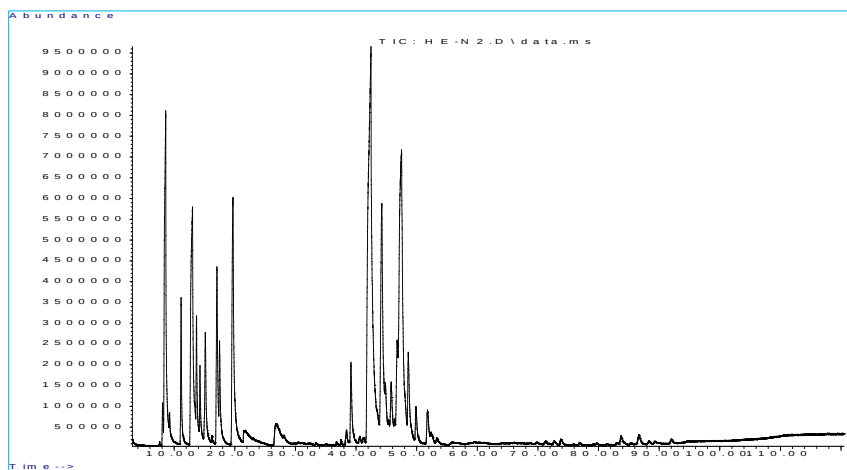
N3:



N4:



N5 :



N6 :

