



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research



جامعة زيان عاشور-الجلفة
Ziane Achour University of Djelfa
كلية علوم الطبيعة والحياة
Faculty of Natural and Life Sciences
Department of Agronomic and Veterinary Sciences

Thesis

With a view to obtaining the 3rd cycle Doctorate Diploma

Speciality: RURAL ENVIRONMENT: USE AND MANAGEMENT

Title

**Study of the bio-ecology of the processionary caterpillar pine
Thaumetopoea pityocampa in different forest environments in
Ain Defla and control trial**

Presented and defended publicly on 21/06/2023

By : M. ZAHED Khalid

In front of the jury:

President : M. GUIT Brahim Professor Univ. ZA-Djelfa
Supervisor : M. SOUTTOU Karim Professor Univ. ZA-Djelfa
Examiners :

M. SAIDI Radhwane Professeur (Univ. Laghouat)
M. KARAHACANE Tahar MCA (Univ. Khemis-Meliana)
Mlle GUERZOU Ahlem Professeur (Univ. ZA-Djelfa)
M. AIT BELKACEM Abdelkrim Professeur (Univ. ZA-Djelfa)

Academic year 2022 / 2023



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
جامعة زيان عاشور-الجلفة
Université Ziane Achour – Djelfa
كلية علوم الطبيعة والحياة
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département Agrovétérinaire



Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques

Option : Environnement rural : utilisation et gestion

Thème

**Étude de la bio-écologie de la chenille processionnaire
du pin *Thaumetopoea pityocampa* dans différents
milieux forestiers à Ain Defla et essai de lutte**

Présenté par : M. ZAHED Khalid

Devant le jury :

Président :	M. GUIT Brahim	Professeur (Univ. Djelfa)
Directeur de thèse :	M. SOUTTOU Karim	Professeur (Univ. Djelfa)
Examineurs :	M. SAIDI Radhwane	Professeur (Univ. Laghouat)
	M. KARAHACANE Tahar	MCA (Univ. Khemis-Meliana)
	M ^{lle} GUERZOU Ahlem	Professeur (Univ. Djelfa)
	M. AIT BELKACEM Abdelkrim	Professeur (Univ. Djelfa)

Année Universitaire : 2022-2023

Dédicaces

C'est avec un très grand honneur que nous dédions ce travail de recherche aux personnes qui nous sont les plus chères au monde, nos chers parents qui nous ont permis de continuer nos études dans les meilleures conditions, en faisant beaucoup de sacrifices, et qui nous ont appris à ne jamais baisser les bras.

Nos dédicaces vont aussi à tous nos frères et sœurs, neveux et nièces, à nos amis et à tous ceux qui nous ont aidés pour réaliser ce travail de recherche, merci à tous.

ZAHED Khaled

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions, Dieu, le tout puissant, pour la santé, la patience et le courage qu'il nous a donné, pour la réalisation de ce travail de recherche.

*Tout d'abord, Nos remerciements les plus vifs s'adressent au **Professeur SOUTTOU Karim**, pour son encadrement, ses précieuses orientations et conseils tout au long de ce travail sans aucune hésitation en nous faisant part de son savoir-faire tant sur le plan pratique que théorique.*

*Nous remercions infiniment tous les membres de jurys. Commencant par le président du jury le Professeur **GUIT Brahim** de l'Université Ziane Achour de Djelfa qui a accepté la présidence du jury, les examinateurs Professeurs **GUERZOU Ahlem** et **AIT BELKACEM Abdelkrim** de l'Université Ziane Achour de Djelfa, le Professeur **SAIDI Radhwane** de l'Université de Laghouat et le Professeur **KARAHACENE Tahar** de l'Université de Khemis Meliana d'avoir accepté sans hésitation de nous faire partager leurs remarques et observations.*

*Une reconnaissance particulière et respectueuse à messieurs **ZAMOUM Mohamed**, Directeur de recherches à l'institut national de recherches forestières à Bainem et **KADOUN Abdelhak** pour m'avoir assisté et parrainé durant la réalisation de ma thèse.*

*Mes vifs remerciements s'adressent aux Dr. **HAMZA née ARAB Feroudja**, médecin spécialiste en anatomie pathologique à l'hôpital de Parnet et Dr. **BENSAADA**, médecin spécialiste en anatomie pathologique à l'hôpital d'Ain Defla pour leurs disponibilités et aides en me faisant part de leurs savoir et savoir-faire dans la préparation et l'interprétation des coupes histologiques réalisées sur les chenilles processionnaires traitées.*

*Un immense merci et remerciements en particulier aux doctresses **AIT KACI ALI Salima** et **LAISSOU Farida** pour leurs aide et encouragement.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers **M. FERHAT Abdelhak** et **M. MENADI Bilal** qui m'ont consacré du temps pour m'aider à réaliser l'étude climatique, les traductions en anglais, les réalisations des cartes et traitement des données.*

*Je suis reconnaissant à ceux qui m'ont aidé à la réalisation de cette thèse et en particulier à monsieur **BENSIDI Attia** de l'institut national de recherches forestières à Djelfa pour les informations et le matériel de travail sur terrain, et à tout le **personnel** de la conservation des forêts de la direction des services agricoles de la wilaya d'Ain Defla ainsi que la direction du barrage d'eau de Zeddine de cette wilaya.*

*Reconnaissance et remerciements aux responsables du laboratoire de l'Université de Khemis Meliana qui m'ont permis de réaliser une bonne partie de mes expériences dans leur laboratoire et en particulier **M^{me} KALTOUME** ingénieure de laboratoire de biologie végétale pour son aide inconditionnelle.*

Mes vifs remerciements à mes amis, et plus particulièrement M. OTHMANE Kouider, pour son accompagnement, aide, soutien, hébergement lors de mes déplacements à Djelfa. Mes remerciements vont à tous les collègues de la spécialité Environnement rural : utilisation et gestion de l'Université de Djelfa.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont participé de près et de loin à la réalisation de ce travail.

M. ZAHED Khaled

Sommaire

Sommaire

Introduction	2
Chapitre 1 : Revue bibliographique sur la chenille processionnaire du pin	7
1.1. Systématique et description de la chenille processionnaire du pin	7
1.1.1. Systématique de la chenille processionnaire	7
1.1.2. Description de la chenille processionnaire	7
1.1.2.1. Description des adultes.....	8
1.1.2.2. Description des larves	8
1.2. Cycle de développement	8
1.2.1. La phase aérienne	8
1.2.1.1. La phase adulte.....	8
1.2.1.2. La ponte.....	9
1.2.1.3. La phase larvaire	9
1.2.1.3.1. Période ambulatoire.....	10
1.2.1.3.2. Le nid d'hiver.....	11
1.2.1.3.3. Les processions	11
1.2.2. La phase souterraine	12
1.2.2.1. La nymphose	12
1.2.2.2. La diapause.....	12
1.2.2.3. Calage du cycle	12
1.3. Bio-écologie de la chenille processionnaire du pin.....	13
1.3.1. Grands traits de la biologie de la processionnaire	13
1.3.2. Rôle de la biodiversité.....	13
1.3.3. Plante hôte	14
1.3.4. Incidence de facteurs écologiques.....	16
1.3.4.1. Ensoleillement et photopériode	16
1.3.4.2. Température.....	16
1.3.4.3. Altitude et latitude	17
1.3.5. Répartition géographique	17
1.4. Particularités urticantes	19
1.4.1. Poils urticants et miroirs.....	19
1.4.2. Comportement de défense de la chenille processionnaire du pin	20
1.4.3. Substance urticante et physiopathologie	20
1.5. Conséquences environnementales et dégâts forestiers.....	21
1.5.1. Conséquences écologiques	21
1.5.2. Conséquences économiques	22
1.6. Moyens de lutte	23
1.6.1. Mesures écologiques (Lutte préventifs)	23
1.6.2. Lutte mécanique	24
1.6.3. Lutte chimique.....	24
1.6.4. Lutte biologique	25
1.6.4.1. Lutte microbiologique bactérienne.....	25
1.6.4.2. Lutte microbiologique virale	25
1.6.4.3. Lutte par les nématodes entomopathogènes	26

1.6.4.4. Lutte par les champignons entomopathogènes.....	26
1.6.4.5. La confusion « sexuelle »	26
1.6.4.6. Prédateurs	27
Chapitre 2 : Présentation de la région d'Ain Defla	29
2.1. Caractéristiques géographiques de la région d'Ain Defla.....	29
2.2. Facteurs édaphiques de la région d'étude	30
2.2.1. La pédologie.....	30
2.2.2. Texture du sol dans les différentes communes du travail	30
2.3. Hydrographie.....	30
2.4. Caractéristiques climatiques de la région d'étude	31
2.4.1. Températures	31
2.4.2. Précipitations	32
2.4.3. Humidité relative.....	35
2.4.4. Le Vent.....	35
2.5. Synthèse des données climatiques de la région d'étude.....	36
2.5.1. Diagramme ombrothermique de Gausсен de la région d'étude	36
2.5.2. Climagramme d'Emberger (1955) de la région d'étude	38
2.6. Flore de la région d'Ain Defla	38
2.7. Prédateurs et parasites de la chenille processionnaire.....	41
2.7.1. Les ennemis de la phase aérienne.....	41
2.7.2. Ennemis de la phase souterraine	42
Chapitre 3 : Matériel et méthodes.....	44
3.1. Choix et description des stations d'échantillonnage	44
3.1.1. Choix et description des forêts naturelles.....	44
3.1.2. Choix et description des reboisements	46
3.2. Échantillonnage effectué sur le terrain.....	48
3.2.1. Échantillonnage des nids d'hivers.....	48
3.2.2. Piégeage des chenilles partant en procession de nymphe.....	48
3.2.2.1. Installation des pièges à chenille	48
3.2.2.2. Capture des chenilles.....	50
3.2.3. Échantillonnage des pontes	50
3.2.4. Piégeage des adultes mâles à l'aide des phéromones sexuées	52
3.2.4.1. Description des pièges à phéromones sexuées utilisés.....	52
3.2.4.2. Méthode d'installation des pièges à phéromones.....	53
3.2.5. Utilisation des extraits des huiles de plantes contre les chenilles processionnaires... 54	
3.2.5.1. Intérêt des huiles essentielles	55
3.2.5.2. Critère de qualité des huiles essentielles	55
3.2.5.3. Rendement des huiles essentielles.....	56
3.2.5.4. Choix et description des plantes utilisées.....	56
3.2.5.4.1. Le thym (<i>Thymus vulgaris</i>)	56
3.2.5.4.2. La lavande (<i>Lavandula angustifolia</i>)	57
3.2.5.5. Présentation des zones de récolte	57
3.3. Échantillonnage effectué au laboratoire	60
3.3.1. Biométrie des nids d'hiver	60

3.3.2. Biométrie des larves	61
3.3.3. Conditionnement des chenilles de la nymphose	61
3.3.4. Biométrie des chrysalides.....	62
3.3.5. Conditionnement des chrysalides	63
3.3.6. Biométrie des adultes après l'émergence et leur identification.....	64
3.3.7. Identification des parasites des nymphoses.....	65
3.3.8. Biométrie et conditionnement des manchons.....	66
3.3.9. Évaluation du nombre d'œufs par ponte	67
3.3.10. Identification des parasites des œufs	67
3.3.11. Utilisation des extraits des huiles de plantes contre les chenilles processionnaires. 68	
3.3.11.1. Méthode d'extraction des huiles essentielles des plantes choisies par la technique d'hydrodistillation.....	68
3.3.11.2. Méthode d'application des huiles essentielles contre les chenilles.....	69
3.3.11.2.1. Test par contact au laboratoire sur les stades larvaire L3 et L5	69
3.3.11.2.2. Test par contact, sur terrain, sur les stades larvaires L3 et L5	71
3.3.11.3. Effet des huiles sur l'histologie de l'insecte.....	72
3.3.11.4. Analyse chimique des huiles essentielles.....	73
3.4. Exploitation des résultats par les méthodes statistiques	73
3.4.1. Analyse descriptive	73
3.4.2. Calcul de la DL (dose létale).....	74
3.4.3. Test d'ANOVA	75
Chapitre 4 : Résultats sur la bio-écologie de la chenille processionnaire du pin, sur la lutte par l'utilisation des huiles essentielles et le piégeage des mâles par les phéromones sexuelles	77
4.1. Résultats sur les nids d'hiver.....	77
4.1.1. Distribution des nids en fonction de la hauteur des arbres.....	77
4.1.2. Estimation de la densité des nids d'hiver	78
4.1.3. Biométrie des nids d'hiver	79
4.1.4. Effectifs des chenilles trouvées dans les nids d'hiver	81
4.1.5. Orientation des nids d'hiver	82
4.2. Piégeage des chenilles partant en procession de nymphose.....	85
4.2.1. Période parcellaire des descentes	85
4.2.2. Comparaison de rythmes des descentes dans les différents biotopes.....	86
4.3. Résultats sur les pontes	91
4.3.1. Orientation des sites de ponte.....	91
4.3.2. Distribution des pontes en fonction de la hauteur des arbres	93
4.3.3. Évaluation du nombre d'œufs par ponte	94
4.3.3.1. Effectif d'œuf total	94
4.3.3.2. Effectif d'œuf éclos.....	95
4.3.3.3. Effectif d'œuf non éclos	96
4.3.3.4. Effectif des œufs parasités.....	97
4.3.3.5. Pourcentages des œufs éclos, non éclos et parasités	97
4.3.4. Paramètres des manchons.....	98
4.3.4.1. Longueur des manchons.....	98

4.3.4.2. Nombre de lignes d'œufs par manchon.....	99
4.3.4.3. Effectifs des portes-manchons sur l'arbre.....	100
4.3.5. Identification des parasites des œufs.....	101
4.4. Effectif et biométrie des chenilles et des adultes.....	101
4.4.1. Biométrie des chenilles récoltées et conditionnées au laboratoire.....	101
4.4.2. Effectifs des chrysalides, des chrysalides parasitées et des chenilles n'arrivant.....	102
pas à se transformer en chrysalides.....	102
4.4.3. Émergences journalières des adultes issus du conditionnement des chrysalides au	
laboratoire.....	103
4.4.3.1. Effectifs des papillons après leur émergence.....	103
4.4.3.2. Biométrie des adultes après leurs émergences.....	105
4.5. Résultats obtenus après l'application des huiles essentielles contre la chenille.....	106
processionnaire du pin d'Alep.....	106
4.5.1. Effet des huiles essentielles sur les chenilles au laboratoire.....	106
4.5.2. Effet des huiles essentielles sur les chenilles dans les nids d'hiver.....	109
4.5.3. Effet des traitements sur les tissus des larves traitées.....	112
4.5.4. Analyse chromatographique des huiles essentielles de <i>Thymus vulgaris</i> et <i>Lavandula</i>	
<i>angustifolia</i>	116
4.6. Résultats du piégeage des adultes à l'aide des phéromones sexuelles.....	117
4.6.1. Période d'envole des papillons mâles.....	117
4.6.2. Comparaison des rythmes de capture des papillons mâles dans les différents biotopes	
.....	119
4.6.3. Constat du suivi général des stades phénologiques de la chenille processionnaire dans	
la région d'Ain Defla.....	121
Chapitre 5 : Discussion sur la bio-écologie de la chenille processionnaire du pin, sur la lutte	
par l'utilisation des huiles essentielles et le piégeage des mâles par les phéromones sexuelles.	
.....	124
5.1. Discussion sur les nids d'hiver.....	124
5.1.1. Caractéristiques des nids d'hiver.....	124
5.1.2. Estimation de la densité des nids d'hiver.....	124
5.1.3. Biométrie des nids d'hiver.....	125
5.1.4. Effectifs des chenilles trouvées dans les nids d'hiver.....	126
5.1.5. Orientation des sites des nids d'hiver.....	127
5.2. Piégeage des chenilles partant en procession de nymphose.....	127
5.3. Discussion des résultats des pontes.....	128
5.3.1. Orientation des sites de pontes.....	128
5.3.2. Distribution des pontes en fonction de la hauteur des arbres.....	129
5.3.3. Évaluation du nombre d'œufs par ponte.....	129
5.3.3.1. Effectif total des œufs.....	129
5.3.3.2. Effectif des œufs éclos.....	130
5.3.3.3. Effectif des œufs non éclos.....	131
5.3.3.4. Effectif des œufs parasités.....	132
5.3.4. Paramètres des manchons.....	133
5.3.4.1. Longueur des manchons.....	133

5.3.4.2. Effectifs des porte-manchons sur l'arbre.....	134
5.3.5. Identification des parasites des œufs	135
5.4. Effectif et biométrie des chenilles, des chrysalides et des adultes	135
5.4.1. Biométrie des chenilles soumises aux conditionnements dans le laboratoire	135
5.4.2. Effectifs des chrysalides, chrysalides parasitées et chenilles n'arrivant pas à	136
se transformer.....	136
5.4.3. Émergences journalières des adultes issus du conditionnement des chrysalides au	136
laboratoire.....	136
5.5. Discussions des résultats obtenus après l'application des huiles essentielles contre le ...	137
ravageur de pin d'Alep.....	137
5.5.1. Effet des huiles essentielles sur les chenilles au laboratoire et sur terrain	137
5.5.2. Effet des huiles essentielles sur les tissus de la chenille processionnaire	141
5.5.3. Composition chimique des huiles essentielles	141
5.6. Piégeage des adultes à l'aide des phéromones sexuelles	144
Conclusion et perspectives	147
Références bibliographiques	152
Annexe 1	176
Annexe 2	178
Résumés	181

Liste des abréviations

DGF : Direction générale des forêts

DSA : direction de services agricole

D : dose

DL : dose létale

ENSV : Ecole nationale supérieur de vétérinaire

E : Est

FAO : Food and Agriculture Organisation

Fig. : Figure

GC-MS : chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse

g : gramme

Ha : hectare

Kg : kilogramme

KI : indices de Kovats

Km : kilomètre

L : stade larvaire

ml L⁻¹ : millilitre par litre

mm : millimètre

m : mètre

ml : millilitre

Min : minute

Min. : valeur minimale

Max. : valeur maximale

Moy. : moyenne

m/s : mètre par seconde

N : nord

O : ouest

ONM : Office national de la météorologie

P : précipitation

S : sud

T : température

°C : degré Celsius

µl : microlitre

Liste des figures

Figure 1 : Ponte de la processionnaire sur deux aiguilles (Manchon 1), ponte de la processionnaire sur un rameau (Manchon 2)	9
Figure 2 : Pin d'Alep de la région d'Ain Defla.....	15
Figure 3 : Répartition du genre <i>Pinus</i> et la chenille processionnaire en Algérie.....	19
Figure 4 : Les limites géographiques de la région d'Ain Defla	29
Figure 5 : Courbe de variation de la température minimale, maximale et histogramme de précipitation de l'année 2014	33
Figure 6 : Courbe de variation de la température minimale, maximale et histogramme de précipitation de l'année 2015	33
Figure 7 : Courbe de variation de la température minimale, maximale et histogramme de précipitation de l'année 2016	34
Figure 8 : Courbe de variation de la température minimale, maximale et histogramme de précipitation de l'année 2017	34
Figure 9 : Humidité relative mensuelle enregistrée dans la région d'Ain Defla de 2014 à 2017	35
Figure 10 : Vitesse mensuelle du vent enregistrée dans la région d'Ain Defla de 2014 à 2017	36
Figure 11 : Diagrammes ombrothermiques de la région d'Ain Defla (2014-2017).....	37
Figure 12 : Place d'Ain Defla dans le Climagramme d'Emberger (2003-2017)	39
Figure 13 : Situation géographique des stations d'échantillonnage	44
Figure 14 : Forêt naturelle de Djebel Doui (station 1)	45
Figure 15 : Forêt naturelle de Temoulgha (station 2).....	46
Figure 16 : Reboisement de Babor (station 3).....	47
Figure 17 : Reboisement de Temoulgha (station 4)	47
Figure 18 : Échantillonnage des nids d'hiver en février 2015	49
Figure 19 : Mise en place du piège à chenille en mars 2015	49
Figure 20 : Procession des chenilles en avril 2016	50
Figure 21 : Manchon (ponte) sur des aiguilles du Pin d'Alep en septembre 2016	51
Figure 22 : Manchon (ponte) sur un rameau du Pin d'Alep en septembre 2016	52
Figure 23 : Mise en place des pièges à phéromone en juillet 2016.....	54
Figure 24 : <i>Thymus vulgaris</i> de la région de Mekhatria (mai 2018).....	58
Figure 25 : <i>Thymus vulgaris</i> dans la région de Mekhatria (mai 2018)	58
Figure 26 : <i>Lavandula angustifolia</i> de la région d'Arib (avril 2018).....	59
Figure 27 : <i>Lavandula angustifolia</i> dans la région d'Arib (septembre 2019).....	59
Figure 28 : Pesé du nid d'hiver	60
Figure 29 : Biométrie des larves	61
Figure 30 : Conditionnement des chenilles de la nymphose	62
Figure 31 : Transformation des chenilles en chrysalides	62
Figure 32 : Biométrie des chrysalides	63
Figure 33 : Conditionnement des chrysalides	63
Figure 34 : Imagos de chenille processionnaire après l'émergence.....	64
Figure 35 : Mensuration des imagos	65

Figure 36 : Chrysalides déformées.....	65
Figure 37 : Chrysalide parasitée.....	66
Figure 38 : Conditionnement des manchons dans des tubes en verre.....	66
Figure 39 : Évaluation du nombre d'œufs par ponte.....	67
Figure 40 : Trous sombre (trous de sortie de parasites).....	67
Figure 41 : Système d'extraction par hydro distillation.....	68
Figure 42 : Les différentes étapes de l'anapath.....	72
Figure 43 : Orientation des nids d'hiver dans la station 1 (forêt naturelle du mont Doui)	83
Figure 44 : Orientation des nids d'hiver dans la station 2 (forêt naturelle du mont Temoulgha)	83
Figure 45 : Orientation des nids d'hiver de la station 3 (reboisement de Babor)	84
Figure 46 : Orientation des nids d'hiver de la station 4 (reboisement de Temoulgha).....	84
Figure 47 : Effectifs journaliers des descentes des chenilles partant en procession de nymphe dans la station 1 (forêt naturelle du mont Doui).....	87
Figure 48 : Effectifs journaliers des descentes des chenilles partant en procession de nymphe dans la station 2 (forêt naturelle du mont Temoulgha).....	88
Figure 49 : Effectifs journaliers des descentes des chenilles partant en procession de nymphe dans la station 3 (reboisement de Babor).....	89
Figure 50 : Effectifs journaliers des descentes des chenilles partant en procession de nymphe dans la station 4 (reboisement de Temoulgha)	90
Figure 51 : Orientation des manchons de la station 1 (forêt naturelle du mont Doui).....	91
Figure 52 : Orientation des manchons de la station 2 (forêt naturelle du mont Temoulgha)..	92
Figure 53 : Orientation des manchons de la station 3 (reboisement de Babor)	92
Figure 54 : Orientation des manchons de la station 4 (reboisement de Temoulgha)	93
Figure 55 : <i>Ooencyrtus pityocampae</i> (Mercet, 1921)	101
Figure 56 : Taux des papillons issus des chrysalides dans la forêt naturelle du mont Doui .	104
Figure 57 : Taux des papillons issus des chrysalides dans la forêt naturelle de Temoulgha	104
Figure 58 : Taux des papillons issus des chrysalides dans le reboisement de Babor.....	105
Figure 59 : Taux des papillons issus des chrysalides dans le reboisement de Temoulgha ...	105
Figure 60 : Pourcentage de mortalité des chenilles processionnaires L3 après exposition aux huiles essentielles de deux plantes sur terrain	109
Figure 61 : Pourcentage de mortalité des chenilles processionnaires L5 après exposition aux huiles essentielles de deux plantes au laboratoire	109
Figure 62 : Pourcentage de mortalité des chenilles processionnaires L3 après exposition aux huiles essentielles de deux plantes sur terrain	112
Figure 63 : Pourcentage de mortalité des chenilles processionnaires L5 après exposition aux huiles essentielles de deux plantes sur terrain	112
Figure 64 : Effet histologique de l'huile essentielle de <i>T. vulgaris</i> et <i>L. angustifolia</i> sur le revêtement cutané de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	113
Figure 65 : Effet histologique de l'huile essentielle de <i>T. vulgaris</i> et <i>L. angustifolia</i> sur le tractus intestinal de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	114
Figure 66 : Effet histologique de l'huile essentielle de <i>T. vulgaris</i> et <i>L. angustifolia</i> sur l'intestin de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	115

Figure 67 : Analyse chimique par Chromatographie en Phase Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse (GC-MS) de l'huile essentielle de <i>Thymus vulgaris</i>	116
Figure 68 : Analyse chimique par Chromatographie en Phase Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse (GC-MS) de l'huile essentielle de <i>Lavandula angustifolia</i>	117
Figure 69 : Effectifs journaliers des captures des imagos mâles dans la forêt naturelle du mont Doui.....	119
Figure 70 : Effectifs journaliers des captures des imagos mâles dans la forêt naturelle de Temoulgha.....	120
Figure 71 : Effectifs journaliers des captures des imagos mâles dans le reboisement de Babor	120
Figure 72 : Effectifs journaliers des captures des imagos mâles dans le reboisement de Temoulgha.....	121
Figure 73 : Différentes écophases de la chenille processionnaire du pin dans la région d'Ain Defla	121

Liste des tableaux

Tableau 1. Flore herbacée recensée à Ain Defla	40
Tableau 2. Les ennemis de la phase aérienne	41
Tableau 3. Ennemis de la phase souterraine	42
Tableau 4. Présentation des plantes aromatiques testées	60
Tableau 5. Doses des traitements in vitro du stade larvaire trois	70
Tableau 6. Doses des traitements in vitro du stade larvaire cinq	70
Tableau 7. Doses des traitements in vivo du stade larvaire trois	71
Tableau 8. Doses des traitements in vivo du stade larvaire cinq	71
Tableau 9. Hauteur (en mètre) des nids d'hiver de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	77
Tableau 10. Densité des nids d'hiver dans les quatre stations d'étude	78
Tableau 11. Biométrie et poids des nids d'hiver de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> récoltés dans la station 1 (forêt naturelle du mont Doui)	79
Tableau 12. Biométrie et poids des nids d'hiver de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> récoltés dans la station 2 (forêt naturelle de Temoulgha)	80
Tableau 13. Biométrie et poids des nids d'hiver de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> récoltés dans la station 3 (reboisement de Babor).....	80
Tableau 14. Biométrie et poids des nids d'hiver de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> récoltés dans la station 4 (reboisement de Temoulgha)	81
Tableau 15. Nombre de chenilles processionnaires récupérées des nids d'hiver.....	81
Tableau 16. Période de descente des chenilles pour la nymphose dans les quatre stations	85
Tableau 17. Disposition des manchons en fonction de la hauteur des arbres	93
Tableau 18. Nombre total des œufs par manchon dans les quatre stations d'étude.....	94
Tableau 19. Nombre des œufs éclos dénombré dans les quatre stations d'étude.....	95
Tableau 20. Nombre des œufs non éclos noté dans les quatre stations d'étude.....	96
Tableau 21 . Nombre des œufs parasités dans les quatre stations d'étude.....	97
Tableau 22. Pourcentages des œufs éclos, non éclos et parasités dans les quatre stations d'étude.....	98
Tableau 23. Biométrie des manchons dans les quatre stations d'étude	99
Tableau 24. Nombre de ligne d'œufs par manchon	100
Tableau 25. Pourcentage moyen des supports de pontes	100
Tableau 26. Mensuration des chenilles processionnaires de la nymphose	102
Tableau 27. Résultats du conditionnement des chenilles de nymphose.....	102
Tableau 28. Taux de papillons issus des chrysalides	103
Tableau 29. Biométrie des imagos mâles et femelles	106
Tableau 30. Analyse de variance sur l'effet des huiles essentielles de deux plantes <i>T. vulgaris</i> et <i>L. angustifolia</i> contre les larves de la chenille processionnaire du pin au laboratoire	107
Tableau 31. Effet de différentes concentrations des huiles essentielles de deux plantes <i>T. vulgaris</i> et <i>L. angustifolia</i> contre les larves de stade 3 de la chenille processionnaire au laboratoire.....	107
Tableau 32. Effet de différentes concentrations des huiles essentielles de deux plantes <i>T. vulgaris</i> et <i>L. angustifolia</i> contre les larves de stade 5 de la chenille processionnaire au laboratoire.....	108
Tableau 33. Analyse de variance sur l'effet des huiles essentielles de deux plantes <i>T. vulgaris</i> et <i>L. angustifolia</i> contre les larves de la chenille processionnaire au terrain	110
Tableau 34. Effet de différentes concentrations des huiles essentielles de deux plantes <i>T. vulgaris</i> et <i>L. angustifolia</i> contre les larves de stade 3 de la chenille processionnaire au terrain	110

Tableau 35. Effet de différentes concentrations des huiles essentielles de deux plantes <i>T. vulgaris</i> et <i>L. angustifolia</i> contre les larves de stade 5 de la chenille processionnaire au terrain	111
Tableau 36. Période d’envol des papillons mâles de la chenille processionnaire du pin.....	118
Tableau 37. Moyenne de capture des papillons mâles de la chenille processionnaire du pin	118

Introduction

Introduction

La forêt est une ressource naturelle importante, et un espace de biodiversité écologique, une richesse économique et un produit social et culturel (ASSMAA *et al.*, 2011). La forêt est en mesure d'assurer les fonctions de protection et de conservation que l'on attend d'elle à condition qu'elle soit dans son état naturel et dans de bonnes conditions écologiques, elle assure d'importantes fonctions écologiques et protectrices, telle que la protection des ressources en eau, par l'augmentation de l'infiltration et la rétention de l'eau (GOTTLE et SENE, 1997 ; VERCHOT *et al.*, 2007). Elle participe à la protection du sol contre l'érosion, le couvert forestier ralentit le vent (VILES, 1990 ; GOTTLE et SENE, 1997 ; SIDLE *et al.*, 2006 ; GARRITY *et al.*, 2010) et les inondations (GILL *et al.*, 2007).

Au plan socio-économique, les forêts, en particulier les forêts périurbaines, jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement en bois de chauffe et en charbon de bois des grandes villes d'Afrique Centrale (MARIEN, 2008). Dans les pays en développement, le bois de chauffage, le charbon de bois et les résidus agricoles sont les principales sources d'énergies pour la majorité de la population (ARUNA, 2011). Dans la sous-région des pays des Grands Lacs, le bois représente plus de 97 % du bilan énergétique (MEM, 2011). La demande mondiale des bois tropicaux a sensiblement augmenté au cours des dernières décennies (PANAYOTOU et ASHTON, 1992), cette demande est due à l'expansion démographique et à l'accélération du développement économique. En 1980, les revenus de l'exportation de bois tropicaux ont atteint environ 8,7 milliards de dollars (BRAZIER, 1982). Cependant, en 1985, la valeur totale des produits du bois exporté était de quelque 50 milliards de dollars (WRI, 1988).

En dehors du bois, il existe d'autres produits, dans les forêts dont les communautés rurales peuvent tirer profits, notamment, les produits forestiers non ligneux, ils constituent pour eux, une source importante de revenus, d'aliments et de médicaments (EZEBILO et MATTSSON., 2010), l'utilisation de ces produits pour le soin et la nourriture dans les pays en développement a atteint 80% (ALLABI *et al.*, 2011).

En Algérie, le patrimoine national des forêts et des maquis, couvre une superficie globale d'environ 4,2 millions d'hectares, soit 1,8% de la superficie totale du pays, la superficie totale des essences forestières est de l'ordre de 1.604.466 ha (ONS, 2015). Le taux de boisement est de 16,4 % pour le nord de l'Algérie et de 1,7 % seulement si les régions sahariennes arides sont également prises en considération (ONS, 2015). Le pin d'Alep, est une espèce largement répandue dans le bassin méditerranéen (NAHAL, 1962), il est largement répandu en Algérie dans les massifs montagneux, du littoral jusqu'à l'Atlas

Saharien (KADIK, 1983). C'est l'essence la plus prédominante, elle occupe 63% des forêts (ONS, 2015). Elle se rencontre principalement dans les zones semi-arides (SAFAR, 1994 ; ONS, 2015). La capacité de production du bois du pin d'Alep en Algérie, ne dépasse pas 200.000 m³, soit 15% des besoins du pays et ceci implique que le pays a recours aux importations pour couvrir ses besoins (1.300.000 m³), en 2020, on peut estimer que les besoins atteindront 2.500.000 m³ (MEZALI, 2003).

En Algérie, le pin d'Alep joue un rôle dans la protection des bassins versants et dans la lutte contre la désertification, c'est le cas du barrage vert, où il a été choisi comme essence de première importance dans les compagnes de reboisement (BENSOUIAH, 2004). Il est aussi utilisé en bois de mine, et également en traverses ou poteaux de lignes (après injection) (POLGE, 1992). Le bois du pin d'Alep est souvent gorgé de résine, ce qui permet de l'utiliser dans l'industrie papetière et pour en faire des vernis, des savons ainsi que des lubrifiants et graisses pour voitures (POLGE, 1992). D'autres emplois dans la petite construction navale ont été mentionnés, aussi bien en Italie (GIORDANO, 1976) qu'en Tunisie (SELMi, 1976).

Dans les régions méditerranéennes, la chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermüller, 1775), est l'un des ravageurs des plus redoutables des pinèdes (DÉMOLIN et DELMAS, 1967 ; DAJOZ, 1998 ; BONNET *et al.*, 2008). Cet insecte est connu depuis longtemps dans la région méditerranéenne, par ses épidémies spectaculaires (MATTHIOLI, 1568), ses poils urticants qui présentent un risque sanitaire contre l'homme et les animaux (DÉMOLIN, 1963 ; DÉMOLIN, 1969a).

Le réchauffement climatique a permis une extension de son aire de répartition vers des latitudes et altitudes plus élevées (BATTISTI *et al.*, 2005 ; ROBINET *et al.*, 2007). La limite sud de son extension en Algérie est le Barrage-Vert (ZAMOUM., 1998 ; MARTIN *et al.*, 2009), dont il est le principal défoliateur, le taux d'infestation atteint 5.900 ha dans la région de Djelfa (DGF, 2015). La processionnaire du pin provoque d'énormes défoliations, qui entraînent une fragilisation des arbres et un ralentissement de leur croissance, ce qui les rendent vulnérable aux attaques d'autres insectes xylophages ainsi qu'aux stress hydriques et thermiques, de plus ils s'affaiblissent face aux différents agents pathogènes (BACHIR, 2019).

Une étude menée en France montre l'effet de la défoliation par la processionnaire de pin variant de 25% à 100% sur la croissance du pin maritime dans les peuplements purs de 3 à 40 ans (JACQUET *et al.*, 2012), d'autre sur le même prédateur montrent un taux de défoliation qui oscille de 20% à 80% (MARKALAS, 1989 ; BARRENTO, *et al.*, 2008 ; PESTAÑA et SANTOLAMAZZA-CARBONE, 2010).

La valorisation et l'utilisation des alternatives phytosanitaire pour parer aux attaques de la processionnaire du pin est très ancienne (CALAS, 1897). Plusieurs recherches ont été menée depuis les années cinquante jusqu'à présent, pour développer des méthodes de lutttes biologiques ou mécaniques respectueuses de l'environnement. Parmi ces études nous citons celle de VAGO (1958) sur l'utilisation d'une virose intestinale, de GRISON *et al.* (1959) sur un premier essai de lutte par pulvérisation du virus spécifique *Smithiavirus pityocampae*, de MAHIEU (1970) sur l'utilisation de tir au fusil pour détruire les nids, de BREUER et DEVKOTA (1990) sur l'utilisation de l'extrait de *Melia azedarach*.

En Algérie, la processionnaire de pin a fait l'objet de plusieurs travaux. Parmi ces études nous citons celles de ZAMOUM, (1987), BERTELLA (1987), KHEMICI *et al.* (1988), ZAMOUM (1998) et de ZAMOUM et DÉMOLIN (2003) qui ont travaillé sur les facteurs bioécologiques et le cycle de vie de la chenille processionnaire. Ajoutant à ces travaux d'autres approches qui ont porté sur quelques parasitoïdes et ennemis naturels de la chenille processionnaire du pin (ZAMOUM, 1992 ; ZAMOUM et DÉMOLIN, 2000). ZAMOUM *et al.* (2005), CHENCHOUNI *et al.* (2010) ont travaillé sur le piégeage des mâles par l'utilisation des phéromones sexuelles comme indicateur de surveillance des imagos de *T. pityocampa*. BACHIR *et al.* (2017), ZAMOUM *et al.* (1997, 1999, 2006, 2016) et ZAMOUM et DÉMOLIN (2004) ont mené des études portées sur les mécanismes de régulation des populations de la chenille processionnaire et les méthodes de lutte à mettre en œuvre contre ce ravageur de pin d'Alep.

Le présent travail est réalisé pour la première fois dans la région d'Ain Defla, où nous avons choisi quatre stations peuplées du pin d'Alep, dont deux reboisements et deux forêts naturelles. L'objectif de cette étude est de suivre l'évolution des populations de la chenille processionnaire *Thaumetopoea pityocampa* sur le Pin d'Alep, de caractériser ses différents stades de développement depuis la ponte jusqu'à l'envol des adultes. Le suivi mené sur cet insecte ravageur au cours de cette étude a porté d'abord sur les nids d'hiver de cette chenille (effectifs, densités, orientations, biométries). Par la suite la biométrie des chenilles partant en procession de nymphose après leurs piégeages a été mesurée, après les chenilles piégées sont conditionnées afin de déterminer le taux des chenilles n'arrivant pas à se transformer en chrysalides, celui des chrysalides parasitées et des chrysalides intactes. Puis les paramètres des pontes ont été prélevés (orientation, hauteur, nombre d'œuf éclos, non éclos et parasités, biométrie des manchons). Enfin l'effectif et la biométrie des adultes ont été enregistrés. Nous avons aussi procédé aux tests d'efficacité des huiles essentielles extraites de deux plantes bio-insecticides appartenant à la famille de lamiacée *Thymus vulgaris* (Linné, 1753) et *Lavandula*

angustifolia (Miller, 1765) sur les larves de la chenille processionnaire du pin (L3 et L5) *in vivo* et *in vitro*. L'identification des compositions chimiques des huiles essentielles de ces deux plantes ont été démontrées, ainsi que l'impact de ces deux bio-insecticides sur les tissus de la chenille processionnaire du pin. Afin de suivre l'émergence des adultes mâles nous avons installé des pièges à phéromone dont leur efficacité à réduire la population des mâles accoupleurs est importante.

Le travail que nous présentons dans ce qui va suivre s'articule sur cinq chapitres. Le premier chapitre englobe une revue bibliographique sur la biologie, l'écologie et les moyens de lutte contre la chenille processionnaire du pin. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté et développé les caractéristiques géographiques, édaphiques, météorologiques, ainsi que le patrimoine floristique de la région d'étude. Le troisième chapitre renferme la méthodologie adoptée *in vivo* et *in vitro*, en commençant par les choix des stations, le modèle biologique, les différentes techniques adoptées et les méthodes d'exploitations des résultats. Les différents résultats obtenus sont exposés dans le quatrième chapitre, suivi par les discussions dans le cinquième chapitre. Enfin une conclusion générale assortie de perspectives clôture cette étude.

Chapitre 1

Chapitre 1 : Revue bibliographique sur la chenille processionnaire du pin

1.1. Systématique et description de la chenille processionnaire du pin

1.1.1. Systématique de la chenille processionnaire

La chenille processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa*, appartient à la classe des Insectes, l'ordre des Lépidoptères, la famille des Notodontidae, la sous-famille des Thaumetopoeinae (DAJOZ, 2002), au genre *Thaumetopoea* et l'espèce *T. pityocampa*. En latin, pityocampa signifie « chenille du pin » (campa = chenille, pityo = pin) et Thaumetopoea signifie « qui vénère la verdure » (thaumeto = vénérer, poea = herbe).

Le genre *Thaumetopoea* comprend 9 espèces, il s'agit de : *T. pityocampa* (Shiff.), *T. solitaria* (Freyer), *T. processionea* (Linneo), *T. bonjeani* (Powell), *T. pinivora* (Treitschke), *T. herculeana* (Rambur), *T. jordana* (Staudinger), *T. wilkinsoni* (Tams.), *T. cheela* (Moore), (AGENJO, 1941 ; EL YOUSFI, 1989 ; RIVIERE, 2011 ; BACHIR *et al.*, 2017). Elles coexistent localement et sont parfois difficiles à distinguer. Toutefois, il existe certaines différences telles : trophiques (plante hôte), comportementales, morphologiques (intensité de la couleur des ailes), biologiques (notamment en ce qui concerne les plantes hôtes et la date d'éclosion) (RIVIERE, 2011). On peut aussi distinguer les processionnaires d'été, comme *T. bonjeani* (Powell), *T. pinivora* (Treitschke) et *T. processionea*, qui ont un développement larvaire allant du début du printemps jusqu'au début de l'été, des processionnaires d'hiver, citons *T. pityocampa* (Den. & Shiff.) et *T. wilkinsoni* (Tams.), qui sont caractérisées par un développement larvaire qui s'étend de la fin de l'été jusqu'au début du printemps (DÉMOLIN *et al.*, 1994).

1.1.2. Description de la chenille processionnaire

La processionnaire du pin doit son nom au mode de déplacement en file indienne des chenilles (BONNET *et al.*, 2008), ils vivent en groupe contrairement à la plupart des autres Lépidoptères (GROJEAN *et al.*, 2006), ce sont des insectes sub-sociaux, qui ont la particularité d'avoir un comportement grégaire durant toute leur vie (DÉMOLIN, 1965). Selon la classification et les caractéristiques des groupements sociaux chez les invertébrés (LE MASNE, 1952), *T. pityocampa*, fait partie des groupements coordonnés simples (ZAMOUM, 1998). Ces groupes sont qualifiés de groupements organisés ou sociétés inférieures et ils sont caractérisés par la coordination des activités individuelles en une activité collective qui se manifeste par la construction d'un nid (GROJEAN *et al.*, 2006).

Le cycle de vie de la processionnaire est généralement annuel mais peut s'étendre sur plusieurs années selon les conditions du milieu, montrant une forte variabilité de la phénologie de l'espèce en fonction de la latitude et de l'altitude (DÉMOLIN, 1974).

1.1.2.1. Description des adultes

Les imagos sont des papillons nocturnes, ils présentent un dimorphisme sexuel très marqué, les femelles sont plus grandes que les mâles, avec une couleur jaune-beige de l'abdomen, les mâles présentent une couleur grise en dessus des ailes (HERBULOT, 1958 ; ZAMOUM, 1998). Les femelles déposent leurs œufs autour de deux aiguilles sous forme de manchons sur les espèces de genre *Pinus* (DÉMOLIN, 1986).

1.1.2.2. Description des larves

Les chenilles évoluent en cinq stades larvaires, elles sont grégaires et maintiennent la cohésion de la colonie par communication tactile (ZAMOUM, 1998). Après la seconde mue, les chenilles, présentent leur aspect définitif, elles sont de couleur brun-roux et des soies latérales blanches (DÉMOLIN, 1969b ; ZAMOUM, 1998).

1.2. Cycle de développement

1.2.1. La phase aérienne

1.2.1.1. La phase adulte

Les papillons de la processionnaire du pin sont crépusculaires et leur période de vol, citée par DÉMOLIN en 1969, s'étale entre la fin du mois de juin et la fin du mois d'août. Les femelles déposent leurs œufs sous forme d'un manchon recouvert d'écailles argentées autour de deux aiguilles du pin à l'extrémité d'un rameau (GRISON *et al.*, 1959).

Après un vol de quelques heures, les mâles attirés par les effluves sexuels vont à la recherche de leur future partenaire, puis s'accoupler. Après l'accouplement, les femelles, jusque-là inactives, se dirigent en vol vers les arbres se découpant en silhouette, et montrent ainsi une attirance très nette vers les arbres isolés ou de crêtes. La femelle gravide sélectionne les arbres hôtes selon le diamètre et la structure des aiguilles ou des rameaux rencontrés, elle choisit en priorité les aiguilles du pin noir et ne porte son intérêt pour les autres espèces qu'en cas d'indisponibilité de celui-ci (DÉMOLIN, 1963).

Ainsi à la recherche du végétal le plus favorable à la ponte, la femelle pourra parcourir plusieurs kilomètres, elle n'abandonnera ses œufs sur d'autres essences que le pin, qu'en ultime recours. Ce qui implique que, plus la plantation est mélangée ou les pins y sont

dispersés plus les foyers d'infestation diminuent, inversement, les foyers des pontes seront importants dans une population homogène de pins (DÉMOLIN, 1968).

1.2.1.2. La ponte

En général, les adultes, papillons nocturnes, émergent au cours de l'été, les femelles peuvent parcourir quelques kilomètres à la recherche d'un hôte qui leur convienne (DSF, 2011). La femelle dépose tous ses œufs, en une seule fois, en manchon autour de deux ou plusieurs aiguilles du pin, et plus rarement sur des rameaux (Pin d'Alep et cèdres). Les œufs sont recouverts, dès l'émission, d'écailles beige-clair qui donnent à la ponte une homochromie étonnante avec les bourgeons du pin (DÉMOLIN, 1968) (Fig. 1).

Le nombre d'œufs par ponte est représentatif des réserves accumulées pendant l'évolution larvaire : de 70 dans le cas d'une population éprouvée, il peut approcher 300 lorsque la potentialité dynamique de la population devient particulièrement élevée (DÉMOLIN, 1968 ; DAJOZ, 2000).



(Originale)

Figure 1 : Ponte de la processionnaire sur deux aiguilles (Manchon 1), ponte de la processionnaire sur un rameau (Manchon 2)

1.2.1.3. La phase larvaire

L'éclosion des jeunes chenilles se produit un mois plus tard environ. Elles dévorent d'abord l'épiderme des jeunes aiguilles situées au voisinage de la ponte, puis étendent leur activité à des bouquets d'aiguilles situées à quelque distance (GRISON *et al.*, 1959). L'évolution larvaire chez la processionnaire s'effectue comme pour de nombreux lépidoptères en cinq stades larvaires, généralement symbolisés par les sigles L1, L2, L3, L4, L5 (HUCHON et DÉMOLIN, 1970). Ces derniers sont séparés entre eux par une mue ou

changement de peau des chenilles, les jeunes colonies peuvent s'établir dans cinq ou six emplacements différents qui se reconnaissent à l'aspect roussi du feuillage. Au cours de ces stades, elles ne tissent pas un nid et ne sont protégées que par un tissage assez lâche de fils de soie. Le nid devient plus épais au cours du 3^{ème} stade larvaire (GRISON *et al.*, 1959), la durée moyenne de chaque stade larvaire est comme suit : pour le L1 entre 8 à 12 jour, L2 : 12 à 18 jour, L3 : 30 à 60 jour et pour L4 et L5 entre 30 à 60 jour, selon les conditions climatiques, les deux derniers stades peuvent avoir une grande variation dans la durée de développement (DÉMOLIN, 1969b ; MONTOYA, 1981). La durée des stades larvaires est bien entendu dépendante du climat, plus l'hiver sera de longue durée, plus la vitesse d'évolution est diminuée principalement au quatrième stade (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

En Algérie, la fluctuation moyenne de période de développement est liée à l'altitude, elle s'étale sur 10 mois, à partir d'août-septembre jusqu'en avril-mai pour les populations d'altitude et sur 6 mois, d'octobre-novembre jusqu'à fin janvier début de mars, pour les populations du littoral (KHEMICI *et al.*, 1988).

Sous l'aspect éthologique, on peut la diviser en deux périodes : la période ambulatoire allant de l'éclosion aux premiers froids, et la période du nid d'hiver durant laquelle la colonie reste à emplacement fixe jusqu'à la maturité des chenilles (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

1.2.1.3.1. Période ambulatoire

Généralement en septembre, de 30 à 45 jours après la ponte, les jeunes chenilles L1, sortent des œufs et tissent sur les écailles du manchon un léger réseau de soie. Elles marquent alors l'une pour l'autre une attraction très nette qui se maintiendra par des échanges tactiles répétés, jusqu'à la période pré-nymphale (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

Dès l'éclosion, les chenilles d'une même colonie ne se quitteront plus. Tant que la température extérieure reste suffisante (20 °C en moyenne), la colonie change d'emplacement fréquemment, dévorant toutes les feuilles entourant les lieux de rassemblement. Le signal des migrations successives, lié tout d'abord au manque de nourriture, va progressivement être donné par la baisse de température automnale ; les déplacements s'effectuent alors vers le soleil, la colonie recherche l'emplacement le mieux situé pour échafauder le nid d'hiver qui lui permettra de continuer son évolution à rythme accéléré. Les chenilles laissent la trace de leurs tentatives infructueuses par la présence de légers tissages ou pré-nids, puis c'est le choix de l'emplacement définitif (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

1.2.1.3.2. Le nid d'hiver

Dès l'arrivée des premiers froids, la colonie entreprend le tissage d'un nid d'hiver qui lui permet de résister aux basses températures (DÉMOLIN, 1965). Lorsque les chenilles ont choisi l'emplacement définitif de la construction du nid, elles l'architecturent de façon coordonnée et l'entretiennent régulièrement. La colonie ne quitte son habitacle que la nuit si la température est supérieure à 0 °C, pour aller se nourrir et s'activer au tissage. Elle profite ainsi au maximum de l'insolation journalière pour digérer dans le nid leur ample moisson nocturne (HUCHON et DÉMOLIN, 1970). En effet, ce nid joue le rôle d'un radiateur en captant les rayons du soleil pour augmenter sa température interne. La nuit, lorsque la température dépasse 0 °C, les chenilles quittent le nid pour s'alimenter (HOCH *et al.*, 2009).

Si l'insolation compense la baisse de température journalière, les prises alimentaires ne s'arrêtent pratiquement pas pendant l'hiver. L'alimentation est utilisée à la sécrétion permanente de soie pour l'entretien du nid, sinon à la mise en place des réserves nécessaires au franchissement des mues (HUCHON et DÉMOLIN, 1970). C'est ainsi que, par le soleil et l'intermédiaire du nid, les chenilles passeront au quatrième, puis au cinquième stade larvaire, ne marquant que de faibles arrêts de développement pendant les périodes de faible insolation ou de froid trop rigoureux (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

1.2.1.3.3. Les processions

Si l'arrière-saison est suffisamment chaude et ensoleillée, il est possible que les chenilles terminent leur évolution larvaire dès l'entrée de l'hiver. Cependant, en règle générale, c'est depuis la fin janvier jusqu'au mois de juin, suivant les dates d'émergence des adultes et en fonction de la rigueur de l'hiver, que les chenilles parviennent à maturité. Elles quittent alors le nid pour se rendre en procession jusqu'au sol. Ce déplacement à la queue-leu-leu, lié à une somme considérable de mécanismes sociaux, conduit la colonie entière dans les zones les plus éclairées du biotope où aura lieu l'enfouissement (DÉMOLIN *et al.*, 1996).

Les déplacements au sol n'ont lieu que lorsque la température est comprise entre 10 et 20 °C. En-dessous de 10 °C, les chenilles se regroupent en surface. Au-dessus de 20-22 °C, elles s'enterrent et cela d'autant plus profondément que la température est élevée. Si à l'époque des processions, le climat est particulièrement chaud, les chenilles pourront s'enterrer en bordure des clairières et même en sous-bois (DÉMOLIN *et al.*, 1996).

1.2.2. La phase souterraine

1.2.2.1. La nymphose

Après l'enfouissement, la chenille tisse un cocon de nymphose autour d'elle et se transforme en chrysalide (DÉMOLIN, 1974). La nymphose apparaît une quinzaine de jours après l'enfouissement. La chrysalide sera complètement formée quelques jours plus tard, elle subit alors un arrêt de développement qui est pratiquement indépendant des facteurs extérieurs : c'est la diapause (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

1.2.2.2. La diapause

La durée de la diapause est variable ; elle est en fait le complément exact de la durée totale d'évolution nécessaire pour assurer le maintien du rythme annuel. Ce qui implique que, plus la durée d'évolution est courte (région à hivers chauds), plus la diapause sera longue et inversement (DÉMOLIN, 1969a). La durée de diapause est d'environ 4 mois, mais elle peut se prolonger dans le cas de conditions défavorables (DÉMOLIN, 1974).

À la fin de la période de diapause, il y a une reprise d'activité métabolique intense, l'adulte commence sa formation. Un mois plus tard, il sera prêt à sortir de terre. Il peut cependant arriver qu'après la fin de la période de diapause, la température étant insuffisante (ou trop élevée) pour assurer la reprise d'activité métabolique ; la chrysalide est alors en quiescence. Dans ce cas, la sortie de l'adulte pourra être non seulement retardée, mais le ralentissement pourra purement et simplement replacer l'organisme en diapause pour une durée d'une ou plusieurs années (DÉMOLIN, 1969a).

1.2.2.3. Calage du cycle

Par adaptation progressive sur l'ensemble d'une population, la date d'émergence des adultes tendra à se situer à l'époque la plus favorable pour qu'il y ait survie de la descendance. Cette date est maintenue par la diapause qui assure le rythme annuel précis. La date de reprise du développement après la période de diapause est donc représentative du climat moyen des années écoulées, et doit rester théoriquement stable, c'est cette date que nous appelons la date de calage du cycle (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

D'année en année, il est évident que le climat ne reste pas stable autour de la moyenne, la processionnaire va tendre, en cas de fortes fluctuations, à modifier dans les meilleures conditions les dates de calage, en jouant avec le processus régulateur, assurant la stabilité cyclique : la diapause. Dans le cas où l'hiver se prolonge de façon anormale, l'évolution

larvaire peut être ralentie de façon telle qu'il serait impossible aux adultes de sortir à la date requise même si la diapause est de durée nulle (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

1.3. Bio-écologie de la chenille processionnaire du pin

L'étude de la bio-écologie des chenilles processionnaires du pin permet de considérer les zones et les périodes à risque pour la flore, éléments indispensables pour le choix d'un plan de lutte efficace.

1.3.1. Grands traits de la biologie de la processionnaire

Le cycle de développement de la processionnaire du pin est très variable selon le type de climat et l'altitude considérée. Tous les pins et même les cèdres peuvent être victimes de leurs ravages. Si le hasard des mélanges d'essences le lui permet, on constate que ce ravageur a une préférence marquée pour le Pin laricio (*Pinus nigra* Arn.) et plus spécialement pour la sous-espèce nigricans, le Pin noir d'Autriche, ensuite, viennent dans l'ordre décroissant de sélection : le Pin maritime, le Pin sylvestre, le Pin d'Alep, et enfin les cèdres (HUCHON et DÉMOLIN, 1970)

Dans les conditions les plus favorables, le cycle de développement d'une génération se boucle en un an (cycle annuel). Parfois il peut s'étendre sur plusieurs années (cycles pluriannuels). Le cycle comprend deux phases à deux strates différentes de l'écosystème : l'une aérienne sur le pin (évolution larvaire en cinq stades), l'autre souterraine (prénymphose et nymphose) (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

1.3.2. Rôle de la biodiversité

La biodiversité est la diversité naturelle des organismes vivants. Elle s'apprécie en considérant la diversité des écosystèmes, des espèces, des populations et des gènes dans l'espace et dans le temps (DULAURENT, 2010). Cependant, les dégâts causés par les insectes herbivores sont importants dans les peuplements forestiers de monoculture contrairement aux peuplements où cette essence est associée à d'autres espèces d'arbres (JACTEL et BROCKERHOFF, 2007).

Le mélange d'essences peut également jouer un rôle de barrière physique, quand la plante hôte est physiquement cachée par d'autres plantes, ce fait intervient à la dispersion de l'insecte herbivore (WATT, 1992), en effet, la présence d'une culture intercalaire peut être très efficace pour réduire les épidémies de ravageurs (FLOATER et ZALUCKI, 2000).

Les insectes qui repèrent leur hôte par certains composés volatiles, sont chimiquement confondu par d'autres composés émis par d'autres essences non hôtes (VISSER, 1986). De ce fait, dans les peuplements mixtes, les émissions olfactives sont plus complexes que dans les peuplements purs, entraînant une difficulté de repérage de l'essence hôte par un insecte herbivore. Les substances volatiles émises par les plantes, jouent un rôle dans le processus de sélection d'hôtes des femelles de *T. pityocampa* (TIBERI, 1999 ; ZHANG *et al.*, 2001).

RUSSEL (1989), suggère que la diversité des essences végétales peut favoriser les ennemis naturels en leur apportant un abri, des sites d'oviposition ou d'hibernation, des hôtes ou proies alternatifs. Cette diversité végétale, pourrait engendrer une augmentation de la proportion de certains prédateurs ou parasitoïdes (SIEMANN *et al.*, 1998).

Les communautés de plantes les plus riches en espèces offrent des micro-habitats et microclimats différents (PORTE *et al.*, 2004), offrant ainsi plus de possibilités d'abris aux ennemis naturels pour résister aux conditions défavorables (DULAURENT, 2010).

La diversité des essences forestières pourrait permettre de diminuer les niveaux d'infestation de la processionnaire du pin dans certaines conditions. En effet, la présence d'une haie de feuillus en bordure d'un peuplement du pin maritime permet de réduire significativement le nombre de nids de processionnaire. De même, la présence d'une ripisylve de feuillus dans un rayon de 700 mètres autour d'une parcelle du pin maritime s'accompagne d'une diminution des niveaux de population de la processionnaire (DULAURENT, 2010). Mêmes résultats obtenus dans les peuplements du pin noir mélangés avec une essence non hôte, l'invasion de la processionnaire en est affaiblie, comparativement aux peuplements purs (GERI, 1980). On peut noter qu'il y a une relation positive entre la proportion d'essences non hôtes et l'ampleur de la réduction des infestations de la processionnaire du pin (DULAURENT, 2010).

1.3.3. Plante hôte

En Algérie, l'espèce forestière la plus dominante est le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). Ce pin fut décrit pour la première fois par DUHAMEL, en 1755, sous le nom de *Pinus hierosolimitana* (*P. hierosolimitana* Duham., 1755). MILLER l'a redécrit plus tard, en 1768, sous le nom de *Pinus halepensis* (*Pinus halepensis* Mill., 1768) (NAHAL, 1964).

Le genre *Pinus*, appartenant à la famille des Pinacées (Abiétacées), est divisé en trois sous-genres qui sont *Pinus*, *Ducampopinus* et *CembraPinus*. Ces sous-genres sont divisés en sections. L'espèce *Pinus halepensis* (Fig. 2), fait partie de la section Halepensoïdes qui est

divisée en trois groupes parmi lesquels le groupe halepensis qui se caractérise par des feuilles à deux aiguilles et à cônes caducs (NAHAL, 1962 ; KADIK, 2006).



(Originale)

Figure 2 : Pin d'Alep de la région d'Ain Defla

C'est une espèce forestière rustique, très présente dans la plupart des variantes bioclimatiques du bassin méditerranéen (PARDÉ, 1957 ; QUÉZEL, 1986 ; MEZALI, 2003), il se caractérise par une plasticité exceptionnelle (QUÉZEL, 1986). C'est l'une des essences méditerranéennes qui possède l'amplitude écologique la plus vaste (NAHAL, 1962). Il est considéré comme l'un des pins les plus tolérants à la température et la sécheresse prononcées (SCARASCIA-MUGNOZZA, 1986). Même si c'est entre 350 et 700 mm de précipitation annuelle que l'espèce présente son développement maximal (QUÉZEL, 1980), la pluviométrie ne semble pas être un facteur déterminant de sa répartition puisqu'elle pousse dans des zones où les précipitations annuelles sont comprises entre 200 et 1500 mm (RATHGEBER, 2002).

La systématique du pin d'Alep établie par FARJON (1996) se résume comme suit :

Règne : Plantae

Embranchement : Spermaphyta

Sous-embranchement : Gymnospermae

Classe : Pinopsida

Ordre : Abietales

Famille : Pinaceae (Abietaceae)

Sous-famille : Pinoïdeae

Genre : *Pinus*

Sous-genre : *Eupinus*

Espèce : *Pinus halepensis* Mill.

Noms usuels : Pin d'Alep en français, et Aleppo pine en anglais.

1.3.4. Incidence de facteurs écologiques

La durée du développement de la chenille varie en fonction de l'ensoleillement (la photopériode), de la température (amplitude thermique), de l'altitude et de la latitude.

1.3.4.1. Ensoleillement et photopériode

La chenille processionnaire du pin n'est présente que dans les régions où la durée moyenne d'insolation annuelle est supérieure à 1.800 heures (RIVIERE, 2011). La photopériode joue également un rôle prépondérant dans le cycle de *Thaumetopoea pityocampa*, en effet, lorsque la température dépasse 0 °C, les chenilles quittent le nid pour s'alimenter (HOCH *et al.*, 2009).

1.3.4.2. Température

Le social des chenilles processionnaires, renforcé par les émissions permanentes de soie, est le point fondamental de toute leur biologie. Il en résulte une adaptation microclimatique surprenante : atténuation des variations climatiques trop brutales par « effet de masse » et construction commune du nid d'hiver, véritable radiateur solaire qui sera utilisé pendant les périodes froides pour assurer, par le soleil, l'optimum thermique vital (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

Le seuil critique inférieur de la température, pour un individu de chenille isolé, est de -7 °C, mais lorsque les chenilles sont assemblées en masse, il atteint -16°C, grâce à l'effet bénéfique du rassemblement des individus (HOCH *et al.*, 2009). Il existe cependant des seuils critiques de température à ne pas dépasser. En effet, une température excédant les 32 °C peut causer la mort de nombreux individus ou faciliter l'installation de maladies épidémiques sur les œufs ou les larves. L'optimum de développement se situe entre 20 et 25 °C, ce qui explique le développement hivernal de *Thaumetopoea pityocampa*. Lorsque la température moyenne

mensuelle dépasse 25 °C, les individus se regroupent en masse afin de ralentir la montée thermique de chaque individu (RIVIERE, 2011).

La disponibilité d'une température convenable est nécessaire pour l'alimentation des chenilles, la température de journée doit être supérieure à 9 °C dans le nid, accompagné avec une température de l'air supérieure à 0 °C dans la nuit suivante (BATTISTI *et al.*, 2005). Si l'une de ces deux températures n'est pas assurée, les chenilles ne sortent pas s'alimenter, cela se traduit par une diminution de leur taux de survie (BUFFO *et al.*, 2007).

1.3.4.3. Altitude et latitude

La chenille opère des ajustements temporels de sa phénologie grâce à un arrêt de développement au stade nymphal de type diapause (DÉMOLIN, 1969a), ou bien par le ralentissement de l'évolution larvaire (HUCHON et DÉMOLIN, 1970). La prolongation de la diapause peut atteindre une ou deux années, en cas d'aléas climatiques (DÉMOLIN, 1969b ; DÉMOLIN, 1974). Une telle particularité permet à l'insecte de débiter son cycle à la date climatique optimale pour assurer la survie de sa descendance (ZAMOUM, 1998).

De plus, une étude de PIMENTEL *et al.* (2010) a révélé que les lots d'œufs des populations de papillons processionnaires du pin suivent une tendance latitudinale générale, car ils contiennent de nombreux petits œufs, dans les zones où ils sont exposés à des hivers froids, et moins d'œufs de plus grosse taille, dans des conditions environnementales plus douces (RIVIERE, 2011).

La survie de la descendance serait assurée par une forte ponte en haute altitude ou latitude (Plus on monte en altitude plus il fait froid, de même que lorsque on se dirige vers les hautes latitudes). Donc la fertilité de la chenille augmenterait avec ces deux paramètres. Cette variation de fécondité peut ainsi être due à la spécificité d'hôte, à la latitude et à la moyenne des températures hivernales (PIMENTEL *et al.*, 2010). La taille des colonies est un autre paramètre qui participe dans les processus de thermorégulation, avec un gain de température dans les colonies de grande taille (taille du nid plus importante) (RONNAS *et al.*, 2010).

1.3.5. Répartition géographique

La répartition géographique de la chenille processionnaire du pin dépend de plusieurs facteurs écologiques, dont certains étudiés précédemment : l'ensoleillement, la photopériode, la température, l'altitude et la latitude. C'est pourquoi certaines zones géographiques sont plus favorables que d'autres à ce développement (BATTISTI *et al.*, 2005).

Les facteurs climatiques (gel, chaleur...), la présence de prédateurs et parasites, ainsi que la quantité et la qualité des ressources alimentaires (qui conditionnent notamment la fécondité des femelles) participant ainsi aux importantes variations de niveaux de populations, appelées « gradations » (BOUDJAHÉM., 2020).

À l'échelle mondiale, les chenilles processionnaires du pin sont présentes sur plusieurs continents (VEGA *et al.*, 1999 ; DIAZ, 2005), mais aussi, elle a considérablement étendu son aire de répartition en Europe méridionale (MASUTTI et BATTISTI, 1990) à des latitudes et altitudes plus élevées au cours des trois dernières décennies, conséquence de la hausse des températures hivernales (BATTISTI *et al.*, 2005).

Elle est aussi retrouvée dans les pays méditerranéens, France, Grèce, Italie, Algérie, Albanie, Croatie, Liban, Maroc, Tunisie, Turquie du sud, Espagne, Portugal, Chypre, Hongrie, au nord de la Bulgarie, en Autriche, en Suisse et en Yougoslavie (MALAZGIRT, 1965 ; DÉMOLIN & RIVE, 1968 ; DEVKOTA et SCHMIDT, 1990 ; ZAMOUM, 1998 ; TURPIN, 2006).

En Algérie la pullulation de la chenille processionnaire a débuté surtout dans les années soixante-dix avec les grands efforts d'implantation du barrage vert. Les programmes des reboisements en monoculture, de l'espèce *Pinus halepensis*, ont entraîné une explosion démographique de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* mettant en péril les jeunes plantations en zones semi-arides KADIK (1987). Elle a envahi tous les pinèdes Algériennes (Fig. 3), de l'Atlas saharien, qui représente la bordure sud de son aires de distribution (MECHERI *et al.*, 2018), jusqu'au nord algérien, nous citons au centre, Blida, Tipaza (BOUCHOU, 2015), Bouira (SAHNOUNE et CHIBANE, 2018 ; MESSAOUDI, 2016), Alger et Djelfa (ZAMOUM, 1998), à l'Est, El Kala et Sétif (BOUCHOU, 2015), Bordj Bou Arreridj (ZIOUCHE *et al.*, 2017) et à l'Ouest du pays, Tlemcen (BOUTCHICHE et BOUTRIGUE, 2016), Tissemsilt et El Bayadh (BOUCHOU, 2015).

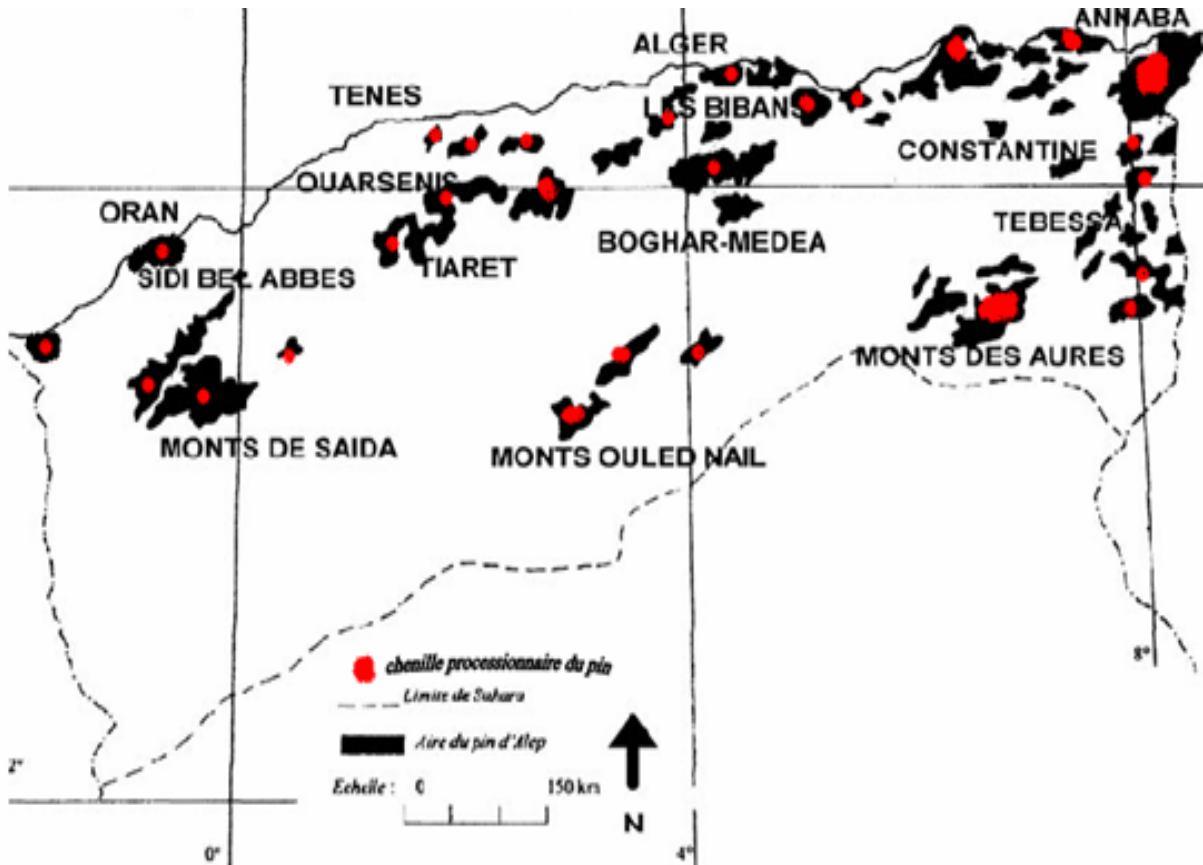


Figure 3 : Répartition du genre *Pinus* et la chenille processionnaire en Algérie (ZAMOUM, 1986)

1.4. Particularités urticantes

Les chenilles processionnaires du pin peuvent être pathogènes pour l'homme et les animaux. En effet, elles disposent de poils urticants pouvant provoquer des lésions non seulement par contact direct, mais aussi indirectement, par dissémination aérienne. Le terme «lépidoptérisme» rassemble l'ensemble des effets pathogènes liés au contact des papillons et des chenilles. Ainsi, le venin de la chenille est libéré dans la peau à partir d'un poil urticant fiché dans le derme. Différentes substances (histamine, molécules entraînant la libération d'histamine, ou activant le système des kinines, ou encore non identifiées) sont responsables du lépidoptérisme, principalement de la dermatite de contact (WERNO *et al.*, 2002).

1.4.1. Poils urticants et miroirs

Entre temps, dès le début du troisième stade larvaire (un mois et demi après l'éclosion), la « Fourrure » des chenilles s'enrichit sur la face dorsale de petites poches particulières ou « Miroirs » renfermant une infinité de dards empoisonnés : les poils urticants. A la moindre alerte, les « miroirs » sont ouverts et les harpons microscopiques libérés

assurent un barrage venimeux autour de la colonie (DÉMOLIN, 1964). Transportés par le plus faible courant d'air, ils vont, lors de fortes infestations, envahir toute la forêt. Ils provoquent chez l'homme et les animaux de nombreux troubles histaminiques limités habituellement à des rougeurs et à des démangeaisons pénibles. L'action des poils urticants peut se manifester par la formation d'œdèmes doublés de troubles oculaires voire même d'accidents respiratoires et de vertiges (DÉMOLIN, 1964).

1.4.2. Comportement de défense de la chenille processionnaire du pin

La chenille processionnaire du pin dispose de plusieurs mécanismes de défense. Lorsqu'un événement agresseur tel qu'un choc ou un souffle se produit sur des chenilles des premiers stades larvaires (stades L1 et L2) en groupe, celles-ci s'immobilisent (RIVIERE, 2011). Si les chenilles sont isolées, lors de la prise alimentaire par exemple, le stimulus entraîne le repli de chaque individu et le rassemblement de la colonie. Lorsque l'impact est plus violent, une nouvelle réaction s'ajoute à la précédente : chaque chenille relève les trois derniers segments abdominaux et crache devant elle une goutte de salive, non urticante (RIVIERE, 2011). Selon le même auteur, lorsque l'agression concerne des chenilles des derniers stades larvaires, elles présentent une interruption instantanée et complète de leurs activités ainsi qu'une ouverture globale des « miroirs ». En revanche, lors d'un contact direct avec une chenille processionnaire (si on la touche par exemple), celle-ci n'ouvre pas obligatoirement tous ses miroirs : elle secoue la tête, essaie de mordre et crache de la salive. La libération des poils urticants suite à l'ouverture des miroirs est une réaction de la colonie, lorsque l'agression est directe, les processionnaires du pin réagissent comme toutes les chenilles de Lépidoptère, par des jets de salives et des contorsions.

Lorsque la chenille est agressée, elle ouvre ses miroirs et libère ses poils dans l'air, ceux-ci peuvent être dispersés par le vent. Leur forme, en harpon, leur permet de bien s'accrocher dans l'épiderme de l'agresseur et provoquer des démangeaisons. Le frottement conduit à la rupture du poil qui libère une substance urticante (CHARMOT, 1987 ; BONNET *et al.*, 2008).

1.4.3. Substance urticante et physiopathologie

La glande urticante de la chenille, *Thaumetopoea pityocampa* est formée uniquement de cellules trichogènes. Ces cellules forment un amas irrégulier, qui semble être multicouche, bien qu'il n'y ait qu'une seule couche de cellules. Chaque cellule trichogène produit une protéine spécifique du poil urticant (*Thaumetopoeinae*) (NOVAK et LAMY, 1987).

Les poils urticants sont fermés aux deux extrémités. La libération de la protéine urticante ne peut donc être libérée que lors de la rupture du poil, lors d'un frottement ou d'un grattage par exemple (DUCOMBS *et al.*, 1981). La libération du Thaumetopoeinae dans les souris, provoque une augmentation de la perméabilité vasculaire (vasodilatation) et la dégranulation des mastocytes (WERNO *et al.*, 2002 ; BOURGEOIS, 2003). Ainsi, la structure chitineuse des poils pourrait intervenir dans le processus inflammatoire et immunologique (BATTISTI *et al.*, 2011).

Quatre voies de contact de ces poils sont définies : le contact cutané, le contact oculaire, l'inhalation et l'ingestion. Quel que soit le mode de la contamination, les poils urticants pénètrent alors soit dans l'épiderme soit dans les muqueuses pour s'y fixer (DEVKOTTA et SCHMIDT, 1990).

Les symptômes apparaissent quelques minutes à quelques heures après le contact, en moyenne entre 2 à 12 heures. On observe l'apparition de lésions papulo-oedémateuses associées à un prurit important, continu, et parfois à une vive douleur (MARTIN, 2007 ; RIVIERE, 2011).

1.5. Conséquences environnementales et dégâts forestiers

Les conséquences écologiques et sanitaires de la présence de la chenille processionnaire du pin justifient la mise en place d'une lutte environnementale contre ce ravageur forestier. Toutefois, celle-ci n'est actuellement pas harmonisée à l'échelle nationale. Il existe divers moyens de lutte contre ce nuisible, qui diffèrent notamment selon le lieu d'infestation (forêt d'exploitation, boisement en zone urbaine ou périurbaine, jardin de particulier...), le stade de la chenille visé et les moyens financiers alloués.

1.5.1. Conséquences écologiques

Les conséquences environnementales sont à la fois d'ordre esthétique (défoliations, présence de nids d'hiver...) et d'ordre économique (perte de croissance des arbres dans les plantations et forêts de production, parcs et jardins publics devenus inhospitaliers, notamment en raison des dégâts esthétiques et des risques d'urtication) (RIVIERE, 2011).

Dès l'éclosion, à l'automne, les chenilles commencent à se nourrir des aiguilles de l'arbre hôte selon l'essence et le type de peuplement, l'intensité des dégâts est très variable (TURPIN, 2006). GERI (1980), explique que les populations et le régime de reproduction de la processionnaire du pin sont dépendants de la structure du peuplement forestier (celui-ci varie avec l'altitude et l'exposition).

Les attaques répétées des chenilles peuvent menacer la survie des arbres. Cependant, une défoliation même totale ne provoque pas la mortalité des arbres atteints. Elle entraîne une perte de production, résultant d'une diminution du pouvoir de photosynthèse (MARTIN, 2005 ; ROUSSELET, 2008 ; DSF, 2011).

Les arbres récupèrent en quelques années. Si leurs conditions de croissance sont satisfaisantes, ils sont parfaitement capables de supporter cette attaque. Les arbres affaiblis (par le climat, station, ...) ou susceptibles de subir des défoliations répétées par la chenille (cas des jeunes plantations) peuvent souffrir plus durablement de ces atteintes, et devenir moins résistants à des attaques d'ennemis de faiblesse tels que les scolytes ou le pissode (DSF, 2011).

Les conséquences directes de la défoliation sont des affaiblissements pour les jeunes peuplements et la diminution de la productivité et du caractère esthétique pour les forêts plus âgées (HUCHON et DÉMOLIN, 1970), elles provoquent également une diminution des capacités de reproduction des arbres (production des cônes de pins, taille des cônes, production et poids des graines) (HODAR *et al.*, 2003).

Les niveaux de population de la processionnaire du pin passent par des pics de culmination qui durent d'un à trois ans, au cours desquels les insectes sont très nombreux et commettent des dégâts intenses et étendus sur le plan géographique. Ils sont séparés par des périodes de durée variable, de cinq à huit ans, pendant lesquelles l'insecte n'est plus présent qu'à l'état endémique ; les dommages restent alors discrets. Ces fluctuations, dont l'enchaînement est assez régulier, sont dues à l'intervention de nombreux facteurs capables d'influer sur la multiplication et la survie des populations de cet insecte ravageur : le climat souvent responsable des effondrements (gel, chaleur...), le cortège d'ennemis naturels (insectes parasites et prédateurs, bactéries, virus, oiseaux) qui est actif à chaque stade aérien ou souterrain de la processionnaire, la qualité et la quantité de nourriture, dont dépend la fécondité des femelles (DSF, 2011).

1.5.2. Conséquences économiques

Les pertes de croissance en forêt de production, sont les principales conséquences économiques des attaques de la chenille processionnaire. Une année de fort envahissement entrainera une perte économique de toute l'année de production de bois (MOREL, 2008 ; RIVIERE 2011).

L'étude de GATTO *et al.* (2009) met en avant les couts liés aux traitements forestiers et l'impact sur la valeur foncière d'un territoire infesté, les conséquences environnementales

telles que la fixation du carbone par les arbres et les conséquences sociales pour les forêts de parcs et de loisirs qui sont mises à la disposition du public. Les résultats ont montré qu'à court terme, la mise en place de mesures de contrôle ne serait pas rentable pour les propriétaires forestiers privés car les bénéfices sur la production forestière sont inférieurs aux coûts des traitements forestiers.

L'absence de traitement semble plus rentable sur le court terme, le risque de déclin forestier, s'il est ignoré, peut menacer la productivité forestière, affecter les bénéfices de marché et les valeurs territoriales (perte des valeurs foncières des domaines forestiers). De plus, la diminution des coûts liés aux traitements humains et l'augmentation de la fixation du carbone serait également en faveur de la mise en place d'une stratégie de lutte. Les avantages sociaux de la lutte sont renforcés par l'impact sur les forêts de loisirs, pour lesquelles le nombre de visites journalières serait plus élevé pour une forêt traitée, même si cela n'induit pas de réel revenu pour les propriétaires ou les institutions publiques (RIVIERE, 2011).

1.6. Moyens de lutte

Plusieurs méthodes sont adoptées afin de contrôler les populations de chenilles processionnaires du pin. Cependant il convient de constater qu'aucune méthode alternative ne peut permettre à elle seule d'éradiquer localement une population de processionnaires, ou tout au moins de réduire sa densité au-dessous du seuil de tolérance. Elles sont principalement destinées à maintenir les populations à des niveaux tolérables, mais pas à les éradiquer définitivement (LEBLOND *et al.*, 2010).

Les Stratégies de contrôle actuelles utilisées pour lutter contre les populations de ce ravageur nuisible des pins sont principalement à base de pesticides chimiques, destruction des nids d'hiver, élimination des emballages d'œufs et, dans une certaine mesure, l'amélioration des activités de l'ennemi naturel (BILGILI, 2002). Selon le même auteur, le choix des techniques de lutte est lié aux facteurs climatiques, géographique et au stade phénologique de l'insecte. Il faut alors bien connaître le cycle biologique local de l'insecte, afin d'intervenir au bon moment.

1.6.1. Mesures écologiques (Lutte préventifs)

Plusieurs facteurs favorisent l'invasion de la chenille processionnaire, ils sont généralement d'ordre biotiques et abiotiques, l'implantation d'une monoculture vas accentuer beaucoup plus leur pullulation. La variation de la biodiversité des peuplements non hôte de la

chenille va limiter la propagation de l'insecte et favoriser le développement de son cortège parasitaire (LEBLOND *et al.*, 2010).

L'enrichissement des peuplements forestiers par des essences d'arbres qui ne sont pas sensibles à l'insecte nuisible, va réduire l'accessibilité aux papillons de *Thaumetopoea pityocampa*, par la mise en place d'une barrière physique, et perturbe les signaux olfactifs de reconnaissance émises par les plantes hôtes, l'insecte devient chimiquement confondu, et reconnaît difficilement son hôte (DULAURENT, 2010 ; DULAURENT *et al.*, 2012).

1.6.2. Lutte mécanique

C'est la méthode la plus simple, et la plus courante. Elle consiste à prélever manuellement les pontes et/ou les nids dès qu'ils sont visibles à l'aide d'un sécateur ou d'un échenilloir et à les détruire. En effet la couleur grise caractéristique des pontes (manchons), et leurs localisations basses sur les branches les rendent repérables (DU-MERLE, 1988).

Les nids doivent être incinérés dans un brasier très vif (JOLY, 1952). Cette méthode de lutte n'est applicable que dans les petites zones, ou si les densités de population de chenilles sont faibles. Elle est très efficace (destruction intégrale des nids, et donc de toutes les chenilles), mais peut s'avérer délicate à mettre en œuvre, notamment pour les grands arbres. L'application de cette technique s'étend de la fin de l'été au début de l'automne pour les pontes ou de la fin d'automne jusqu'en février pour les nids d'hiver (MARTIN, 2005 ; TURPIN, 2006).

Pour les arbres de grande taille, et donc inaccessibles à l'échenilloir, certains préconisent de tirer au fusil sur les nids pour les endommager, par un jour froid et humide ! L'idée n'est alors pas de détruire directement les chenilles, mais de détériorer le nid pour qu'elles ne résistent pas au froid de l'hiver (GROJEAN *et al.*, 2006).

1.6.3. Lutte chimique

La lutte chimique contre la chenille, utilisée jusqu'au début des années 90, était principalement basée sur l'utilisation d'un insecticide à base de Diflubenzuron (famille des Benzoyl-urées), qui s'avérait très efficace (RIBRIOUX et DOLBEAU, 1975). Il est vaporisé sur les arbres par voie aérienne ou terrestre en période hivernale, il perturbe la formation de chitine dans la cuticule, en entraînant un blocage de la mue, pour les larves et inhibe l'éclosion des œufs. Cependant, cette méthode est aujourd'hui en très fort recul du fait du fort impact écologique du diflubenzuron qui est un insecticide à large spectre, ainsi que la longue rémanence de ses substances actives (près d'un an) dans la nature (MARTIN, 2005). Le grand

avantage de ce produit, est qu'il est efficace à tous les stades larvaires de la chenille et qu'il est pratiqué pour le pulvériser sur de grandes surfaces par voie aérienne (MARTIN, 2005 ; LEBLOND *et al.*, 2010).

1.6.4. Lutte biologique

En raison de la préoccupation croissante concernant les effets des insecticides chimiques sur la vie sauvage et l'environnement, les applications d'insecticides chimiques dans les forêts ont été réduites et les autres mesures ont eu un succès limité (ER *et al.*, 2007). La lutte biologique consiste à utiliser des organismes naturels, pour lutter contre l'espèce prédatrice, il peut s'agir de traitements à base de bactéries, de champignons, de virus, extraits des plantes, phéromone, par prédation. En effet plusieurs études ont été menées depuis les années cinquante pour trouver un produit efficace contre la chenille et sans aucun impact sur la faune et la flore.

1.6.4.1. Lutte microbiologique bactérienne

Les préparations à base de BtK sont utilisées depuis une quarantaine d'années et sont acceptées pour les traitements de terrains par les organisations internationales (WHO, 1999). La lutte à base de *Bacillus thuringiensis* (Bt) est actuellement la plus utilisée contre la processionnaire (MARTIN et BONNEAU, 2006), elle représente environ 90% du marché mondial des biopesticides (MARTIN, 2005). Elle couvre presque 100% des surfaces traitées (SILVY, 1992 ; LOUDHAIEF, 2018).

Ce produit est spécifique et n'est pas toxique pour les hommes et les animaux, de même pour les abeilles, les poissons, les oiseaux et autres mammifères (JOUNG et COTÉ, 2000). *Bacillus thuringiensis* Kurstaki 3a et 3b, noté (BtK) est une bactérie aérobie à gram positive et ubiquiste, qui existe à l'état naturel dans le sol, la nourriture et l'air. Elle est vaporisée sur les arbres par voie aérienne ou terrestre en période hivernale (efficace surtout sur les trois premiers stades larvaires), elle se fixe sur les feuilles et est ingérées par les larves, l'ingestion des toxines, libérées par la bactérie sur la surface du feuillage, conduit à la destruction du tube digestif puis la mort des chenilles (MARTIN et FREROT, 2005 ; MARTIN et BONNEAU, 2006).

1.6.4.2. Lutte microbiologique virale

C'est la technique la plus ancienne parmi les techniques biologiques, utilisée depuis 1950, suite à l'isolation du virus cytoplasmique (*Smithiavirus pityocampa*). Ce virus est utilisé

comme agent pathogène contre la chenille processionnaire (GRISON *et al.*, 1959), provoquant l'hypertrophie des cellules de l'épithélium de l'intestin. Cependant, la production du virus en masse nécessite une multiplication sur des organismes vivants et implique un élevage important de chenilles processionnaires, raison pour laquelle cette méthode n'a pas été retenue comme moyen de lutte à long terme (GRISON *et al.*, 1959 ; VAGO, 1964).

1.6.4.3. Lutte par les nématodes entomopathogènes

Une enquête préliminaire a été menée avec 3 souches différentes de nématodes entomopathogènes, *Steinernema feeliae*, *S. carpocapsae* et *Heterorhabdite bacteriophora* dans les nids de chenilles dans un reboisement en Italie. Les niveaux de mortalité dans les populations de larves d'hiver ont atteint 50%. Cette investigation a montré que les nématodes entomophages pourraient être un bon candidat pour la lutte contre *T. pityocampa* (TRIGGIANI et TARASCO, 2001, 2002, 2003).

1.6.4.4. Lutte par les champignons entomopathogènes

À l'exception du test de pathogénicité de *Lecanicillium lecanii* contre la chenille processionnaire, les champignons entomopathogènes n'ont pas été testés comme agents de lutte biologique potentiels contre *T. pityocampa* (PAPARATTI et FABOZZI, 1988). Au total 13 souches de champignons, appartenant aux genres *Paecilomyces*, *Tolypocladium*, *Beauveria*, *Metarhizium*, *Lecanicillium* (*Verticillium*) ont été testés sur des larves du quatrième stade de *Thaumetopoea pityocampa*. Les niveaux de mortalité des larves varient entre 16% et 100%. Cette investigation a montré que les trois isolats de *P. fumosoroseus*, *B. bassiana* et de *M. anisopliae* pourraient être une bonne alternative pour la lutte biologique contre *T. pityocampa* (ER *et al.*, 2007).

1.6.4.5. La confusion « sexuelle »

Elle consiste à diffuser dans l'environnement, une phéromone femelle synthétique, pendant la période de vol des imagos. La phéromone est utilisée par diffusion à l'intérieur de pièges. Cette technique permet le suivi de la dynamique (date d'envol) des populations et en même temps diminuer le taux d'accouplement (ZAMOUM, 1998 ; MARTIN, 2005).

1.6.4.6. Prédateurs

Plusieurs espèces d'oiseaux sont connues pour s'attaquer aux larves de la chenille processionnaire du pin (CEBALLOS, 1969), mais seule la huppe (*Upupa epops* L.) est connue pour s'attaquer aux chrysalides et aux larves (BATTISTI *et al.*, 2000).

Dans une étude menée par BATTISTI (1986), le taux de chrysalide détruit par la huppe atteint jusqu'à 68%. La prédation se produit généralement dans les lisières et les clairières des forêts, où les chrysalides sont concentrées en raison de la phototaxie positive des larves nymphosées (DÉMOLIN, 1971). Ces sites constituent un territoire d'alimentation approprié pour l'oiseau pendant la reproduction (HIRSCHFELD et HIRSCHFELD, 1973).

Chapitre 2

Chapitre 2 : Présentation de la région d'Ain Defla

2.1. Caractéristiques géographiques de la région d'Ain Defla

Ain Defla est située au centre de l'Algérie à 140 km au sud-ouest de la capitale Alger, elle se présente comme étant une zone relais entre l'est et l'ouest, le nord et le sud, occupant de ce fait, une position géographique centrale. Le territoire d'Ain Defla est inséré entre les massifs montagneux du Dahra-Zaccar au Nord et l'Ouarsenis au Sud avec une plaine au centre sous forme de cuvette, traversée d'Est en Ouest par Oued Cheliff. Notre étude a été menée au niveau de la plaine du « Moyen-Chéliff ». Cette dernière se situe à 120 km à l'Ouest d'Alger et à 35 km à vol d'oiseau de la méditerranée (nord). Entre 35° et 36° de latitudes Nord et 1° et 2° de longitudes Est. Elle est limitée au Nord par la mer méditerranée, au sud par les monts de l'Ouarsenis, à l'Ouest par le Bas Chéliff et à l'Est par le Haut Chéliff (Fig. 4).

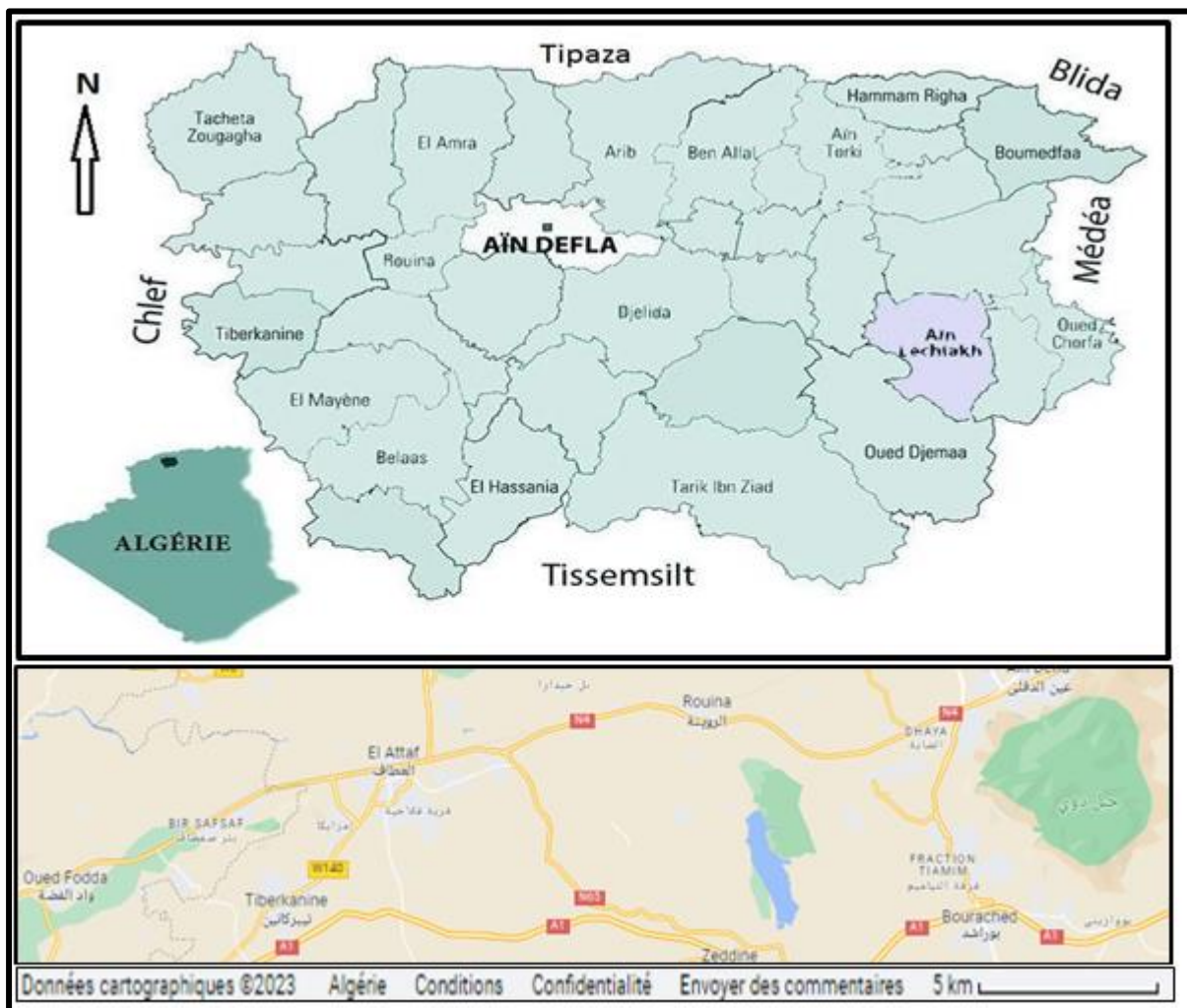


Figure 4 : Les limites géographiques de la région d'Ain Defla (Google earth)

2.2. Facteurs édaphiques de la région d'étude

Du point de vue géologique, le territoire d'Ain Defla est constitué notamment d'argiles feuilletées calcaires, de marnes et de calcaires tendres d'origine sédimentaire du crétacé inférieur et supérieur, parfois on y trouve des taches de sédiments du triasiques présentée par les dolomites : très souvent les sédiments du crétacé inférieur et supérieur apparaissent en taches de structure mosaïque (DSA, 2011).

2.2.1. La pédologie

Selon des études géologiques spécialisées, les sols d'Ain Defla sont, en général, lourds, meubles et fertiles à vocation agricole. La perméabilité est faible et on note une battance importante d'où une mauvaise stabilité structurale. Les meilleurs sols sont répartis de part et d'autre de l'Oued Chélif sur toute la vallée du Chélif avec une superficie globale d'environ 65.000 ha (DSA, 2011).

On distingue une mosaïque de textures à savoir :

- Sols limono-argileux ;
- Sols argilo-limoneux ;
- Sols calci-magnésiques ;
- Sols fersiallitiques.

2.2.2. Texture du sol dans les différentes communes du travail

L'infrastructure des sols est classée comme suit (DSA, 2011) :

- La commune d'El Attaf est caractérisée par un sol limono-argileux, avec un taux de sel élevé ;
- À Ain Defla le Sol est argilo-limoneux ;
- À Zaddine et Rouina, le sol a une texture fersiallitiques.

2.3. Hydrographie

La région du moyen Chélif se compose de cinq grands sous-bassins qui constituent le lieu de la ressource en eau, de surface et souterraine, nécessaire à l'alimentation en eau potable de la population d'Ain Defla ainsi qu'en eau d'irrigation. Le réseau hydrographique d'Ain Defla reste principalement représenté par l'oued Cheliff, d'importance nationale qui est le plus grand cours d'eau de l'Algérie du Nord. Il prend sa source sur les hauts plateaux de l'Est (DPSB, 2014). Ses affluents nés au niveau des montagnes restent importants, il s'agit principalement de l'Oued Deurdeur, issu de l'Ouarsenis et ayant une longueur de 40 km

environ dont l'importance a permis la réalisation de barrages. Quant à ceux nés dans le Zaccar, leur longueur atteint une moyenne de 8 kms et leur écoulement ne dure que durant la saison des pluies (DPSB, 2014).

En matière de barrage la wilaya compte six plans d'eau sur son territoire d'une superficie de 150.042,50 ha, repartis sur différentes zones géologiques d'Ain Defla : Bouroumi, Ghrib, Deureur, Kherraza, Ouled Melouk et Sidi M'hamed Ben Taiba, ainsi que quatre retenues collinaires destinées à l'irrigation (DPSB, 2014 ; SADFI et HASSANE, 2018).

2.4. Caractéristiques climatiques de la région d'étude

Le moyen-Cheliff est caractérisé par un climat de type méditerranéen de variabilité annuelle et interannuelle, on parle généralement de climat semi-aride avec des étés très chauds et des hivers froids (DPSB, 2014 ; SADFI et HASSANE, 2018).

Le climat est un facteur écologique d'une très grande importance de par l'agencement et la combinaison de ses différents éléments (précipitation, température, vents), il commande et exerce une influence notable sur la répartition et la dissémination des espèces végétales et animales (DAJOZ, 1996).

Les paramètres climatiques exercent une profonde action sur les populations d'insectes dans leur biotope. Ils favorisent le développement des arbres qui servent de biotopes de sélections, aux insectes (CHARARAS, 1979). Selon HMIMINA (1986), le climat agit alors d'une manière directe sur la répartition, le développement, l'activité et les pullulations des insectes.

Les facteurs thermiques (minima et maxima) exercent une profonde action sur la vie du Pin d'Alep et de la chenille processionnaire. Par conséquent, la répartition naturelle de ces derniers, leurs changements saisonniers, leurs croissances, la productivité du Pin d'Alep et la survie de la chenille processionnaire y sont lié (SADFI et HASSANE, 2018).

Il existe une série d'étage climatiques allant du subaride au fond de la vallée au subhumide sur les reliefs. Cette situation est liée à l'orographie : Plus l'altitude est élevée plus l'étage est humide de même pour l'enneigement qui touche les reliefs de plus de 600 m d'altitude (MUTIN, 1977).

2.4.1. Températures

La température est l'élément du climat le plus important (DAJOZ, 1996). Elle représente un facteur limitant de toute première importance, elle contrôle l'ensemble des

phénomènes métaboliques et gouverne les répartitions potentielles des espèces dans l'écosystème (RAMADE, 1984).

Bien que Ain Defla ne se trouve qu'à 12 km de la mer, à vol d'oiseaux (Tacheta-zougagha), elle se caractérise cependant par un climat méditerranéen semi-aride avec un caractère de continentalité très marqué et un écart moyen de température supérieur à 20 °C entre les mois de janvier et d'août. L'été s'étend sur 5 à 6 mois environ avec des masses d'air chaudes à partir du mois de mai (DPSB, 2014 ; SADFI et HASSANE, 2018).

Durant la période d'étude l'amplitude thermique moyenne fluctuait entre 10,8 °C en décembre et 30,3 °C en août pour l'année 2014 (Fig. 5, annexe 1), alors qu'en 2015, elle variait entre 9,5 °C en février et 32,8 °C en juillet (Fig. 6, annexe 1), tandis qu'en 2016 elle oscillait entre 12,5 °C en décembre et 31,5 °C en juillet (Fig. 7, annexe 1). Quant aux températures enregistrées en 2017, elles fluctuent entre 9,3 °C en janvier et 33,2 °C en août (Fig. 8, annexe 1).

2.4.2. Précipitations

La pluviométrie est un facteur écologique très important. Elle agit sur la biologie des espèces animales (MUTIN, 1977), par conséquent elle agit sur la vitesse de développement des animaux, sur leur longévité et leur fécondité (DAJOZ, 1971).

Quant aux précipitations enregistrées à Ain Defla, elles sont variables, avec 373,8 mm en 2014, 368,7 mm en 2015, 557,7 mm en 2016 et 501,8 mm en 2017. La répartition des pluies est variable dans le temps, les mois de décembre, janvier et février sont les plus pluvieux, et la période estivale est la plus aride (Fig. 5, 6, 7 et 8, annexe 1).

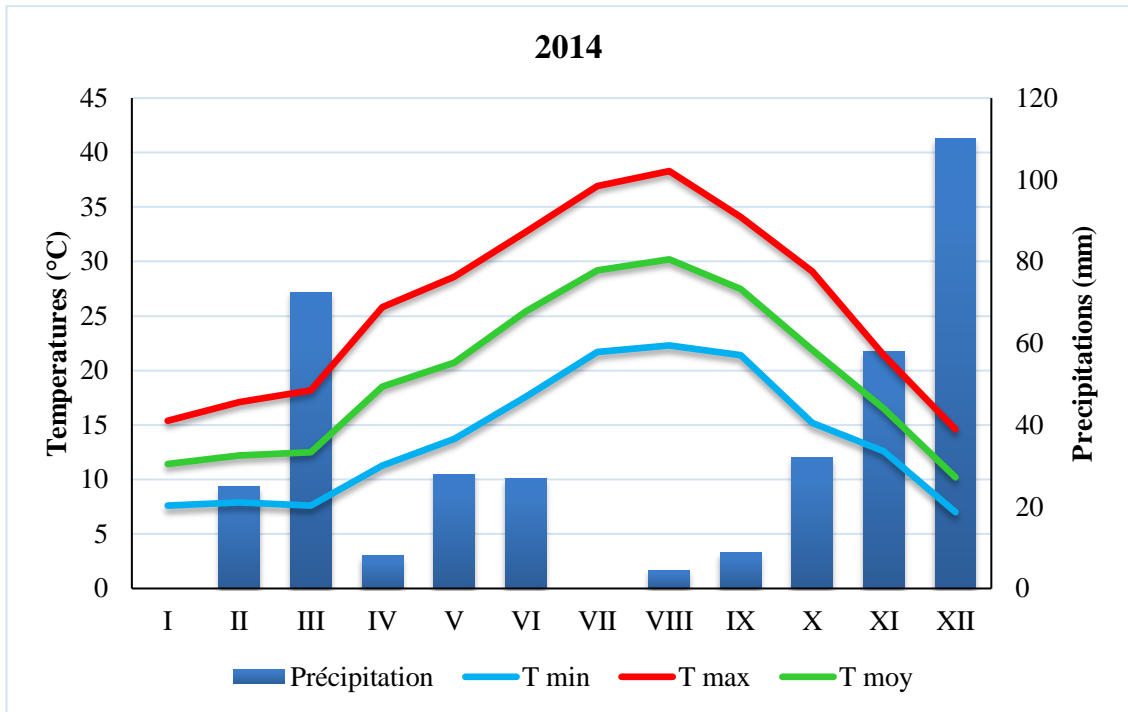


Figure 5 : Courbe de variation de la température minimale, maximale et histogramme de précipitation de l'année 2014

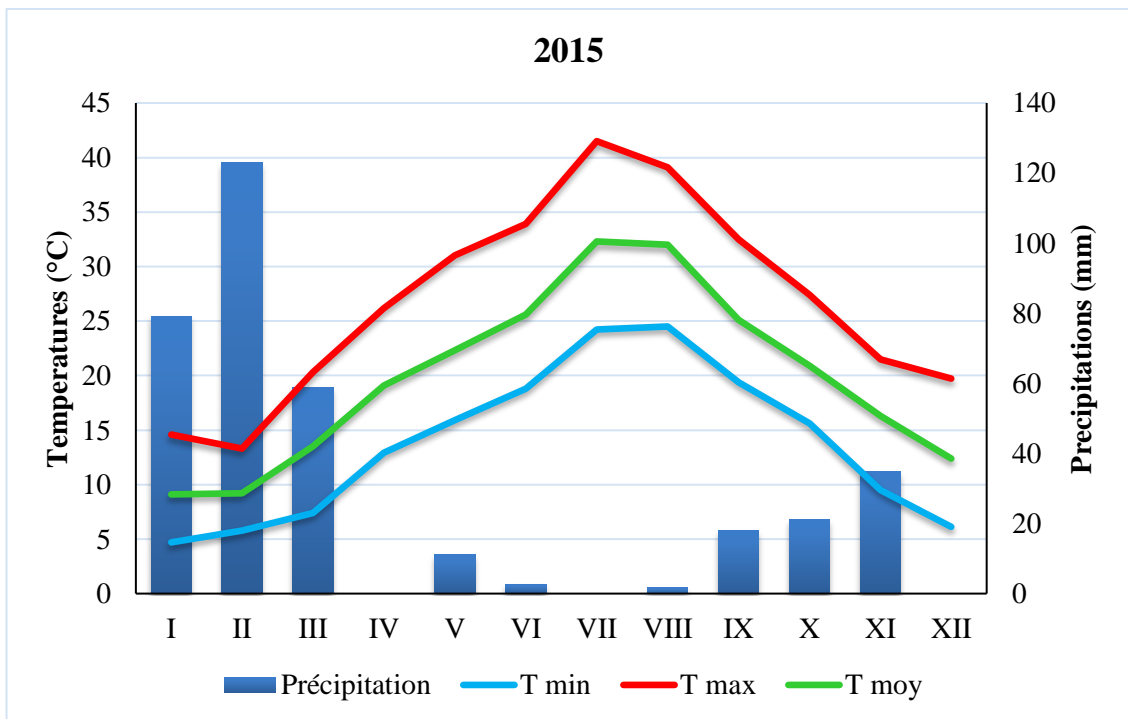


Figure 6 : Courbe de variation de la température minimale, maximale et histogramme de précipitation de l'année 2015

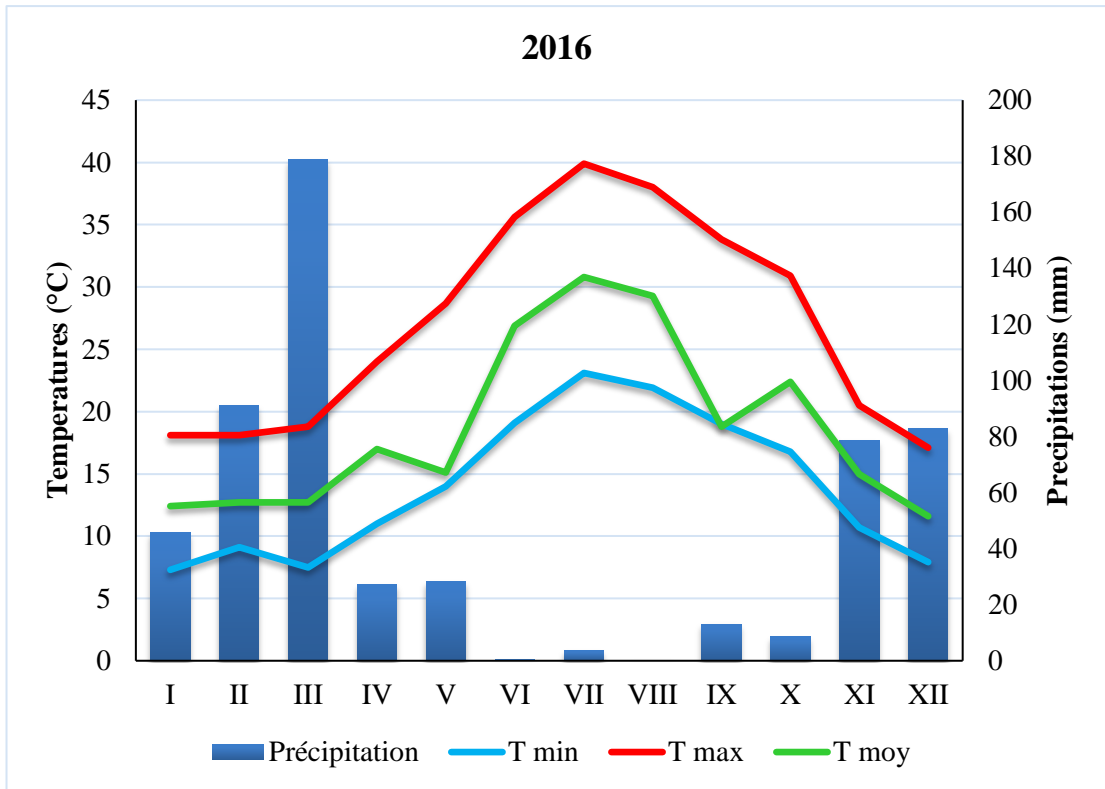


Figure 7 : Courbe de variation de la température minimale, maximale et histogramme de précipitation de l'année 2016

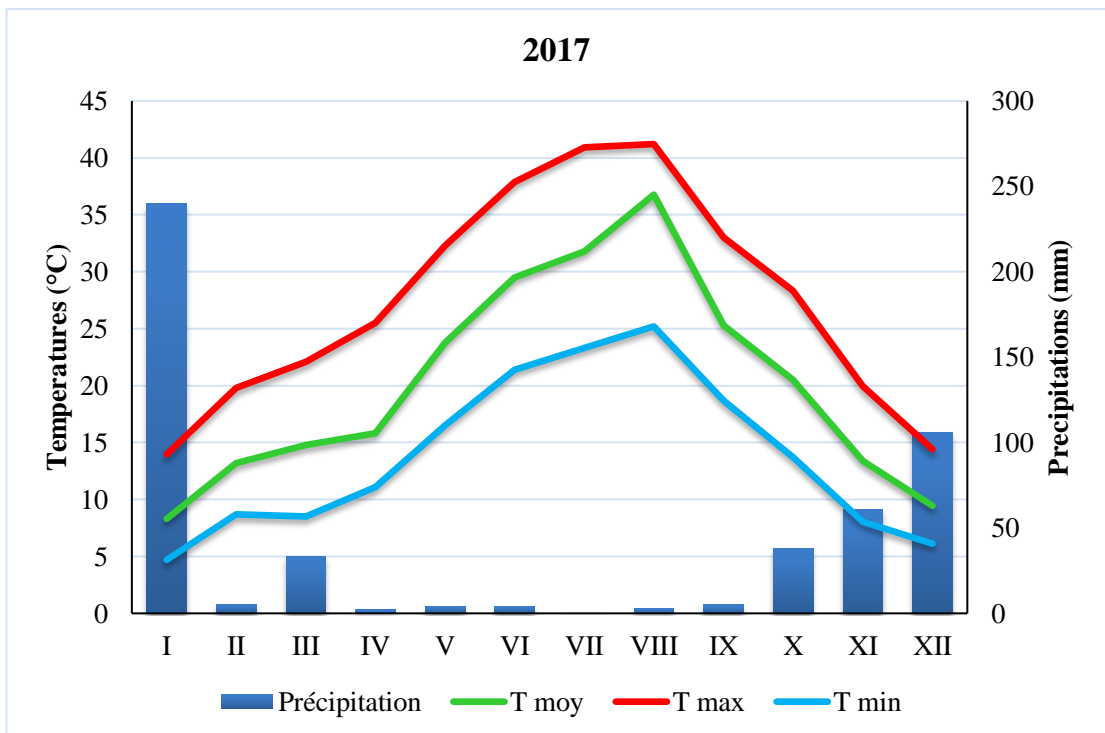


Figure 8 : Courbe de variation de la température minimale, maximale et histogramme de précipitation de l'année 2017

2.4.3. Humidité relative

L'humidité et la température jouent un rôle déterminant dans la vie des insectes. L'humidité exerce un effet direct sur la survie et la reproduction des insectes, il existe les deux zones extrêmes et une zone préférée. En outre, l'humidité exerce des effets indirects sur les insectes par son influence directe sur la végétation limitant ainsi la distribution des insectes (CHRISPIN NGOMBO, 2007). La mortalité des nymphes de la chenille processionnaire est importante dans le sol, elle peut atteindre 60% uniquement à cause de l'humidité du sol (ODEM, 2008).

Les plus grandes valeurs d'humidité relative de l'air sont atteintes pendant la période hivernale, en particulier durant les mois de décembre et janvier, elles sont de 82%, 83%, 85% et 89% en 2014, 2015, 2016 et 2017 respectivement. Tandis que les plus basses sont enregistrées lors des périodes estivales, précisément aux mois du juillet et août, elles sont de 41%, 37%, 40% et 39% (Fig. 9). On peut donc en déduire que l'humidité relative de l'air varie sensiblement en fonction des saisons.

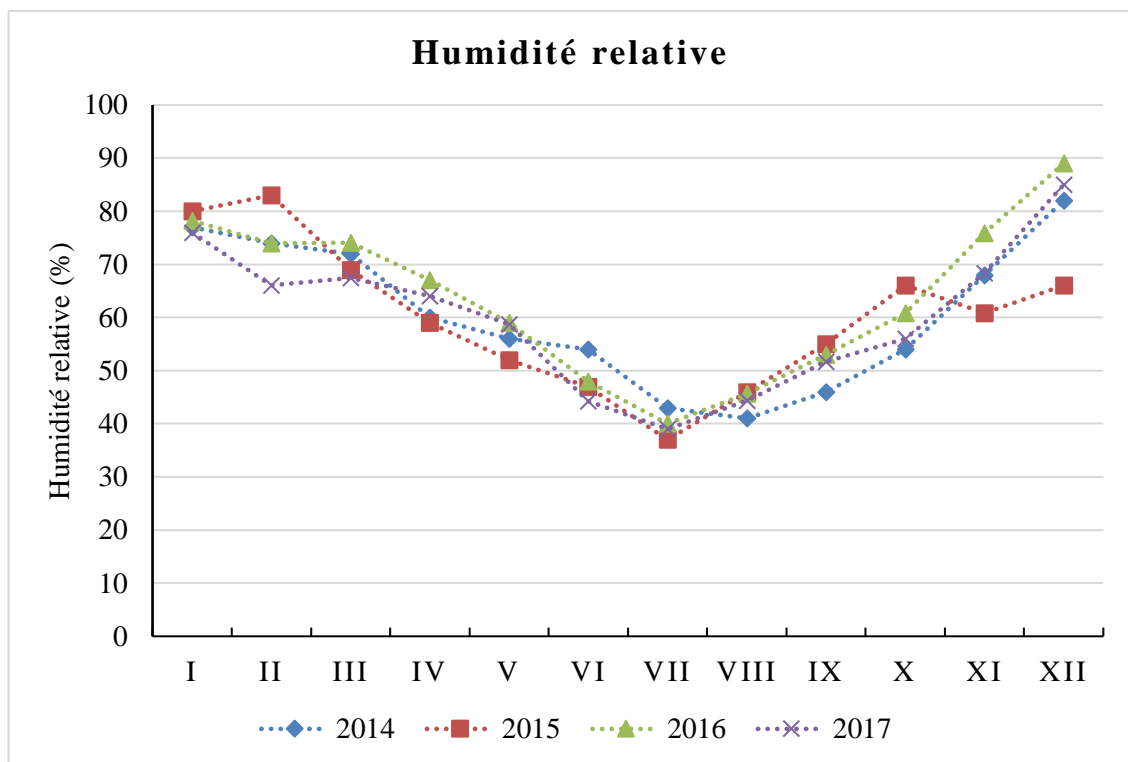


Figure 9 : Humidité relative mensuelle enregistrée dans la région d'Ain Defla de 2014 à 2017

2.4.4. Le Vent

La vitesse du vent joue un rôle sur la dégradation mécanique du sol. Le vent est capable de soulever les éléments fins qui se trouvent à la surface du sol. La disparition des particules fines des limons et argiles attachés aux éléments nutritifs consiste une perte et une

réduction de la fertilité des sols (GILLETTE *et al.*, 1980). Les variations sont considérables dans la zone où le couvert végétal est absent. L'érosion par le vent provoque une perte de sol de 100 à 250 tonnes/ha/an dans les steppes défrichées (LE HOUEROU, 1995).

Au moyen Cheliff (zone d'étude), il existe évidemment des jours de vent assez violent, surtout au mois du février et mars. La plus grande valeur enregistrée est de 7,5 m/s au mois de mars durant l'année 2015. La moyenne de vitesse du vent en période hivernale est de 4 m/s en 2014 (Fig. 10), les coups de vent violent sont redoutables et risquent de réduire à néant les pousses vertes du printemps.

Les valeurs enregistrées pendant la période d'étude sont de 3,48 m/s en 2014, 3,8 m/s en 2015, 4,11 m/s en 2016 et 3,7 m/s en 2017. Ces données climatiques, nous renseignent que la zone du moyen Cheliff subit un flux de vent considérable. Il constitue ainsi un agent d'érosion efficace dans les régions à couverture végétale faible, surtout durant la période sèche.

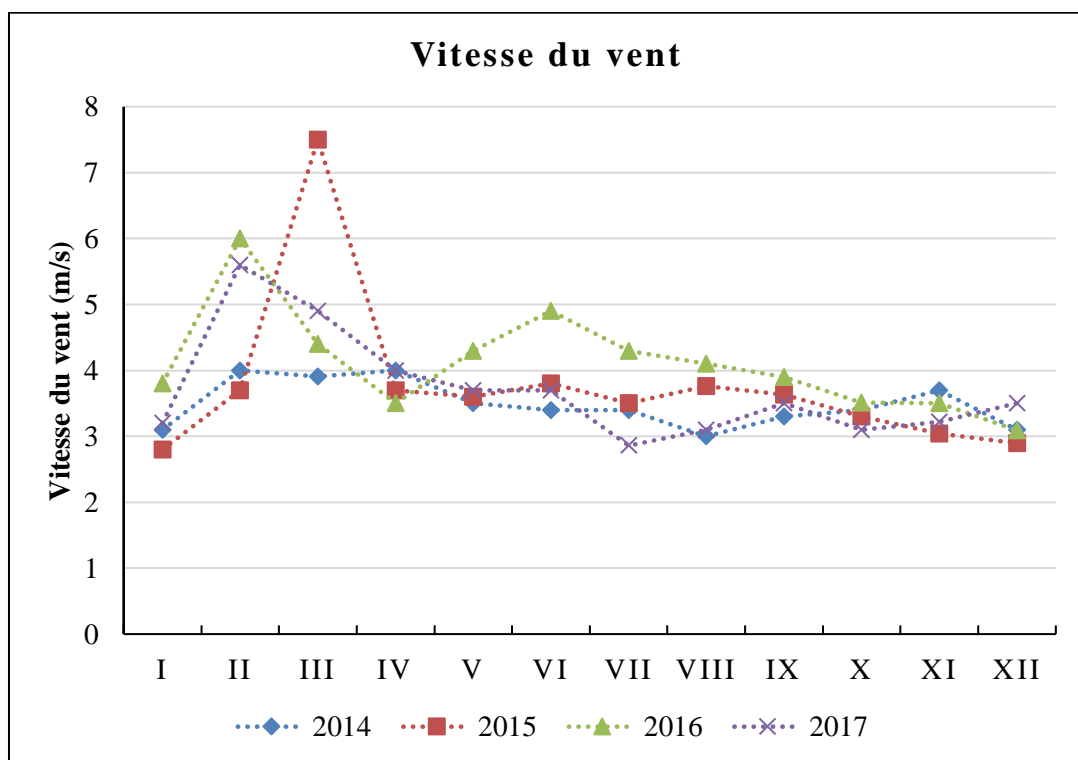


Figure 10 : Vitesse mensuelle du vent enregistrée dans la région d'Ain Defla de 2014 à 2017

2.5. Synthèse des données climatiques de la région d'étude

2.5.1. Diagramme ombrothermique de Gausсен de la région d'étude

Le Diagramme Ombrothermique de BAGNOUL & GAUSSEN (1953) est une représentation graphique de variation de précipitation et de température en fonction du temps (mois), il nous renseigne sur le régime saisonnier du biotope à savoir la durée de la saison

chaude et sèche, la saison froide et la saison de croissance. BAGNOUL & GAUSSEN (1953), définissent la saison sèche comme étant les précipitations mensuelles correspondantes exprimées en millimètres sont égales ou inférieures au double de la température exprimées en degré Celsius ($P = 2T$). De même le climat est sec quand la courbe des températures se trouve au-dessus de celle des précipitations. Néanmoins, il est humide dans le cas contraire (DREUX, 1980).

Le diagramme ombrothermique de la région d'étude a été établi pour un intervalle de 15 ans (2003-2017). Dans notre travail, la lecture est faite directement sur le graphique. Le diagramme ombrothermique tracé montrent l'existence de deux périodes, l'une humide qui s'étale sur 5 mois de janvier jusqu'à mars et de novembre jusqu'à décembre. La saison sèche dure presque 7 mois. Elle va d'avril jusqu'au mois d'octobre (Fig. 11).

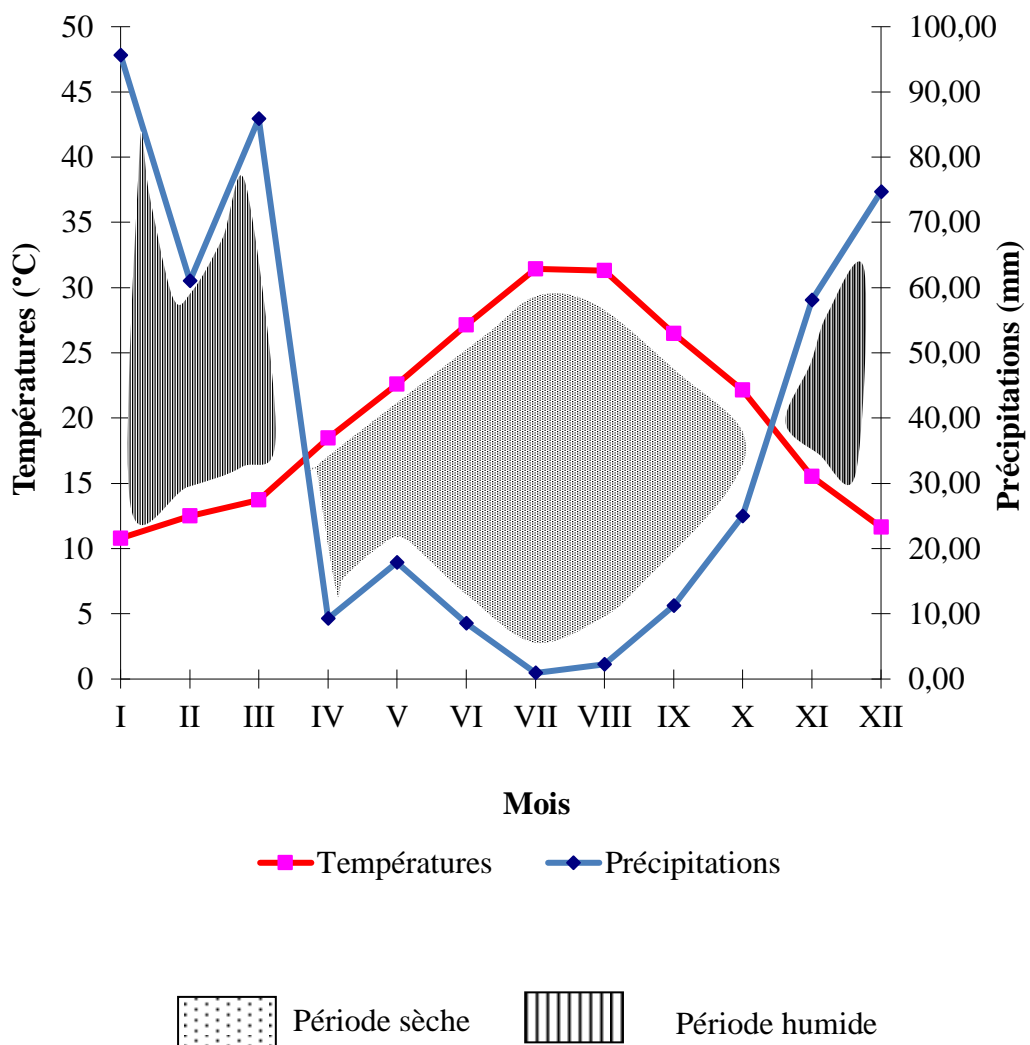


Figure 11 : Diagrammes ombrothermiques de la région d'Ain Defla (2014-2017)

2.5.2. Climagramme d'Emberger (1955) de la région d'étude

Pour déterminer l'étage bioclimatique auquel appartient la région des quatre stations étudiées (Djbel Doui, Ghabat Babor, et Temoulga) nous avons projeté le quotient pluviothermique, défini par EMBERGER (1955). Ce quotient est simplifié par STEWART (1969). Il consiste à calculer le total annuel des précipitations et des températures maxima et minima. Il est calculé selon la formule suivante :

$$Q_3 = 3,43 \times P / (M - m)$$

Q_3 : Quotient pluviothermique d'Emberger ;

P : Moyenne des précipitations annuelles exprimées en mm ;

M : Moyenne des températures maxima du mois le plus chaud ;

m : Moyenne des températures minima du mois le plus froid.

Le quotient pluviothermique évalué pour une période de 15 ans (2003-2017) est de 44,8. Cette valeur confirme l'appartenance d'Ain Defla à un étage bioclimatique semi-aride à hiver tempéré (Fig. 12).

Selon les données climatiques enregistrées par les stations météorologiques de l'ONM à travers la wilaya d'Ain Defla, la région d'étude se caractérise par des étés chauds et humides à cause de la présence de six barrages d'eau et des hivers tempérés, une amplitude de température moyenne annuelle supérieure à 18 °C, une forte évaporation et des précipitations caractérisées par leur faiblesse en quantité et par leur variabilité d'une année à l'autre. Ces données confirment donc que le climat est marqué par la continentalité.

2.6. Flore de la région d'Ain Defla

La biodiversité floristique, peut être mesurée par la richesse floristique (DAGET, 1982). Ain Defla s'étend sur une superficie de 4.544,28 km². La superficie forestière est estimée à 132.709,40 ha. Elle se répartit du Mont Dahra-Zaccar au Nord de la région jusqu'à l'Ouarsenis au Sud. La nature juridique de la superficie forestière se compose de deux forêts domaniales de 102.779 ha et de forêts privées de 29.990 ha. Le tapis végétal forestier se trouve dans un état dégradé, dû essentiellement aux incendies, coupes illicites et surpâturage.

Le taux de boisement représente environ 31%. La répartition par essence indique une prédominance du Pin d'Alep, soit 48.020 ha (36,19 %). Par la suite nous avons le Chêne vert 23.646 ha (17,81 %), la Thuya 14.124 ha (10,63 %), le Chêne liège 1.960 ha (1,47 %), le Chêne Zeen 362 ha (0,6 %), le Cyprès vert 528 ha (0,43 %), le Chêne afarès 200 ha (0,27 %), l'Eucalyptus 280 ha (0,27 %), le Cèdre 100 ha (0,08 %) et un divers couvert estimé à 43.663 ha soit 32,9 % (DPSB, 2014).

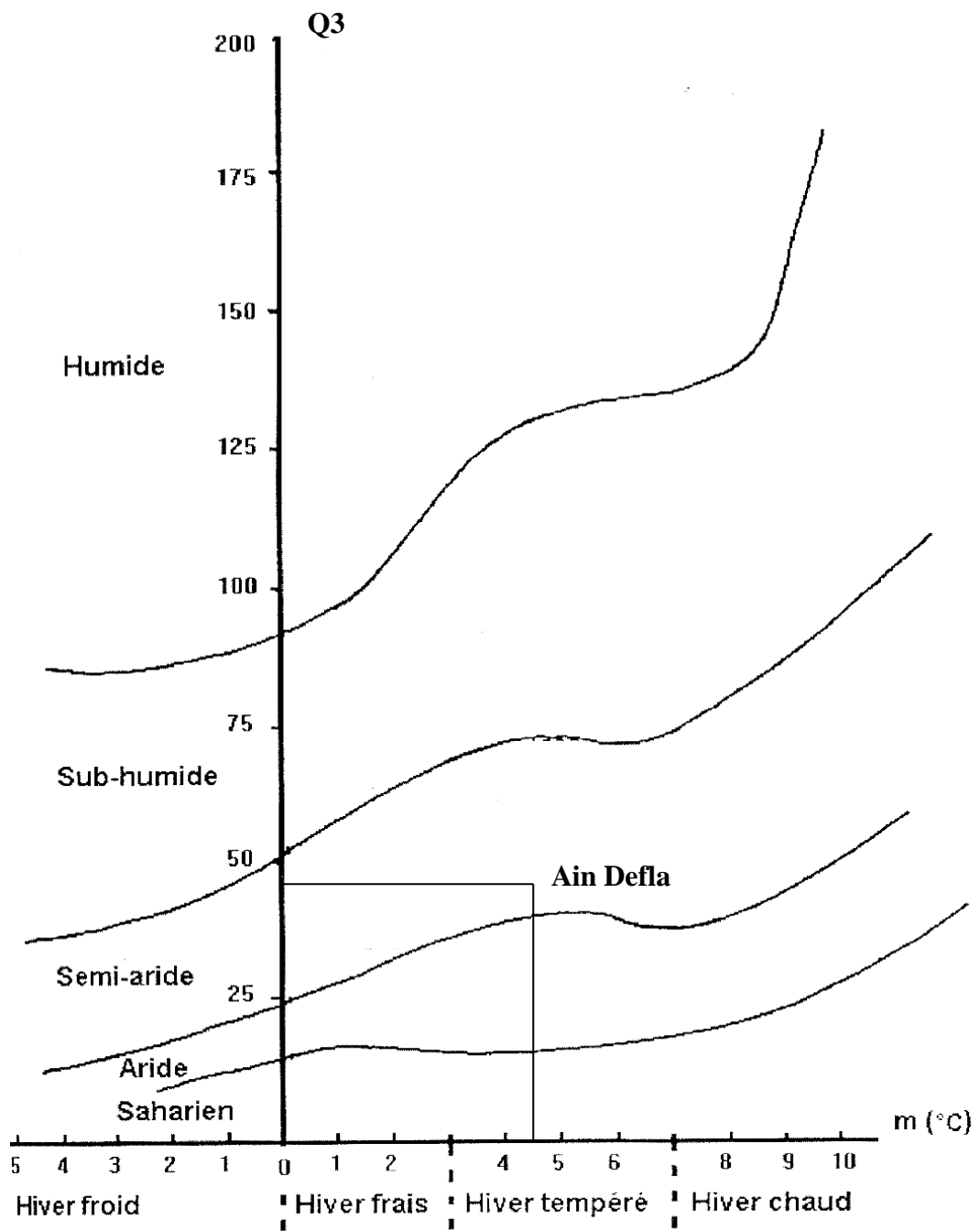


Figure 12 : Place d'Ain Defla dans le Climagramme d'Emberger (2003-2017)

Quant à la flore herbacée on note les espèces les plus fréquentes à Ain Defla selon les travaux de ZAHED et BRAHIMI (2013), de KANOUCHE et ZEROUKI (2014) et de SADFI et HASSANE (2018) (Tableau 1).

Tableau 1. Flore herbacée recensée à Ain Defla

Famille botanique	Espèce
Urticacées	<i>Urtica dioica</i> L.
Primulacées	<i>Anagallis plathyphylla</i> Baudo
Papavéracées	<i>Papaver rhoeas</i> L.
Malvacées	<i>Malva parviflora</i> L. <i>Lavatera trimestris</i> L. <i>Malva pusilla</i> Sm.
Astéracées	<i>Sonchus arvensis</i> L. <i>Calendula suffruticosa</i> Vahl <i>Matricaria chamomilla</i> L. <i>Glebionis segetum</i> Fourr. <i>Scolymus hispanicus</i> L. <i>Anthemis cotula</i> L.
Fabacées	<i>Medicago polymorpha</i> L.
Poacées	<i>Arrhenatherum elatius</i> J. Presl & C. Presl <i>Hordeum murinum</i> L. <i>Phalaris paradoxa</i> L. <i>Bromus madritensis</i> Nevski <i>Bromus macrostachys</i> Desf.
Polygonacées	<i>Polygonum aviculare</i> L.
Brassicacées	<i>Sinapia arvensis</i> L.
Apiacées	<i>Daucus carota</i> L. <i>Foeniculum vulgare</i> Mill. <i>Scandix pecten-veneris</i> L. <i>Torilis nodosa</i> Gaertn
Rubiacées	<i>Galium tricorne</i> Gren. & Godr.
Aspleniacées	<i>Asplenium trichomanes</i> L.
Resedacées	<i>Reseda alba</i> L.
Geraniacées	<i>Geranium rotundifolium</i> L.
Amaranthacées	<i>Beta vulgaris</i> L.
Primulacées	<i>Anagallis arvensis</i> L.
Lamiacées	<i>Thymus vulgaris</i> L. <i>Thymus fontanesii</i> Boiss & Reut <i>Lavandula stoechas</i> L. <i>Rosmarinus officinalis</i> L.

2.7. Prédateurs et parasites de la chenille processionnaire

Dans la nature, chaque être vivant évolue avec d'autres, que ce soit dans des relations bénéfiques ou néfastes pour les uns et/ou pour les autres. Les interactions dans lesquelles la processionnaire du pin est impliquée, sont de types "hôte-parasite", "proie-prédateur", ou des maladies provoquées par des virus. Les ennemis sont très divers : insectes, oiseaux, mammifères, champignons, bactéries ou virus. Ils agissent à tous les stades de développement de la processionnaire du pin (chenille, chrysalide, papillon ou œuf) (BONNET *et al.*, 2008).

Ce cortège d'ennemis naturels a pour fonction de réguler les populations de processionnaires du pin par des relations trophiques complexes et fragiles. Tout dérèglement dans ces interactions peut provoquer une diminution ou une augmentation de ces populations (BONNET *et al.*, 2008).

2.7.1. Les ennemis de la phase aérienne

Dans le tableau 2 sont mentionnés les différents ennemis naturels de la phase aériennes de la chenille processionnaire du Pin d'Alep. Il s'agit d'une synthèse faite selon les travaux de BILIOTTI (1958), de DÉMOLIN (1968), de DU-MERLE (1969) et de ZAMOUM (1998).

Tableau 2. Les ennemis de la phase aérienne

Stades	Ennemis naturels
Œuf	Parasitoïde
	<i>Baryscapus servadeii</i> Domenichini (Hymenoptera, Eulophidae) <i>Pediobius</i> sp. (Hymenoptera, Eulophidae) <i>Ooencyrtus pityocampae</i> Mercet (Hymenoptera, Encyrtidae) <i>Anastatus bifasciatus</i> Geoffroy (Hymenoptera, Eupelmidae) <i>Eupelmus (Macreneura) secultata</i> Ferriere (Hymenoptera, Encyrtidae) <i>Eupelmus (Macreneura)</i> sp. (Hymenoptera, Encyrtidae) <i>Trichogramma</i> sp. (Hymenoptera, Trichogrammatoidea)
	Prédateurs
	<i>Ephippiger ephippiger</i> Fiebig (Orthoptera, Tettigonioidea) <i>Oecanthus pellucens</i> Scopoli (Orthoptera, Grylloidea) <i>Paraechinus aethiopicus</i> Ehrenberg (Hérisson du désert) <i>Atelerix algerus</i> <u>Lereboullet</u> (Hérisson d'Algérie)
Chenilles	Parasitoïde
	<i>Phryxe caudata</i> Rondani (Diptera, Tachinidae) <i>Compsilura concinnata</i> Meigen (Diptera, Tachinidae) <i>Ctenophorocera pavida</i> Meigen (Diptera, Tachinidae) <i>Exorista segregata</i> Rondani (Diptera, Tachinidae) <i>Erigorgus femorator</i> Aub. (Hymenoptera, Ichneumonidae) <i>Apanteles vestalis</i> Hal. (Hymenoptera, Braconidae)

	<i>Meteorus versicolor</i> Wesmael (Hymenoptera, Braconidae)
	Prédateurs
	<i>Xanthandrus comtus</i> Harr. (Diptera, Syrphide) <i>Parus major</i> L. (Mésange charbonnière) <i>Scolopendra cingulata</i> Latreille (Scolopendridae, Scolopendromorpha)
	Micro-organismes pathogènes
	Virus : <i>Smithiavirus pityocampae</i> et <i>Borrelina pityocampae</i> Bactéries : <i>Clostridium</i> sp. Mycoses : <i>Beauveria bassiana</i> Vuill., <i>Paecilomyces fumosoroseus</i>
Adultes	Prédateurs invertébrés
	<i>Vespa germanica</i> Fabricius (Hymenoptera, Vespidae) <i>Crematogaster scutellaris</i> Olivier (Hymenoptera, Formicidae) <i>Leptothorax recedens</i> Nylander (Hymenoptera, Formicidae) <i>Formica rufa</i> L. (Hymenoptera, Formicidae)
	Prédateurs vertébrés
	<i>Paraechinus aethiopicus</i> Ehrenberg (Hérisson du désert) <i>Atelerix algirus</i> <u>Lereboullet</u> (Hérisson d'Algérie)

2.7.2. Ennemis de la phase souterraine

Dans le tableau 3 sont mentionnés les différents ennemis naturels de la phase souterraine de la chenille processionnaire du Pin d'Alep. Il s'agit d'une synthèse faite selon les travaux de BILIOTTI (1958), de DÉMOLIN (1968), de DU-MERLE (1969) et de ZAMOUM (1998).

Tableau 3. Ennemis de la phase souterraine

Chrysalide	Parasitoïdes
	<i>Coelichneumon rudis</i> Fonsc. (Hymenoptera, Ichneumonidea)
	<i>Villa brunnea</i> Beck (Diptera, Bombyliidea)
	<i>Conomorium pityocampa</i> Graham (Hymenoptera, Pteromalidea)
	Mycoses
	<i>Beauveria bassiana</i> Vuill.
	<i>Paecilomyces fumosoroseus</i>
	Prédateur
<i>Upupa epops</i> L. (Huppe fasciée)	

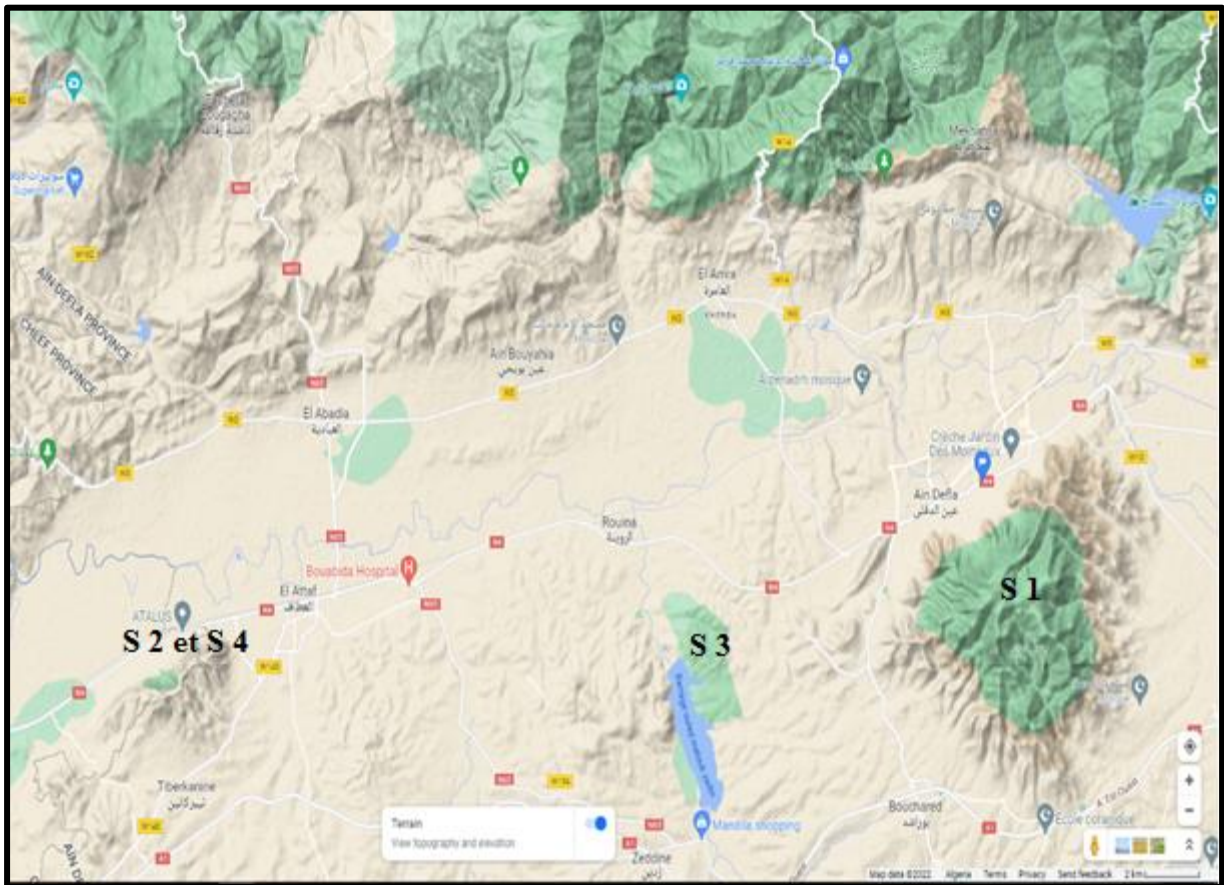
Chapitre 3

Chapitre 3 : Matériel et méthodes

3.1. Choix et description des stations d'échantillonnage

Pour notre travail nous avons choisi quatre différents sites, deux forêts naturelles et deux reboisements (Fig. 13).

Le choix des stations s'est basé sur quatre critères, à savoir le taux d'infestation, l'altitude, l'orientation géographique, l'homogénéité du couvert végétal et le type de forêt (reboisement ou forêt naturelle).



S 1, S2, S3 S4 : stations d'étude

(Originale)

Figure 13 : Situation géographique des stations d'échantillonnage

3.1.1. Choix et description des forêts naturelles

Le massif montagneux de Doui, situé au Sud de la commune d'Ain Defla est notre première station de travail, la superficie de ses forêts est de 2.177 ha soit 20,78% de la superficie totale, le principal couvert végétal se présente comme suit : 190 ha du pin D'Alep, 50 ha du Chêne vert, 10 ha d'Eucalyptus et 10 ha de Cyprès.

Notre première station d'étude ($36^{\circ} 14' E$, $1^{\circ} 57' N$) se situe sur le mont Doui (Fig. 14) qui est couvert d'une forêt naturelle, faiblement infestée comparativement aux autres stations, son couvert végétal principale est le Pin d'Alep, d'une superficie de 80 ha et le chêne liège de 60 ha, il se caractérise par un sol rocheux calcaire. Son altitude est de 410 m. La hauteur moyenne des arbres du pin d'Alep est de 11 m. Quant à la densité est de 150 arbres /ha. La station du mont Doui se trouve sur un sol accidenté et escarpé avec une pente de 15%.



(Originale)

Figure 14 : Forêt naturelle de Djebel Doui (station 1)

La deuxième station choisie est une forêt naturelle. Elle se situe dans la commune d'El Attaf à 30 km à l'ouest du chef-lieu de wilaya (Fig. 15), elle comporte une forêt naturelle qui s'étend sur une superficie de 1.214 ha, la superficie boisée étant de 840 ha, composée principalement du pin d'Alep et de broussailles, elle se concentre totalement sur le mont de Temoulgha ($36^{\circ} 12' N$, $1^{\circ} 37' E$), lieu de notre échantillonnage. Ce dernier couvre les flancs du mont avec une hauteur moyenne des arbres dominants de 8 mètres, le nombre des nids par arbre est en moyenne de deux nids, la station est orientée vers l'ouest. Cette station se trouve à une altitude de 353 m.



(Originale)

Figure 15 : Forêt naturelle de Temoulgha (station 2)

3.1.2. Choix et description des reboisements

La troisième station est un reboisement situé au sud de la commune de Rouina ($36^{\circ} 14' N, 1^{\circ} 48' E$), exactement dans la forêt de Babor, elle se situe à une altitude de 256 m avec un sol relativement plat et sans relief (Fig. 16). D'une superficie reboisée de 1.217 ha, se compose principalement de Thuya (500 ha) et du pin d'Alep (100 ha). Ce dernier est un ancien reboisement datant des années 80. Elle est limitée au nord, à l'est et au sud par des terrains agricoles, à l'ouest par le barrage d'Oulad Mellouk ($36^{\circ} 12' N, 1^{\circ} 50' E$) et des terrains agricoles, dont elle bénéficie d'une humidité très élevée, conséquence de son voisinage immédiat du barrage et se caractérise par des sols agricoles fertiles. La hauteur de ses arbres varie de 5 à 10 m, avec une densité de 200 arbres/ha.

La quatrième station est un reboisement du pin d'Alep, le reboisement de Temoulgha ($36^{\circ} 11' N, 1^{\circ} 38' E$) située sur le mont Temoulgha dans la commune d'El-Attaf (Fig. 17), qui s'étend sur 150 ha. Son relief est relativement plat. Le reboisement se trouve à une altitude de 319 m. La hauteur moyenne des arbres est d'environ 2,5 m car le reboisement est jeune, ayant moins de huit ans. La densité moyenne des arbres est de 300 /ha. Le reboisement s'oriente vers l'Est.



(Originale)

Figure 16 : Reboisement de Babor (station 3)



(Originale)

Figure 17 : Reboisement de Temoulgha (station 4)

3.2. Échantillonnage effectué sur le terrain

Sur le terrain, nous avons effectué plusieurs échantillonnages, en utilisant les méthodes adoptées pour mieux connaître la bio-écologie de la chenille processionnaire du pin.

3.2.1. Échantillonnage des nids d’hivers

À la mi-décembre 2014, pour choisir le nombre des nids échantillonnés par arbre, nous avons procédé à l’observation et le comptage des nids. La méthode que nous avons adopté pour notre travail est une méthode systématique qui consiste à choisir trois transects linéaires distant entre eux de 10 m dans les deux reboisements, et de 20 m pour les deux forêts naturelles. Nous avons sélectionné dix arbres par transects à raison de trente arbres par station. Les mesures des hauteurs d’arbres échantillonnés et des nids par rapport au sol, la prise de l’orientation cardinale des nids sur chaque arbre et leurs nombres par arbre ont été effectuées dans chaque site. La méthode de RONDEUX (1993), a été utilisée pour la mesure des hauteurs d’arbre, à l’aide d’une perche de longueur de 5 mètres, placée verticalement contre l’arbre à mesurer (ZIOUCHE *et al.*, 2017). Nous avons procédé à la collecte des nids de deux manières différentes, selon la hauteur de ceux-ci. Pour des nids se trouvant à basse ou moyenne hauteur, nous avons utilisé une perche de 5 m de longueur. Pour les hauteurs les plus importantes nous avons utilisé une échelle et une perche pour faciliter la récolte des nids d’hiver (Fig. 18).

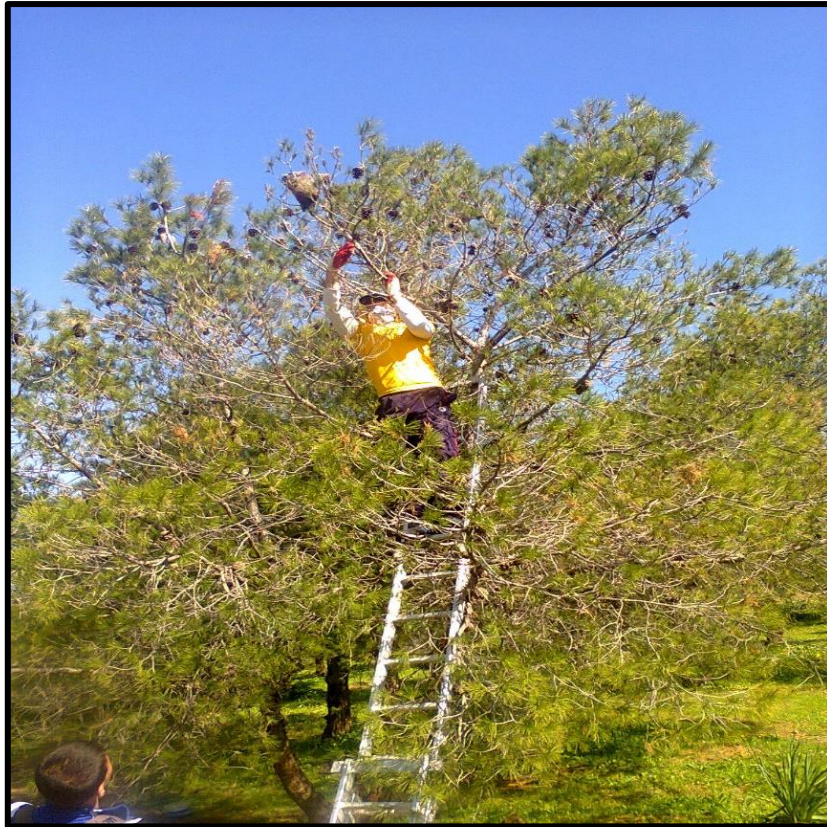
3.2.2. Piégeage des chenilles partant en procession de nymphe

Dans cette partie, nous présentons la méthode appropriée pour l’installation des pièges à chenille partant en nymphe et ainsi que leurs captures.

3.2.2.1. Installation des pièges à chenille

Au début du mois de mars 2015, et après la prise des informations sur le cycle phénologique de la chenille processionnaire auprès de la conservation des forêts d’Ain Defla, nous avons commencé le piégeage des chenilles. Le piège adopté dans ce travail est formé d’une bassine en plastique, de 25 cm de hauteur, évidée au centre pour y envelopper le tronc de l’arbre (Fig. 19).

Dans les quatre stations d’étude nous avons installé 2 pièges par transect (6 pièges par station). Ce dispositif nous a permis de dénombrer les chenilles qui descendent en procession des nids d’hiver.



(Originale)

Figure 18 : Échantillonnage des nids d’hiver en février 2015



(Originale)

Figure 19 : Mise en place du piège à chenille en mars 2015

3.2.2.2. Capture des chenilles

Après l'installation des pièges, nous avons assuré des observations quotidiennes, dans le but de déceler le jour où les chenilles commenceront à quitter les nids pour descendre vers le sol pour la nymphose. Dès le début de la procession (Fig. 20), et à l'aide de gants stériles et de pinces souples, Nous avons assuré un suivi quotidien pour dénombrer les chenilles partant en procession et en même temps nous avons pris 50 chenilles de chaque station au laboratoire pour poursuivre le travail.



(Originale)

Figure 20 : Procession des chenilles en avril 2016

3.2.3. Échantillonnage des pontes

En se basant sur des travaux réalisés par la conservation des forêts d'Ain Defla et au début du mois de septembre 2016, dans les mêmes stations sur lesquelles nous avons travaillé l'année passée soit 2 forêts naturelles et 2 reboisements, nous avons choisi de travailler sur les

mêmes transects pour faciliter le repérage. Nous avons effectué dans chaque station 3 transects et dans chaque transect nous avons travaillé sur 10 arbres, l'espacement entre chaque transect est d'environne 20 m pour les forêts naturelles et 10 m pour les reboisements, la distance entre les arbres du même transect est en moyenne de 20 m pour les forêts naturelles et 10 m pour les reboisements.

Des lots de pontes ont été récoltés d'une manière systématique pendant les mois de septembre et octobre, 2 pontes par arbre dans les forêts naturelles (60 pontes), et 3 pontes par arbre dans les reboisements (90 pontes), sur le terrain nous avons observé des manchons installés sur les aiguilles (Fig. 21) et d'autres sur les rameaux (Fig. 22).

Après ce travail préliminaire nous avons effectué les opérations suivantes :

1. Détermination de la hauteur de l'arbre échantillonné ;
2. Comptage du nombre de manchons pour chaque arbre ;
3. Déterminer la position de chaque manchon prélevé sur l'arbre et mesurer sa hauteur par rapport au sol ;
4. Conservation des manchons dans des tubes en verre bouchée par du coton pour assurer l'aération.



(Originale)

Figure 21 : Manchon (ponte) sur des aiguilles du Pin d'Alep observé en septembre 2016



(Originale)

Figure 22 : Manchon (ponte) sur un rameau du Pin d'Alep observé en septembre 2016

3.2.4. Piégeage des adultes mâles à l'aide des phéromones sexuées

Parmi les moyens utilisés pour contrôler le nombre de chenille on trouve les pièges à phéromones. Cette méthode de contrôle s'inspire de plusieurs études telle que celle de MARTIN *et al.* (2009 et 2013) et celle de ZAMOUM (1998). Elle a plusieurs objectifs, le premier étant la réduction de la population des chenilles mâles, en conséquence, le nombre d'accouplements et de pontes, la durée d'émergence et leurs dates, ainsi que la fluctuation des captures dans les quatre stations. Cette méthode permet également la détection précoce de ce ravageur dans des zones non encore colonisées, par la pose de pièges dans des communes proches de la zone de front. La connaissance des dates d'émergence des papillons de *Thaumetopoea pityocampa* est fondamentale pour caler le cycle et déterminer à l'avance comment se situerait dans le temps les différents stades de développement.

3.2.4.1. Description des pièges à phéromones sexuées utilisés

Les imagos sont des papillons nocturnes, qui sortent de la terre au crépuscule au cours de l'été. Le piégeage à phéromone consiste à capturer des papillons adultes mâles à l'aide de pièges émettant des phéromones sexuelles de synthèse spécifiques à l'espèce. Le mâle est attiré par cette molécule, qui correspond à l'odeur du papillon femelle, il vole autour du piège, puis il tombe dans un récipient adapté lorsqu'il est épuisé.

L'activité de la phéromone utilisée au cours de cette étude persiste pendant un mois, et son aire d'attraction s'étend sur un hectare. Le changement du flacon de la phéromone s'effectue chaque mois. Nous avons utilisé un diffuseur de phéromones fabriqué par Russell IPM, Angleterre, distribué par Atlas Agro GmbH, Binzstr. 18, CH-8045 Zurich, Suisse. Leur vendeur en Algérie est Agrichem, Algérie. Ce diffuseur est importé par l'Algérie dans le cadre de la sauvegarde du barrage vert qui est une implantation à base du pin d'Alep.

3.2.4.2. Méthode d'installation des pièges à phéromones

Pour couvrir toute la période d'envol des adultes il faudra prévoir la mise en place du dispositif de piégeage 15 jours avant l'émergence (MARTIN *et al.*, 2013). La validation expérimentale de l'efficacité du piégeage s'est faite par comparaison entre les dénombrements des nids d'hiver, effectués avant la pose des dispositifs de piégeage (février 2015) avec le dénombrement de ceux de l'hiver suivant (février 2016).

Dans chacune des stations choisies auparavant, le 13 juillet 2016 nous avons installé les pièges à phéromone au centre d'une parcelle d'un hectare (Fig. 23), puis nous avons procédé au comptage du nombre de nids qui y existent.

Ces pièges sont restés en place 15 jours, bien après la fin de l'émergence des papillons, cette date d'installation des pièges n'a pas été prise au hasard mais suite à une recherche bibliographique aux niveaux de la direction des forêts de la wilaya d'Ain Defla.

La visite des pièges dans les stations était quotidienne et une observation attentive y était apportée. Cela nous a permis de contrôler, d'une part la date de début et de fin d'émergence et d'autre part la durée de celle-ci.

La validité des tubes à phéromones étant seulement un mois, et leur aire d'attraction est estimée à une surface d'un hectare, c'est pour cette raison nous étions obligés de procéder à leur changement au moment opportun. Comme les imagos ne sont pas urticants, nous les manipulions à mains nues. Dans les pièges à phéromones, les inserts collants qui servent à piéger les imagos sont remplacés lorsque ces pièges étaient inspectés et surtout dans les cas où un grand nombre de papillons ont été capturés.



(Originale)

Figure 23 : Mise en place des pièges à phéromone en juillet 2016

3.2.5. Utilisation des extraits des huiles de plantes contre les chenilles processionnaires

Plusieurs méthodes peuvent être cumulées pour contrôler le nombre de nids de la chenille processionnaire. Au cours de ces dernières années, plusieurs études se sont orientées vers la méthode de lutte biologique. Plusieurs familles de plantes sont utilisées pour lutter contre différents autres insectes ravageurs. Cette lutte se base sur l'utilisation de tout ce que l'on peut extraire de ces plantes (Huiles essentielles, extraits aqueux), ou par leurs fumigations ainsi que leurs effets répulsifs.

La famille des lamiacées qui comporte une très grande variété (200 genres) est la plus utilisée dans cette lutte (KABOUCHE, 2005). Les études menées pour déterminer les bienfaits d'extraits de plantes comme moyen de lutte contre la chenille processionnaire sont restées limitées.

3.2.5.1. Intérêt des huiles essentielles

L'utilisation des huiles essentielles connaît depuis plusieurs années un essor de plus en plus important. Ces substances naturelles, utilisées comme bio pesticides, pourrait aider à atténuer l'impact négatif des intrants chimiques sur les réseaux trophiques, la santé humaine, et l'environnement global (BACHIR *et al.*, 2017).

Leurs utilisations ont fait l'objet de plusieurs études qui ont approuvé leur multifonctionnalité et l'ampleur de leurs perspectives d'application dans divers domaines à cause de leur variabilité chimique (HYLDGAARD *et al.*, 2012). Il s'agit aussi bien d'activités virucides, acaricides, anti-oxydants, fongicides, bactéricides et antiparasitaires sur un large spectre de microorganismes (BURT, 2004 ; BAKKALI *et al.*, 2008), et aussi insecticide contre divers insectes (EL AKHAL *et al.*, 2015 ; BACHIR *et al.*, 2017).

3.2.5.2. Critère de qualité des huiles essentielles

Il existe plusieurs critères qui permettent de vérifier la qualité d'une huile essentielle. Il est donc important de les respecter pour un bon choix. Les huiles essentielles doivent être à 100% naturelles c'est à dire non dénaturées (pures, sans alcool, sans autres huiles essentielles proches et sans huiles végétales) et a 100% intégrales c'est à dire non déterpénées et aussi non rectifiées ni amputées (KOZIOL, 2015).

Selon KOZIOL (2015), les huiles essentielles doivent répondre à un certain nombre de critères :

- L'espèce botanique : il faut que leurs espèces botaniques soient identifiées et que leur nom soit inscrit en français mais aussi en latin précisant le genre et l'espèce ;
- L'organe producteur : la partie de la plante utilisée (feuilles, tige, racines...), il peut exister une différence qualitative et quantitative dans la même plante ;
- L'origine géographique doit être indiquée. Il apporte des précisions intéressantes sur les facteurs environnementaux (aussi appelés biotype) de la plante et permettent de déterminer une composition biochimique particulière. Une même plante poussant dans différents lieux géographiques peut fournir des huiles essentielles différentes ;
- Mode de culture (sauvage ou cultivée). Elle doit dans tous les cas porter le label "bio" ou le label "simple" qui assure que ces plantes ont été cultivées ou cueillies à l'abri des pollutions extérieures et avec un suivi strict ;
- Chémotype : Un même végétal peut sécréter des huiles essentielles biochimiquement différentes en fonction de son biotope (composition du sol, climat, ensoleillement). C'est pourquoi il a été créé la notion de chémotype. C'est une forme de classification

chimique, biologique et botanique définissant la molécule majoritairement présente dans une huile essentielle ;

- Le mode d'extraction des huiles essentielles que ce soit par hydrodistillation, par expression à froid, par solvant, par enfleurage ou encore l'extraction par CO₂ influence également sur la composition de l'huile obtenue qui diffère d'un mode d'extraction à un autre.

3.2.5.3. Rendement des huiles essentielles

Le rendement en huiles essentielles diffère selon les familles des plantes, ainsi que pour les plantes de la même variété botanique, il y a aussi une différence de rendement au niveau de la partie utilisée de la plante elle-même (racine, tige, fleur, feuille). On peut citer comme exemple le rendement de notre huile essentielle, *Thymus vulgaris* de la région d'Ain-Defla (2,8%) qui est relativement plus élevé que celui obtenue à Blida (Algérie) avec 1,58 % (BOUGUERRA *et al.*, 2017). Cette variabilité quantitative est liée directement aux facteurs intrinsèques (espèce, partie de plante utilisée, période de récolte), et extrinsèques (site géographique, sol, latitude et altitude, pluviométrie, séchage, méthode d'extraction) (NEZHADALI *et al.*, 2014).

3.2.5.4. Choix et description des plantes utilisées

Le choix des plantes est porté sur deux espèces le Thym *Thymus vulgaris* et la lavande *Lavandula angustifolia*.

3.2.5.4.1. Le thym (*Thymus vulgaris*)

Le thym, communément appelé "zaater" en Algérie ou *Thymus* en latin appartient à la famille des Lamiaceae, la tribu des Mentheae et à la sous-famille des Nepetoideae. C'est une herbe aromatique bien connue, elle se compose d'environ 215 espèces, c'est une plante herbacée vivace. La région méditerranéenne peut être décrite comme le centre du genre (CRONQUIST, 1988 ; MORALES, 2002 ; JAMZAD, 2010).

Les espèces constitutives de ce genre sont de détermination délicate en raison de la forte variabilité morphologique et florale et en raison de nombreuses hybridations interspécifiques (KABOUCHE, 2005). La classification de *Thymus vulgaris* est comme suit :

Embranchement	Spermaphyte
Classe	Dicotylédones
Ordre	Lamiale

Famille	Lamiaceae
Sous-famille	Nepetoideae
Tribu	Mentheae
Genre	<i>Thymus</i>
Espèce	<i>Thymus vulgaris</i> Linné., 1753

3.2.5.4.2. La lavande (*Lavandula angustifolia*)

La lavande, communément appelé "khozama" en Algérie ou *Lavandula* en latin appartient à la famille des Lamiaceae (DUPONT et GUIGNARD, 2007). La lavande vraie (*Lavandula angustifolia* Mill, également appelée *Lavandula officinalis* Chaix), est une plante aromatique et médicinale largement utilisée, dont l'arôme fort est principalement composé de linalol et d'acétate de linalyle. Les parties les plus précieuses de la plante sont les fleurs, mais les feuilles sont également riches en constituants volatils (ŁYCZKO *et al.*, 2019).

Lavandula angustifolia est originaire des régions montagneuses Méditerranéennes, avec de nombreuses propriétés thérapeutiques et activités biologiques (VERMA *et al.*, 2010). De nos jours, en raison de l'arôme bien reconnaissable, les plantes de lavande ou leurs dérivés trouvent des applications de nombreuse manière, telle la parfumerie, les cosmétiques et les produits ménagers, les agents antimicrobiens, les arômes alimentaires et l'amélioration de la saveur ou comme conservateurs alimentaires (PRUSINOWSKA et ŚMIGIELSKI, 2014 ; LESAGE-MEESSEN *et al.*, 2015). La classification de *Thymus vulgaris* est comme suit :

Embranchement	Spermaphyte
Classe	Dicotylédones
Ordre	Lamiales
Famille	Lamiaceae
Sous-famille	Nepetoideae
Tribu	Mentheae
Genre	<i>Lavandula</i>
Espèce	<i>Lavandula angustifolia</i> Mill., 1768

3.2.5.5. Présentation des zones de récolte

Les feuilles et les fleurs de *Thymus vulgaris* (Fig. 24, 25) et *Lavandula angustifolia* (Fig. 26, 27), utilisés dans cette étude ont été récoltés localement dans les régions de Arib et Mekhatria (Ain Defla, Algérie). La commune d'El Mekhatria, se situe à quelques kilomètres, au nord-ouest du chef-lieu de la wilaya d'Ain Defla. Elle est caractérisée par son

climat froid en hiver et chaud en été. Quant à la commune d'Arib, se situe à 15 kilomètres, au nord-ouest du chef-lieu de wilaya, sur un mamelon de la vallée très fertile du Chélif et bénéficie de la proximité du barrage d'eau de Sidi M'Hamed Bentaiba.



(Originale)

Figure 24 : *Thymus vulgaris* de la région de Mekhatria (mai 2018)



(Originale)

Figure 25 : *Thymus vulgaris* dans la région de Mekhatria (mai 2018)



(Originale)

Figure 26 : *Lavandula angustifolia* de la région d'Arib (avril 2018)



(Originale)

Figure 27 : *Lavandula angustifolia* dans la région d'Arib (septembre 2019)

Ce sont des plantes endémiques et très abondantes dans les campagnes environnantes. Ces deux plantes ont été identifiées au niveau du département de botanique de l'école nationale supérieure d'agronomie d'El Harrach (Tableau 4).

Tableau 4. Présentation des plantes aromatiques testées

Espèce végétale	Famille	Lieu de R	Cordonnés GPS (Localisation)	Date de récolte
<i>T. Vulgaris</i>	Lamiacée	Mekhatria	36° 20' N, 1° 57' E	Eté 2018
<i>L. angustifolia</i>	Lamiacée	Arib	36° 19' N, 2° 03' E	Eté 2018

Un sécateur avec lequel nous avons effectué les coupes des plantes, la récolte était mise dans des sacs en plastique en premier lieu, d'une contenance de 5 kg, puis transférée dans des sacs en papier d'une contenance de 300 g pour le séchage.

3.3. Échantillonnage effectué au laboratoire

Dans ce qui va suivre, nous présentons les travaux réalisés au niveau du laboratoire.

3.3.1. Biométrie des nids d'hiver

Nous avons échantillonné trois nids par arbre dans les reboisements soit 90 nids par station, contre 2 nids par arbre dans les forêts naturelles soit 60 nids par station. Le nombre de chenilles par nid, la mensuration (longueur et largeurs) et le poids des nids (Fig. 28), ont été effectués dans chaque station.



(Originale)

Figure 28 : Pesé du nid d'hiver

3.3.2. Biométrie des larves

Les lots des chenilles piégées sur terrain sont transportés au laboratoire pour prendre les données du poids et de longueur (Fig. 29). Nous avons pris un échantillon de 50 chenilles dans chaque station d'étude (200 chenilles au total). Pour le matériel nous avons utilisé un pied à coulisse pour prendre les mensurations et une balance électronique pour la pesée.



(Originale)

Figure 29 : Biométrie des larves

3.3.3. Conditionnement des chenilles de la nymphose

Les lots de chenilles sont ensuite conditionnés dans des tubes à essais en verre, de 10 cm de longueur et 1 cm de diamètre, ouvert des deux côtés, les tubes sont étiquetés et numérotés (Fig. 30).

Après le conditionnement, les tubes sont fermés à l'aide de tampons en coton, des deux côtés, pour permettre l'aération. Le matériel biologique était contrôlé quotidiennement et se conserve à une température relativement stable (26 °C) et une humidité relative de 65%. Durant cette phase les chenilles sont très urticantes, mais aussi très fragile, il faut les manipuler soigneusement pour ne pas les écraser.



(Originale)

Figure 30 : Conditionnement des chenilles de la nymphe

3.3.4. Biométrie des chrysalides

Après quelques jours les chenilles conditionnées dans les tubes, commencent de se transformer en chrysalide (Fig. 31). Après la transformation des chenilles en chrysalide, et à l'aide d'une pince, nous avons débouché les tubes et ressortir les chrysalides pour effectuer la pesée et la mensuration de la longueur de la chrysalide (Fig. 32).



(Originale)

Figure 31 : Transformation des chenilles en chrysalides



(Originale)

Figure 32 : Biométrie des chrysalides

3.3.5. Conditionnement des chrysalides

Après la mensuration des chrysalides nous avons effectué les opérations suivantes :

- Numérotation de petits blocs en carton (2x2x4cm), qui sont bouché en bas par du coton et fermé en haut par un filet en plastique qui porte des micros trous (Fig. 33).



(Originale)

Figure 33 : Conditionnement des chrysalides

- Les chrysalides sont introduites dans ces blocs (une par bloc), pour poursuivre leur cycle phénologique, et arriver à la métamorphose complète.
- Les blocs sont contrôlés quotidiennement pour relever toutes les informations possibles, (dates d'émergence des adultes, parasites...).

3.3.6. Biométrie des adultes après l'émergence et leur identification

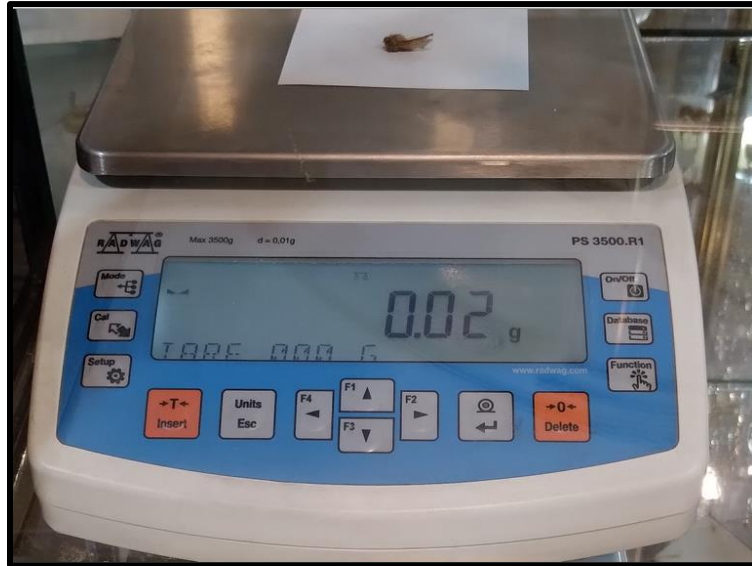
La chronologie de l'émergence des adultes est très variable, entre les lots de la même station et aussi entre les stations. À la mi-août, les imagos commencent à émerger (Fig. 34). Les visites quotidiennes des lots biologiques nous ont permis de prendre beaucoup de renseignements sur la fluctuation d'émergence des imagos.



(Originale)

Figure 34 : Imagos de chenille processionnaire après l'émergence

Après l'émergence, nous avons pris des mensurations de la longueur, de la largeur des ailes et du poids du corps (Fig. 35), nous avons aussi identifié le sexe des imagos.



(Originale)

Figure 35 : Mensuration des imagos

Comme premier constat, nous avons observé qu'il y avait des chrysalides déformées, qui n'étaient pas arrivées au stade final de leurs développement et d'autre parasitées (Fig. 36).



(Originale)

Figure 36 : Chrysalides déformées

3.3.7. Identification des parasites des nymphoses

Les parasites qui ont émergés des chrysalides, sont restés piégés dans les tubes et les blocs, ce qui nous a permis de les tuer et procéder à leurs identifications (Fig. 37).



(Originale)

Figure 37 : Chrysalide parasitée

3.3.8. Biométrie et conditionnement des manchons

Dans un premier volet, à l'aide d'un pied à coulisse, les longueurs des manchons sont relevées sur un lot de 20 pontes dans les forêts naturelles et 30 pontes pour les reboisements. Dans le second, nous avons procédé à leur mensuration. Les lots de manchons sont ensuite conditionnés dans des tubes à essais en verre, de 10 cm de longueur et 1 cm de diamètre, ouvert des deux côtés, les tubes sont étiquetés et numérotés (Fig. 38).



(Originale)

Figure 38 : Conditionnement des manchons dans des tubes en verre

3.3.9. Évaluation du nombre d'œufs par ponte

Dans un deuxième volet, sous une loupe binoculaire, nous avons réalisé, un comptage des œufs. Nous avons laissé les manchons 50 jours pour s'assurer de l'éclosion totale. Puis nous avons procédé au comptage des œufs. Les manchons ont été écaillés à l'aide d'un ruban adhésif pour pouvoir voir et compter les œufs qu'ils portent, puis à l'aide de feutres de différentes couleurs, nous avons tracé une ligne sur les œufs afin de les repérer visuellement pour faciliter le comptage (Fig. 39).



(Originale)

Figure 39 : Évaluation du nombre d'œufs par ponte

Durant cette opération nous avons relevé le nombre d'œufs éclos, non éclos et ceux présentant des trous de sortie de parasites (trous de couleur sombre) (Fig. 40).



(Originale)

Figure 40 : Trous sombre (trous de sortie de parasites)

3.3.10. Identification des parasites des œufs

Après l'éclosion totale des œufs, nous avons procédé à l'identification des parasites que sont resté piégés dans les tubes.

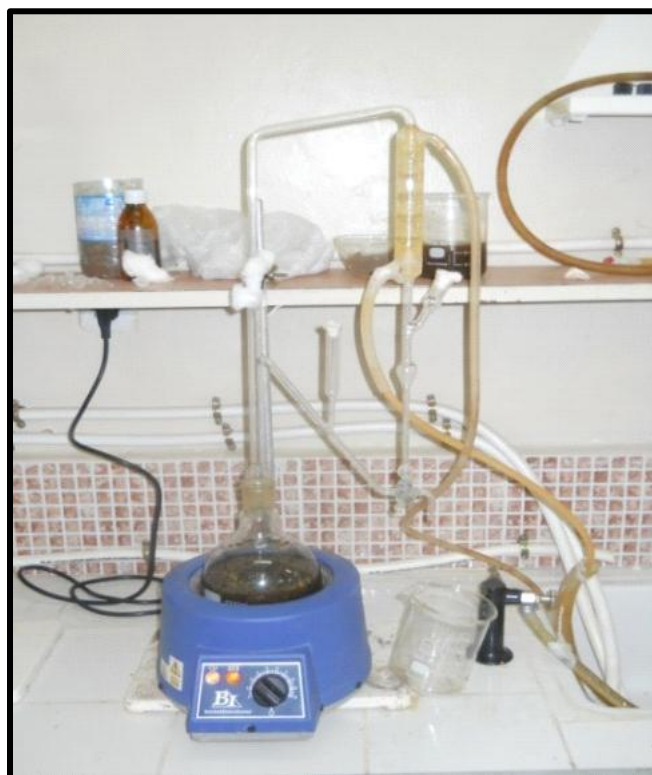
3.3.11. Utilisation des extraits des huiles de plantes contre les chenilles processionnaires

Dans cette partie, notre étude est organisée dans l'objectif d'évaluer l'activité larvicide des huiles essentielles de deux plantes appartenant à la famille des lamiacées, en l'occurrence, le thym (*Thymus vulgaris*) et la lavande (*Lavandula angustifolia*) contre la chenille processionnaire dans les conditions *in vivo* et *in vitro*.

3.3.11.1. Méthode d'extraction des huiles essentielles des plantes choisies par la technique d'hydrodistillation

Il existe plusieurs méthodes d'extraction des huiles essentielles, parmi lesquelles, l'hydrodistillation, ou bien l'entraînement à la vapeur d'eau, c'est la seule technique disponible au niveau de notre laboratoire. Elle consiste à utiliser l'entraînement des substances aromatiques par la vapeur d'eau.

Les feuilles du *Thymus vulgaris* et *Lavandula angustifolia* sont récoltées et desséchées à température ambiante pendant six jours. L'extraction de l'huile est réalisée au niveau du laboratoire de bio végétale, sur un montage d'hydrodistillation de type Cleveinger (Fig. 41).



(Originale)

Figure 41 : Système d'extraction par hydro distillation

Des échantillons de 100 g de feuilles du *Thymus vulgaris* séchées sont mise avec 500 ml d'eau distillée dans le ballon de Hydro distillateur, le tout est porté à température d'ébullition (100 °C). Lorsque l'ébullition de l'eau commence on baisse la température à 50 °C pour que les cellules du végétal prennent le temps pour éclater et ainsi libérer les essences aromatiques. L'huile essentielle est recueillie par décantation à la fin de la distillation, puis filtrée et mise dans des flacons sombres étiquetés et enfin stockée à 4 °C dans l'obscurité (AMARTI *et al.*, 2010). La même opération a été faite pour la *Lavandula angustifolia*. Nous avons poursuivi les extractions jusqu' à atteindre les quantités d'huiles dont nous avons besoin.

3.3.11.2. Méthode d'application des huiles essentielles contre les chenilles

Notre premier objectif de travail été de tester l'efficacité insecticide des huiles essentielles contre la chenille processionnaire du pin à différents stades biologiques : le stade larvaire numéro trois et le stade larvaire numéro Cinq (le stade mature des chenilles).

Il existe plusieurs manières de lutter biologiquement en utilisant les huiles essentielles. Selon nos recherches, la méthode qui consiste à mettre en contact l'huile avec l'insecte est la plus adéquate, cette approche nous a facilité les traitements sur terrain et nous a évité, par la même, le contact avec les poils urticants.

Après les tests préliminaires que nous avons fait pour déterminer les doses des traitements, nous avons commencé ces derniers au niveau du laboratoire (*In vitro*) sur les deux stades larvaires, trois et cinq.

3.3.11.2.1. Test par contact au laboratoire sur les stades larvaire L3 et L5

Dans le reboisement de Babor, nous avons collecté un nombre suffisant de chenilles de troisième et cinquième stade larvaire, pour les essais au laboratoire.

Cette collecte a été faite suite à la collaboration des techniciens de la direction des forêts qui nous ont fourni toutes les informations qu'ils avaient à leur niveau sur les différences morphologiques observables sur les différents stades larvaires.

Ces différences (tailles des insectes, taille de leurs poils urticants, leurs agressivité) sont confirmées par la période de collecte des chenilles mais la différence morphologique la plus marquante se situe au niveau des têtes des chenilles (taille de la tête).

Le solvant organique utilisé dans la présente étude est l'éthanol. L'éthanol (le témoin) a subi une série de dilution jusqu'à l'obtention d'une dose qui n'a aucune influence sur les chenilles après des tests sur celles-ci. Les pourcentages de concentration d'éthanol

sélectionnés sont de 5% pour le stade trois et 10% pour le stade cinq au niveau du terrain, puis de 5 % au niveau du laboratoire pour les deux stades larvaires.

Nous avons apporté les insectes au laboratoire d'entomologie, puis nous avons mis un lot de cinquante (50) chenilles dans un récipient de diamètre de 20 cm et pulvérisé dessus les chenilles directement par la solution de l'huile essentielle en veillant à bien imbibé tous les individus.

Après l'application des traitements nous avons mis une bouture du pin d'Alep cueillie sur le même arbre d'où nous avons prélevé les chenilles dans le récipient, cette opération avait pour but d'assurer la nourriture des chenilles survivantes, et enfin nous avons couvert tout le récipient par un filet pour empêcher les chenilles de s'échapper. Une surveillance a été faite d'une manière journalière durant 5 jours.

Les doses des traitements des stade larvaires trois et cinq, sont portées dans les tableaux 5 et 6 respectivement.

Pour les chenilles processionnaires du stade larvaire trois, nous avons mélangé les doses des huiles avec 1,5 ml d'éthanol. Cependant pour les chenilles processionnaires du stade larvaire 5 nous avons mélangé les huiles préparées avec 2,5 ml de l'éthanol. Le pourcentage d'éthanol utilisé était de 5%.

L'ensemble complet des tests était répété trois fois pour chaque dose d'huile essentielle.

Tableau 5. Doses des traitements *in vitro* du stade larvaire trois

Dose(ml)	D1	D2	D3	D4	D5	D6
<i>T. vulgaris</i>	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	
<i>L. angustifolia</i>	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06

Tableau 6. Doses des traitements *in vitro* du stade larvaire cinq

Dose (ml)	D1	D2	D3	D4	D5
<i>T. vulgaris</i>	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
<i>L. angustifolia</i>	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12

Le but des traitements *in vitro*, est d'isoler les chenilles des facteurs externes pour observer leurs comportements, agglomération (effet de masse) ou dispersion.

3.3.11.2.2. Test par contact, sur terrain, sur les stades larvaires L3 et L5

Sachant que les pourcentages d'éthanol sélectionnés au niveau du terrain, préalablement, sont de 5% pour le stade trois et de 10% pour le stade cinq, et avant de préparer les différentes concentrations nous avons donc déterminé, dès le départ, le volume qu'il fallait pour imbiber entièrement le nid visé par le biais d'essais à l'eau distillée, car les nids comprennent un nombre d'individus variable. Le volume déterminé est de 10 ml pour les nids dont les dimensions varient entre 6 et 9 cm de largeur et entre 10 et 13 cm de longueur.

Sur le terrain, dans le reboisement de Babor, nous avons procédé à l'application directe des traitements sur les arbres parasités par les nids d'hivers, afin de tester l'efficacité des huiles essentielles face aux facteurs extrinsèques. Pour cela, nous avons préparé 5 différentes concentrations d'huiles, sélectionnée après un test préliminaire, les doses sont illustrées dans les tableaux 7 et 8.

Tableau 7. Doses des traitements *in vivo* du stade larvaire trois

Dose (ml)	D1	D2	D3	D4	D5
<i>T. vulgaris</i>	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
<i>L. angustifolia</i>	0,2	0,4	0,6	0,8	1

Tableau 8. Doses des traitements *in vivo* du stade larvaire cinq

Dose (ml)	D1	D2	D3	D4	D5
<i>T. vulgaris</i>	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
<i>L. angustifolia</i>	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5

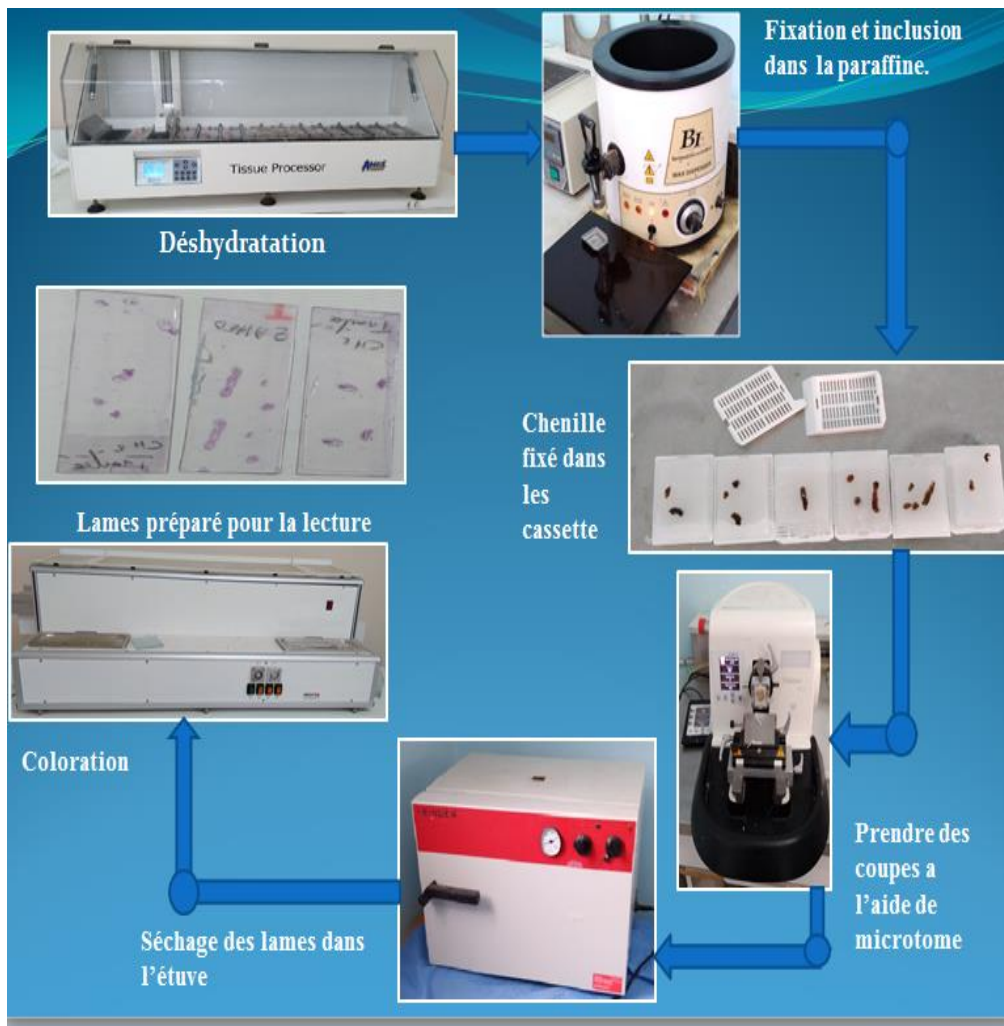
Les concentrations d'huiles utilisés sont mélangées avec l'éthanol pour arriver à un volume de 10 ml est mise dans un pulvérisateur d'une contenance de 20 ml.

Des pulvérisations directes sur les nids ont été appliquées en veillant à bien les imbiber. Sur chaque arbre traité, nous avons choisi un seul nid, orienté au hasard, à une hauteur variante entre 1 et 1,5 mètres pour faciliter son contrôle.

Les traitements sont faits en période matinale. Les observations assurées quotidiennement, durant sept jours, nous ont permis de nous assurer de la fiabilité des résultats, de plus nous avons appliqué un filet en forme de panier, autour des nids traités, dans le but d'empêcher les chenilles survivantes de s'échapper, et en prévision de le nourrir, nous y avons ajouté des aiguilles du pin d'Alep. Nous avons laissé une distance de 40 cm entre le fond du panier et l'orifice du nid.

3.3.11.3. Effet des huiles sur l'histologie de l'insecte

Pour vérifier les éventuels effets histopathologiques des huiles essentielles, nous avons effectué des coupes histologiques dans les cellules épidermiques des larves traitées et témoins, la figure 42, représente les principales étapes d'anapath utilisé dans cette expérience. L'étude histologique a été réalisée selon la méthode adoptée par les auteurs RUIZ *et al.* (2004), BEN KHEDHER *et al.* (2017) au niveau du laboratoire d'histologie de l'hôpital Parnet (Alger). Les larves traitées ont été fixées par du formol à 10%, et conservés à 4 °C, ensuite déshydratés à l'éthanol, lavés dans le toluène à 100%, puis on procède à leur inclusion dans la paraffine. À l'aide d'un microtome nous avons effectué de fines coupes sagittales et longitudinales, puis déparaffinées dans le toluène à 100%, enfin les sujets sont colorés à l'hématoxylineosine. Les coupes histologiques des sujets traités sont comparées à ceux des témoins sains, des photographies des coupes obtenues ont été faites sous un microscope optique.



(Originale)

Figure 42 : Les différentes étapes de l'anapath

3.3.11.4. Analyse chimique des huiles essentielles

Les composants de l'huile essentielle extraite des feuilles et des fleurs de *T. vulgaris* et de *L. angustifolia*, ont été analysés à l'aide d'une chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse (GC-MS) de type GC de Hewlett-Packard Agilent (série HP6890), équipé d'un MS (HP 5973), contenant une colonne capillaire HP-5MS (30 m × diamètre interne de 0,25 mm recouverts de 5 % de phényl méthyl silicone et de 95 % de diméthyl polysiloxane, avec une épaisseur de film de 0,25 mm).

Les conditions de la colonne sont les suivantes : le gaz vecteur est l'hélium (0,5 ml/min), la température du four a été programmée à partir de 60 °C pendant 8 min puis augmentée à 250 °C/min à une vitesse de 2 °C/min, puis tenue isotherme pendant 10 min. La durée d'analyse est de 113 min avec une température d'injecteur de 250 °C. L'injection se fait par mode split avec un rapport de 1/50, la quantité d'huile injectée est de 0.2 µl. La température de la source d'ions étant de 230 °C.

La GC/spectrométrie de masse (L'analyse MS) a été réalisée avec un spectromètre de masse quadripolaire, l'appareil fonctionne par impacte électronique et la fragmentation est réalisée dans un champ électrique de 70eV avec un courant ionique total de (30 à 550 amu).

Les composants des huiles de *T. vulgaris* et de *L. angustifolia* ont été évalués selon les indices linéaires de Kovats (KI), leurs temps de rétention et leurs spectres de masse ont été identifiés par comparaison avec une bibliothèque de spectres -NIST2 a WILEY7 et avec la littérature sur les spectres de masse (ADAMS, 2001).

3.4. Exploitation des résultats par les méthodes statistiques

L'utilisation des analyses statistiques est relativement simple, c'est pour illustrer ou bien trouver une structure dans les données, cette structure est définie par un croisement entre deux ou plusieurs variables. Cette structure peut être un tableau, un graphe, un histogramme, une courbe, un nuage de point etc., ceci nous facilitera l'interprétation et la lecture des résultats et leur donnera une crédibilité. Plusieurs méthodes d'analyses statistiques ont été exploitées dans le but de tirer des informations sur cette étude.

3.4.1. Analyse descriptive

Les statistiques descriptives amènent à analyser et expliquer des données pour trouver un rendu final. Elles ont essentiellement pour but de présenter les résultats obtenus sous une forme simple et facile à lire. Les statistiques descriptives sont la base de toute analyse de

données. En effet, avant d'approfondir l'analyse dans les détails, il faut commencer par la description globale à l'aide de ces statistiques (YVES, 2010).

Cette analyse descriptive a impliqué le calcul des moyennes et des écarts types. Ceux-ci ont été réalisés à l'aide du logiciel SPSS.

Variance, (σ^2) = moyenne de l'écart au carré de valeurs par rapport à la moyenne

Étant donnée une série statistique d'un variable réelle (x_1, x_2, x_3, \dots), dont on calcule la moyenne (m). La variance est obtenue par la formule suivante (YVES, 2010) :

$$\sigma^2 = \sum(x_i - m)^2 / n - 1$$

Σ : est un symbole qui signifie qu'il faut effectuer une somme.

x_i : représente la nième valeur de la distribution.

m : représente la moyenne de l'échantillon

L'écart-type d'une variable discrète composée de n observations est la racine carrée positive des variances et se définit comme suit (YVES, 2010) :

Écart-type (S) = Racine carrée de la variance

3.4.2. Calcul de la DL (dose létale)

Les résultats des tests de sensibilité larvaires ont été exprimés en pourcentage de mortalité en fonction des concentrations d'huile essentielle utilisée. Si le pourcentage de mortalité chez les témoins est supérieur à 5%, le pourcentage de mortalité chez les larves exposées à l'huile essentielle doit être corrigé en utilisant la formule d'Abbot (ABBOT, 1925):

$$MC = \frac{MO - MT}{100 - MT} \times 100$$

MC : taux de mortalité corrigée

MT : taux de mortalité observée chez les témoins

MO : mortalité observée

Si la mortalité chez les témoins excède 20 %, le test est invalide et doit être recommencé. Pour la saisie et le traitement statistique des données, nous avons utilisé le logiciel d'analyse SPSS. Les différences entre la toxicité de contact des extraits d'huiles des deux plantes ont été déterminées selon le test d'analyse de variance (Anova). Le seuil de probabilité pris en considération est de $p = 0,01$.

Pour évaluer l'efficacité de la toxicité des huiles, les doses léthales (DL) pour chaque espèce de plante sont calculés.

Pour arriver à trouver les DL10, DL50 et DL90, les doses (DL) et les taux de mortalité (10%, 50%, 90%) ont été transformé en logarithmes en probits à l'aide du tableau des probits. Cela nous a permis d'obtenir des équations de droites de régression selon FINNEY (1971) :

$$Y = ax + b$$

Y: Probit de mortalité.

X: logarithme la dose pour DL10, DL50 et DL90.

3.4.3. Test d'ANOVA

En statistique, l'analyse de la variance (terme en anglais ANOVA : analysis of variance), est un ensemble de modèles statistiques utilisés pour vérifier si les moyennes des groupes proviennent d'une même population (YERGEAU et POIRIER, 2013). L'analyse de variance est basée sur trois hypothèses, la distribution normale des populations, homogénéité des variances, et les échantillons indépendants (MODER, 2010). En effet, l'ANOVA est un moyen de savoir si les résultats de l'étude ou de l'expérience sont significatifs. En d'autres termes, il nous aide à déterminer si nous devons rejeter l'hypothèse nulle ou accepter l'hypothèse alternative.

Chapitre 4

Chapitre 4 : Résultats sur la bio-écologie de la chenille processionnaire du pin, sur la lutte par l'utilisation des huiles essentielles et le piégeage des mâles par les phéromones sexuelles.

Dans ce chapitre nous présentons les résultats sur les nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin d'Alep (effectifs, densités, orientations, biométries), le piégeage des chenilles partant en procession de nymphose, les paramètres de pontes, l'effectif et la biométrie des chenilles et des adultes et les résultats sur la lutte par l'utilisation des huiles essentielles et le piégeage des mâles par les phéromones sexuelles dans les forêts de reboisements et les forêts naturelles.

4.1. Résultats sur les nids d'hiver

Dans cette partie nous développons les résultats sur la distribution des nids en fonction de la hauteur des arbres, l'estimation de la densité des nids d'hiver, la biométrie des nids d'hiver, les effectifs des chenilles trouvées dans les nids d'hiver et l'orientation des nids d'hiver.

4.1.1. Distribution des nids en fonction de la hauteur des arbres

Dans le tableau 9, nous avons reporté les valeurs de la hauteur moyenne des nids d'hiver de la chenille processionnaire par rapport au sol dans les quatre stations d'étude.

Tableau 9. Hauteur (en mètre) des nids d'hiver de *Thaumetopoea pityocampa*

Paramètres		Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Nombre d'arbre
Station 1	Transect 1	5,5	9,5	7,05	1,27	10
	Transect 2	4,5	9	6,83	1,27	10
	Transect 3	5	10	8,02	1,48	10
Station 2	Transect 1	1	7	4,26	2,02	10
	Transect 2	1,3	7,5	3,74	1,97	10
	Transect 3	1,2	8,5	4,32	2,02	10
Station 3	Transect 1	1,2	7	3,44	1,43	10
	Transect 2	0,6	5	2,56	1,32	10
	Transect 3	0,7	6,3	2,89	1,29	10
Station 4	Transect 1	0,2	2	0,82	0,45	10
	Transect 2	0,2	2	0,79	0,47	10
	Transect 3	0,2	2,2	0,93	0,62	10

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Les résultats obtenus dans le tableau 9, indiquent que les nids d'hivers dans la forêt naturelle du mont Doui se situent entre 4,5 m et 10 m avec une moyenne comprise entre 6,83

$\pm 1,27$ et $8,02 \pm 1,48$ m. Cependant dans la forêt naturelle de Temoulgha, la hauteur oscille entre 1 et 8,5 m, avec une moyenne comprise entre $3,74 \pm 1,97$ et $4,32 \pm 2,02$ m. Par ailleurs au niveau du reboisement de Babor, la hauteur des nids oscille entre 0,5 et 7 m avec une moyenne comprise entre $2,56 \pm 1,32$ et $3,44 \pm 1,43$ m. La quatrième station, celle du reboisement de Temoulgha est caractérisée par une hauteur des nids plus basse que celles enregistrées dans les autres stations, nous signalons que la hauteur est comprise entre 0,2 et 2,2 m avec une moyenne comprise entre $0,79 \pm 0,47$ et $0,93 \pm 0,62$ m.

4.1.2. Estimation de la densité des nids d'hiver

Les valeurs de la densité de nids d'hivers au niveau des quatre stations sont reportées dans le tableau 10.

Tableau 10. Densité des nids d'hiver dans les quatre stations d'étude

	Paramètre	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type	Nombre total de nids
Station 1	Transect 1	1	2	1,2	0,42	12
	Transect 2	1	4	1,7	0,95	17
	Transect 3	1	3	1,7	0,67	17
Station 2	Transect 1	2	3	2,5	0,53	27
	Transect 2	2	3	2,63	0,52	26
	Transect 3	2	3	2,75	0,46	25
Station 3	Transect 1	3	4	3,1	0,32	31
	Transect 2	3	5	3,5	0,71	35
	Transect 3	3	5	3,4	0,7	34
Station 4	Transect 1	3	4	3,2	0,42	32
	Transect 2	3	5	3,5	0,85	35
	Transect 3	3	5	3,3	0,67	33

Min. : minimum ; Max : maximum ; Moy. : moyenne ; Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

La station 1, celle de la forêt naturelle du mont Doui est faiblement infestée, le nombre de nid selon les trois transects prospectés varie entre 12 et 17 nids d'hiver par transect et une moyenne de nid par arbre qui varie entre $1,2 \pm 0,42$ nids et $1,7 \pm 0,67$ nids. Quant à la station 2, celle de la forêt naturelle de Temoulgha, elle est un peu plus infestée que la station 1. Le nombre de nid selon les trois transects prospectés varie entre 25 et 27 nids d'hiver par transect et une moyenne de nid par arbre qui varie entre $2,5 \pm 0,53$ nids et $2,75 \pm 0,46$ nids.

Cependant les deux dernières stations sont plus infestées que les autres, le nombre total de nids dans la station 3 (reboisement de Babor) varie entre 31 et 35 nids d'hiver par

transect et une moyenne de nid par arbre qui varie entre $3,1 \pm 0,32$ nids et $3,5 \pm 0,71$ nids. Par ailleurs, dans la station 4 (reboisement de Temoulgha), le nombre total de nids varie entre 32 et 35 nids d'hiver par transect et une moyenne de nid par arbre qui varie entre $3,2 \pm 0,42$ nids et $3,5 \pm 0,85$ nids.

4.1.3. Biométrie des nids d'hiver

Les mensurations et les poids des nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin dans les quatre stations d'étude sont reportées dans les tableaux 11, 12, 13, 14.

Tableau 11. Biométrie et poids des nids d'hiver de *Thaumetopoea pityocampa* récoltés dans la station 1 (forêt naturelle du mont Doui)

	Paramètre	Transect 1	Transect 2	Transect 3
Longueur (cm)	Minimum	5	6,5	6
	Maximum	14	15	13,5
	Moyenne	10,12	10,29	9,99
	Ecart-type	2,62	2,93	2,29
Largeur (cm)	Minimum	4,5	4	4,5
	Maximum	8	9,1	9,5
	Moyenne	5,92	6,71	7,11
	Ecart-type	1,10	1,39	1,55
Poids (g)	Minimum	30	39	39
	Maximum	80	111	111
	Moyenne	56,71	75,06	78,68
	Ecart-type	15,88	24,91	21,38

Dans la forêt naturelle du mont Doui, la longueur des nids d'hiver varie entre 5 et 6 cm, quant à la moyenne elle varie entre $9,99 \pm 2,29$ cm et $10,29 \pm 2,93$ cm. Pour ce qui concerne la largeur des nids d'hiver, elle fluctue entre 4 et 9,5 cm avec une moyenne qui se situe entre $5,92 \pm 1,10$ cm et $7,11 \pm 1,55$ cm. Le poids des nids d'hiver varie entre 30 et 111 g, avec une moyenne qui varie entre $56,71 \pm 15,88$ g et $78,68 \pm 21,38$ g.

Dans la forêt naturelle de Temoulgha, la longueur des nids d'hiver varie entre 5 et 24 cm, quant à la moyenne elle varie entre $12,64 \pm 5,07$ cm et $16,16 \pm 3,90$ cm. Pour ce qui concerne la largeur des nids d'hiver, elle fluctue entre 4 et 15 cm avec une moyenne qui se situe entre $8,08 \pm 2,51$ cm et $9,38 \pm 2,61$ cm. Le poids des nids d'hiver varie entre 8 et 360 g, avec une moyenne qui varie entre $76,04 \pm 59,86$ g et $95,88 \pm 78,88$ g (Tab. 12).

Tableau 12. Biométrie et poids des nids d'hiver de *Thaumetopoea pityocampa* récoltés dans la station 2 (forêt naturelle de Temoulgha)

	Paramètre	Transect 1	Transect 2	Transect 3
Longueur (cm)	Minimum	5	10	6
	Maximum	24	24	22
	Moyenne	12,64	16,16	14,85
	Ecart-type	5,07	3,90	4,40
Largeur (cm)	Minimum	4	5	4
	Maximum	12	14	15
	Moyenne	8,82	9,38	8,08
	Ecart-type	2,52	2,61	2,51
Poids (g)	Minimum	30	31	8
	Maximum	169	360	242
	Moyenne	82,12	95,08	76,04
	Ecart-type	36,65	78,88	59,86

Dans le reboisement de Babor, la longueur des nids d'hiver varie entre 4 et 6 cm, quant à la moyenne elle varie entre $9,67 \pm 2,70$ cm et $12,23 \pm 3,72$ cm. Pour ce qui concerne la largeur des nids d'hiver, elle fluctue entre 3 et 13 cm avec une moyenne qui se situe entre $6,98 \pm 2,42$ cm et $8,0 \pm 2,70$ cm. Le poids des nids d'hiver varie entre 8 et 300 g, avec une moyenne qui varie entre $58,71 \pm 43,92$ g et $88,10 \pm 74,18$ g (Tab. 13).

Tableau 13. Biométrie et poids des nids d'hiver de *Thaumetopoea pityocampa* récoltés dans la station 3 (reboisement de Babor)

	Paramètre	Transect 1	Transect 2	Transect 3
Longueur (cm)	Minimum	5	6	4
	Maximum	16	20	18
	Moyenne	9,67	12,23	11,17
	Ecart-type	2,70	3,72	3,06
Largeur (cm)	Minimum	3	4	3
	Maximum	13	13	12
	Moyenne	6,98	8	7,73
	Ecart-type	2,42	2,70	2,43
Poids (g)	Minimum	8	18	9
	Maximum	200	300	274
	Moyenne	58,71	88,03	88,10
	Ecart-type	43,92	71,92	74,18

Dans le reboisement de Temoulgha, la longueur des nids d'hiver varie entre 3 et 25 cm, quant à la moyenne elle varie entre $9,33 \pm 2,38$ cm et $10,33 \pm 3,89$ cm. Pour ce qui concerne la largeur des nids d'hiver, elle fluctue entre 3 et 15 cm avec une moyenne qui se situe entre

6,63 ± 2,17 cm et 7,33 ± 2,81 cm. Le poids des nids d'hiver varie entre 6 et 430 g, avec une moyenne qui varie entre 51,97 ± 42,29 g et 60,40 ± 46,95 g (Tab. 14).

Tableau 14. Biométrie et poids des nids d'hiver de *Thaumetopoea pityocampa* récoltés dans la station 4 (reboisement de Temoulgha)

	Paramètre	Transect 1	Transect 2	Transect 3
Longueur (cm)	Minimum	4	6	3
	Maximum	18	14	25
	Moyenne	10,33	9,33	9,77
	Ecart-type	3,89	2,38	4,34
Largeur (cm)	Minimum	3	3	4
	Maximum	15	11	11
	Moyenne	7,33	6,63	6,63
	Ecart-type	2,81	2,17	2,20
Poids (g)	Minimum	6	12	7
	Maximum	182	210	430
	Moyenne	51,97	60,40	58,4
	Ecart-type	42,29	46,95	80,21

4.1.4. Effectifs des chenilles trouvées dans les nids d'hiver

Les effectifs des chenilles processionnaires trouvées dans les nids d'hiver dans les quatre stations d'échantillonnage sont mentionnés dans le tableau 15.

Tableau 15. Nombre de chenilles processionnaires récupérées des nids d'hiver

	Paramètre	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Nombre total de nids
Station 1	Transect 1	40	99	70	18,29	12
	Transect 2	30	113	73,06	25,61	17
	Transect 3	36	123	80,94	23,50	17
Station 2	Transect 1	10	120	58,72	31,92	25
	Transect 2	21	268	79,32	61,48	25
	Transect 3	9	233	73,65	69,35	26
Station 3	Transect 1	15	230	60,03	45,30	30
	Transect 2	7	235	86,83	67,36	30
	Transect 3	12	290	92,37	78,25	30
Station 4	Transect 1	7	180	50,73	38,44	30
	Transect 2	22	220	70,83	49,33	30
	Transect 3	13	530	75,07	96,97	30

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Le nombre de chenilles processionnaires trouvées dans les nids d'hiver collectés au niveau de la forêt naturelle du mont Doui varie entre 30 et 123 chenilles par nid avec une moyenne qui

se situe entre $70 \pm 18,29$ et $80,94 \pm 23,50$ chenilles par nid. Par ailleurs dans la forêt naturelle de Temoulgha, le nombre de chenilles processionnaire varie entre 9 et 268 chenilles par nid avec une moyenne qui se situe entre $58,72 \pm 31,92$ et $79,32 \pm 61,48$ chenilles par nid.

Au niveau du reboisement de Babor, le nombre de chenilles processionnaire varie entre 7 et 290 chenilles par nid avec une moyenne qui comprise entre $60,03 \pm 45,30$ et $92,37 \pm 78,25$ chenilles par nid. Dans l'autre reboisement de Temoulgha, le nombre de chenilles processionnaire varie entre 7 et 530 chenilles par nid avec une moyenne qui se situe entre $50,73 \pm 38,44$ et $75,07 \pm 96,97$ chenilles par nid.

4.1.5. Orientation des nids d'hiver

L'orientation des nids d'hivers selon les différentes expositions dans la forêt naturelle du mont Doui montre que 34,8% (16 nids) se trouvent au centre au niveau de la frondaison du pin d'Alep. Le reste des nids sont exposés vers l'Est (11 nids ; 23,9%), le Sud (8 nids ; 17,4%), le Nord (7 nids ; 15,2%) et l'Ouest (4 nids ; 8,70%) (Fig. 43).

Dans la forêt naturelle de Temoulgha les nids sont exposés vers le Sud avec 32 nids (41,56%), suivi par l'Est avec 15 nids (19,48%), l'Ouest et le centre avec 14 nids chacune (18,18%). Cependant l'exposition Nord est la plus faible avec 2 nids (2,60%) (Fig. 44).

Dans le reboisement de Babor l'exposition Sud a été la plus recherchée par les chenilles pour installer leurs nids d'hiver avec 42 nids (46,7%), elle est suivie par le centre avec 19 nids (21,1%), l'Ouest avec 15 nids (16,7%) et l'Est avec 11 nids (12,2%). L'exposition Nord est la plus faible dans cette station avec seulement 3 nids (3,3%) (Fig. 45).

Dans le reboisement de Temoulgha, l'exposition Ouest est la plus recherchée par les chenilles processionnaires avec 33 nids (33,0%), elle est suivie par l'exposition Sud (26 nids ; 26,0%) et le centre (25 nids ; 25,0%). Du côté Est nous avons dénombré 15 nids d'hiver (15,0%) (Fig. 46).

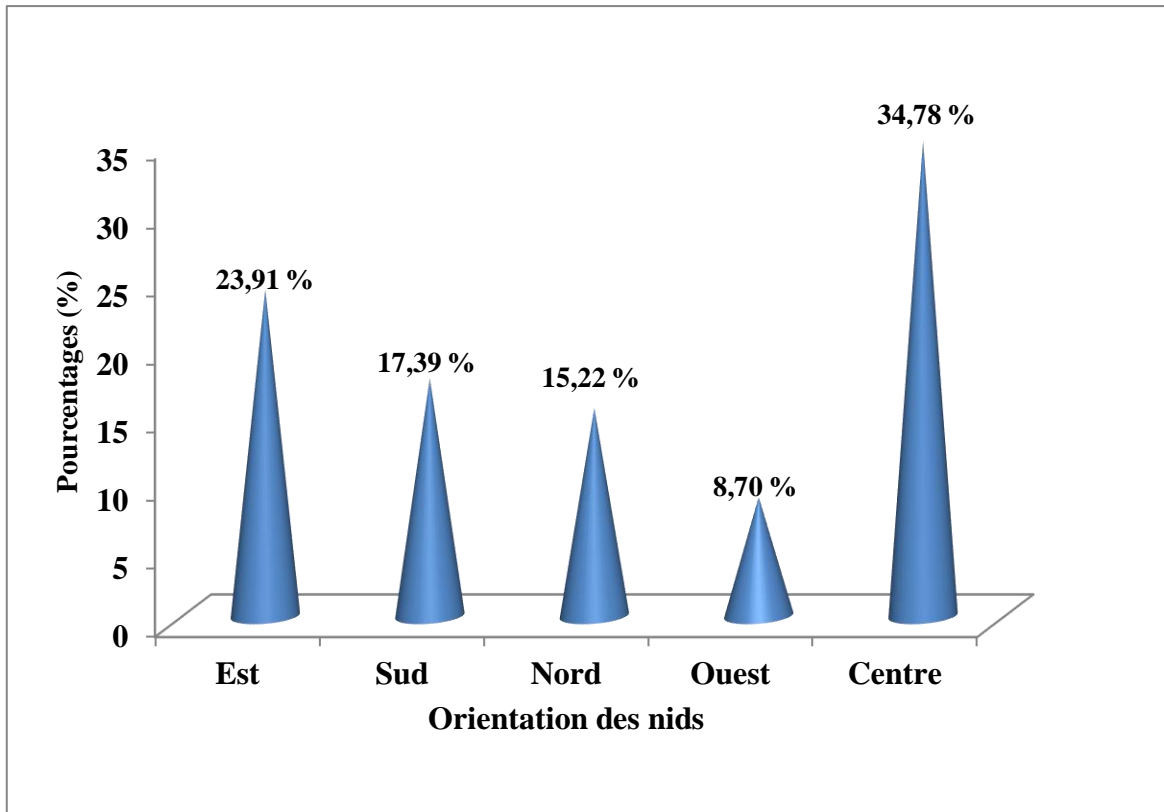


Figure 43 : Orientation des nids d’hiver dans la station 1 (forêt naturelle du mont Doui)

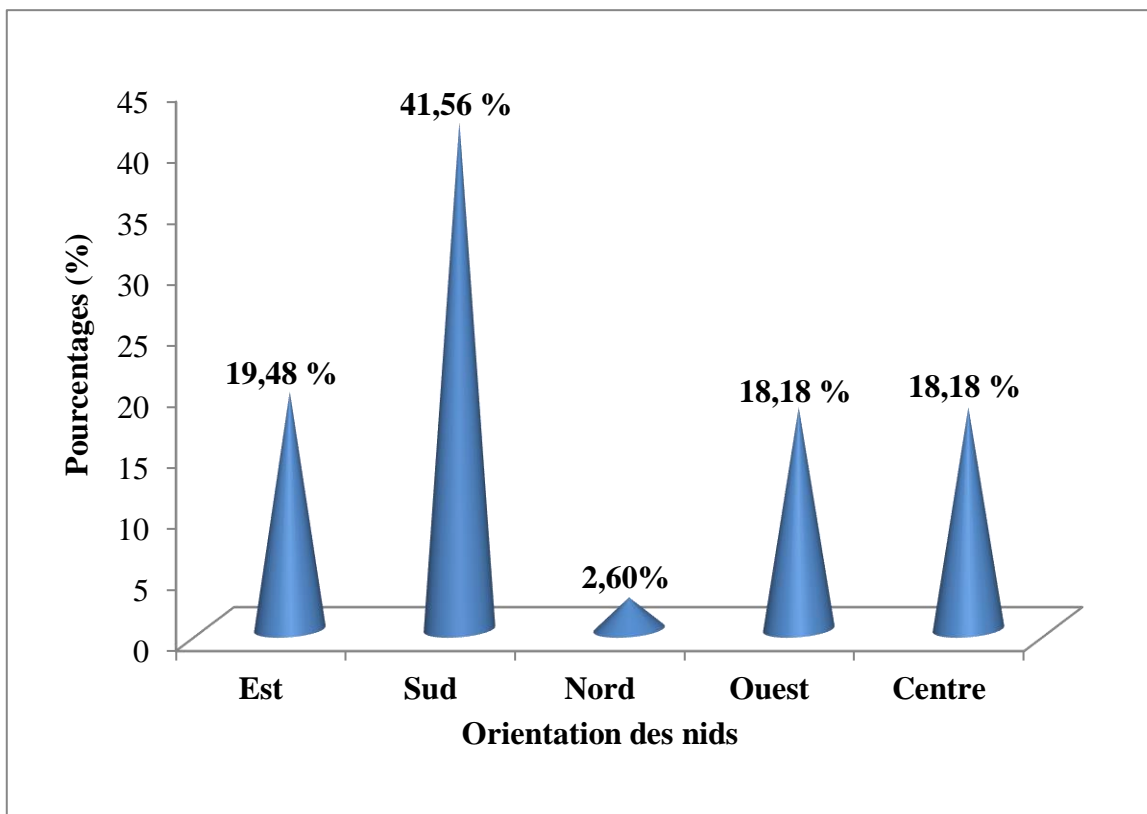


Figure 44 : Orientation des nids d’hiver dans la station 2 (forêt naturelle du mont Temoulgha)

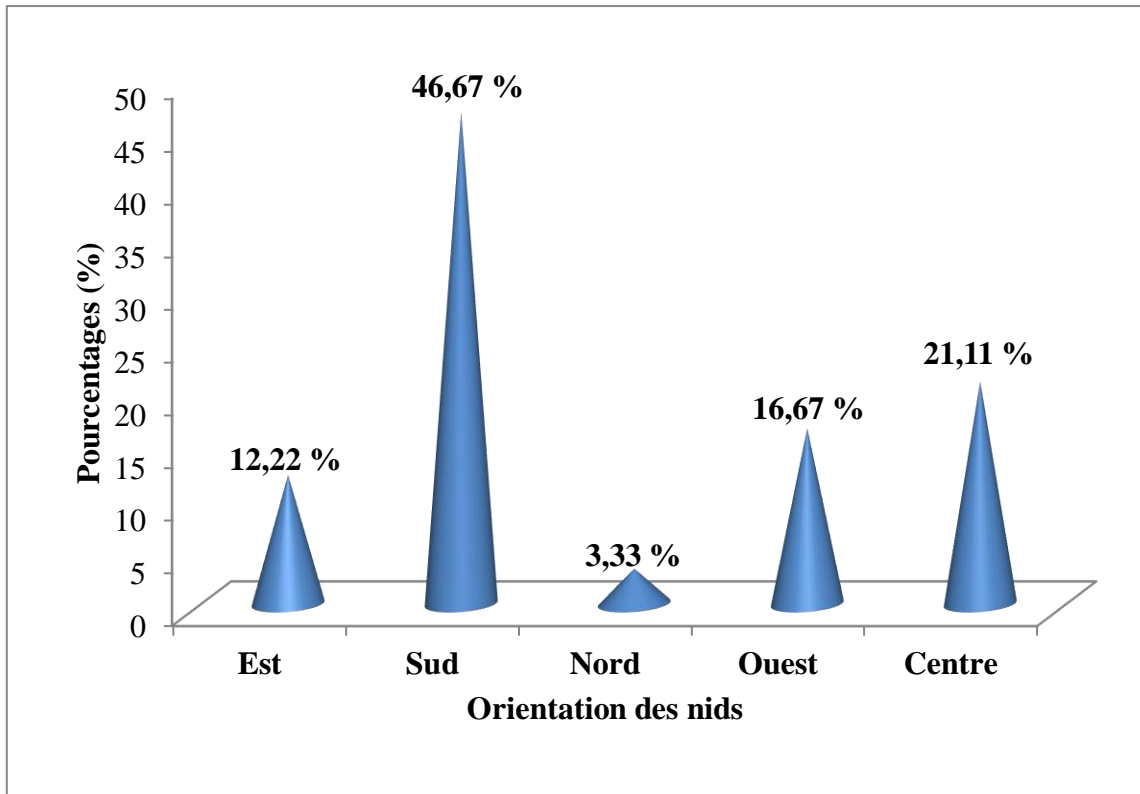


Figure 45 : Orientation des nids d'hiver de la station 3 (reboisement de Babor)

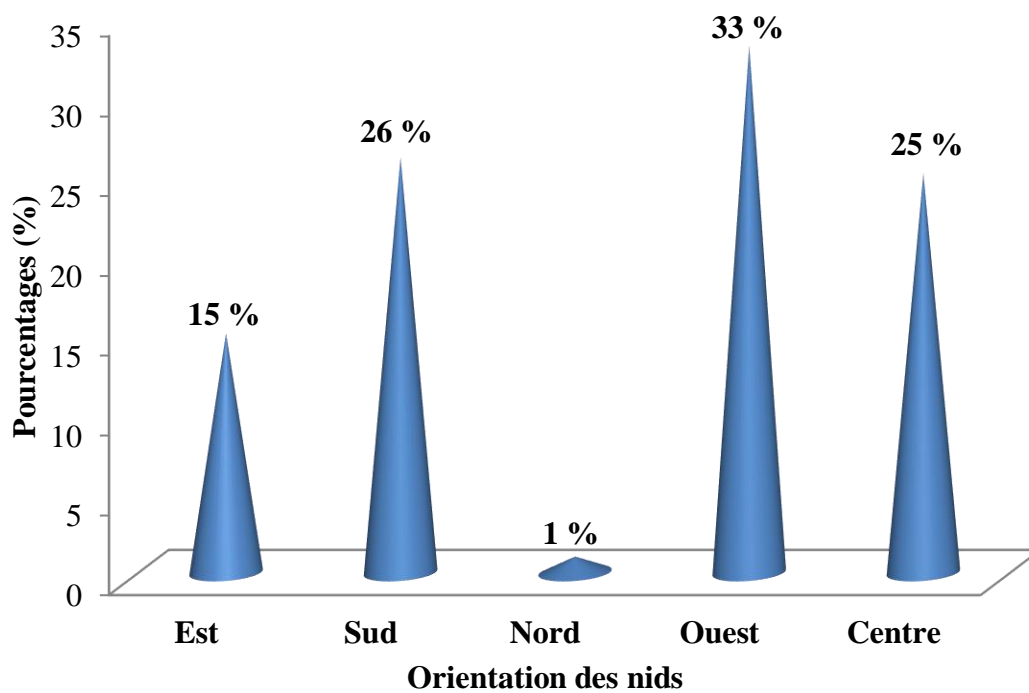


Figure 46 : Orientation des nids d'hiver de la station 4 (reboisement de Temoulgha)

4.2. Piégeage des chenilles partant en procession de nymphose

4.2.1. Période parcellaire des descentes

La période de descente des chenilles processionnaires pour la nymphose varie selon les stations, le tableau 16 représente les différentes dates de début et fin de procession de nymphose ainsi que le nombre total de descente dans les quatre stations.

Tableau 16. Période de descente des chenilles pour la nymphose dans les quatre stations

	Paramètre	Arbre	Nombre de chenille	Début de descente	Fin de descente	Période de descente (jours)
Station 1	Transect 1	1	225	15/03/2016	04/04/2016	21
		2	167	16/03/2016	05/04/2016	21
	Transect 2	1	153	17/03/2016	05/04/2016	20
		2	79	17/03/2016	01/04/2016	16
	Transect 3	1	100	18/03/2016	01/04/2016	15
		2	231	16/03/2016	03/04/2016	19
Station 2	Transect 1	1	195	17/03/2016	06/04/2016	21
		2	198	18/03/2016	05/04/2016	19
	Transect 2	1	219	17/03/2016	07/04/2016	22
		2	246	17/03/2016	09/04/2016	24
	Transect 3	1	236	18/03/2016	06/04/2016	20
		2	211	18/03/2016	08/04/2016	22
Station 3	Transect 1	1	300	15/03/2016	26/04/2016	43
		2	418	16/03/2016	25/04/2016	41
	Transect 2	1	398	17/03/2016	26/04/2016	41
		2	386	16/03/2016	24/04/2016	40
	Transect 3	1	269	16/03/2016	19/04/2016	35
		2	315	19/03/2016	20/04/2016	33
Station 4	Transect 1	1	245	19/03/2016	05/04/2016	18
		2	236	18/03/2016	06/04/2016	20
	Transect 2	1	251	18/03/2016	07/04/2016	21
		2	201	17/03/2016	06/04/2016	21
	Transect 3	1	185	17/03/2016	06/04/2016	21
		2	230	18/03/2016	10/04/2016	24

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Nous avons enregistré la période la plus longue dans la station 3 (43 jours), elle a débuté le 15 mars et s'est achevée le 26 avril. La descente s'est poursuivie dans tous les transects pendant plus de 30 jours (entre 33 et 43 jours).

La période de descente la plus courte a été enregistrée dans le reboisement de Babor, avec 15 jours, seulement (du 18 mars au 1^{er} avril). Dans cette même station nous remarquons que les périodes de descente des chenilles ont été les plus courtes (15 à 21 jours).

En outre, la forêt naturelle de Temoulgha et le reboisement de Temoulgha enregistrent pratiquement les mêmes périodes, avec une moyenne comprise entre 19 et 24 jours pour la forêt naturelle de Temoulgha et entre 18 et 24 jours pour le reboisement de Temoulgha.

Les dates des premiers jours de descente des chenilles ont été enregistrées le 15 mars pour les stations la forêt naturelle du mont Doui et le reboisement de Babor, le 17 mars pour la forêt naturelle de Temoulgha et le 18 mars pour le reboisement de Temoulgha. Tandis que les dates de fin de descente sont enregistrées le 5 avril dans la forêt naturelle du mont Doui, le 9 avril dans la forêt naturelle de Temoulgha, le 26 avril dans le reboisement de Babor et le 10 avril dans le reboisement de Temoulgha.

4.2.2. Comparaison de rythmes des descentes dans les différents biotopes

Le nombre de nids et la hauteur des arbres ont une influence directe sur le nombre de chenilles matures descendantes, les figures 47, 48, 49 et 50 illustrent la variation journalière de descente des chenilles pour l'enfouissement sous le sol au printemps 2015.

Les figures 47, 48, 49 et 50 représentent les fluctuations journalières des effectifs des chenilles processionnaires partant en nymphose, elles affichent une variation dans les départs en procession, et une hétérogénéité de capture journaliers des chenilles. Le nombre de chenilles descentes diffère d'un jour à l'autre dans les stations elles même, nous avons enregistré, parfois, un arrêt de descente qui atteint quatre jours dans la station 1 (forêt naturelle du mont Doui), trois jours dans les stations 2 (forêt naturelle de Temoulgha) et 4 (reboisement de Temoulgha) et jusqu'à six jours dans la station 3 (reboisement de Babor), puis les chenilles recommencent leurs descentes pour la nymphose. Les conditions climatiques jouent un rôle dans les départs et les fins de procession de nymphose.

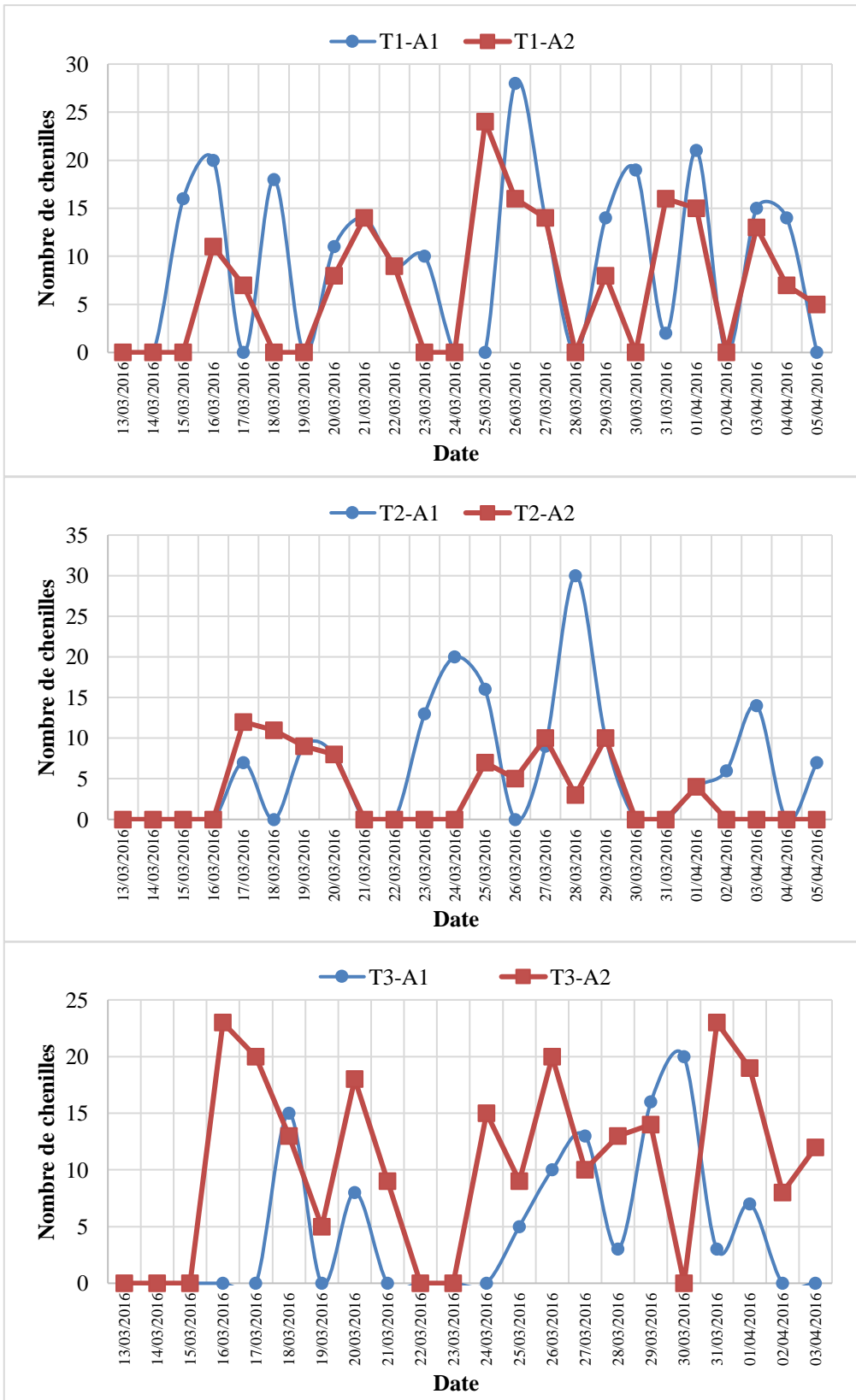


Figure 47 : Effectifs journaliers des descentes des chenilles partant en procession de nymphose dans la station 1 (forêt naturelle du mont Doui)

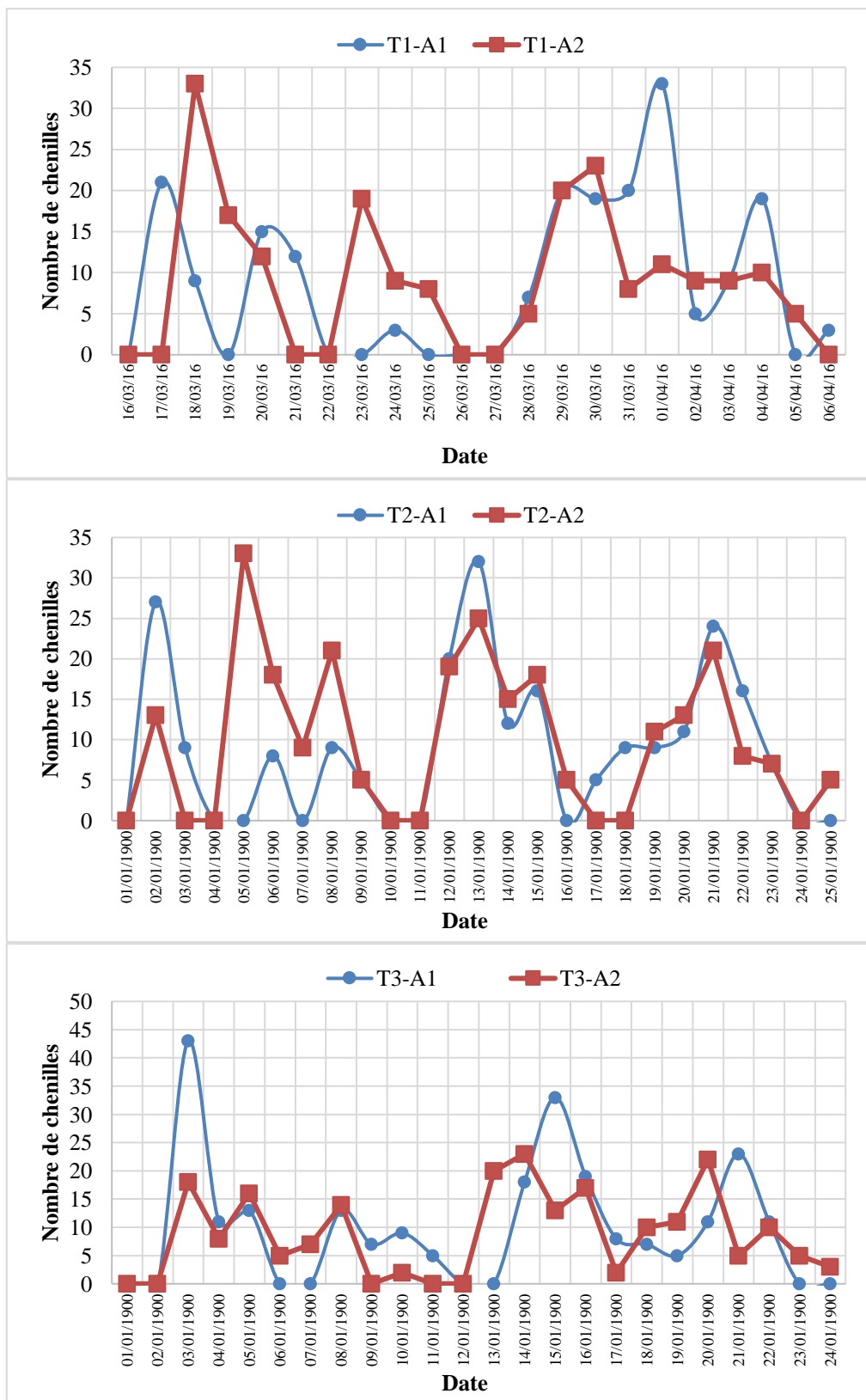


Figure 48 : Effectifs journaliers des descentes des chenilles partant en procession de nymphose dans la station 2 (forêt naturelle du mont Temoulgha)

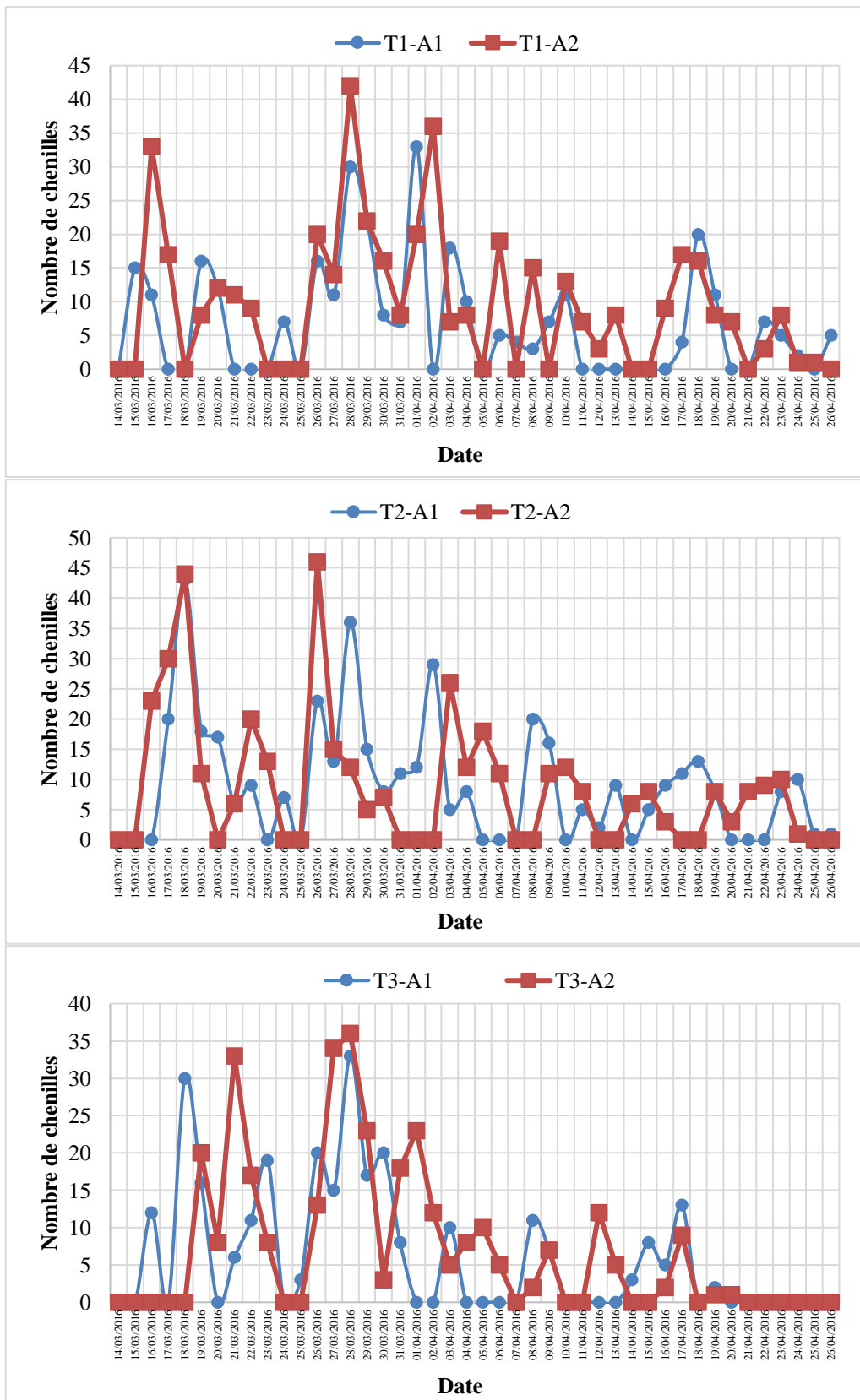


Figure 49 : Effectifs journaliers des descentes des chenilles partant en procession de nymphe dans la station 3 (reboisement de Babor)

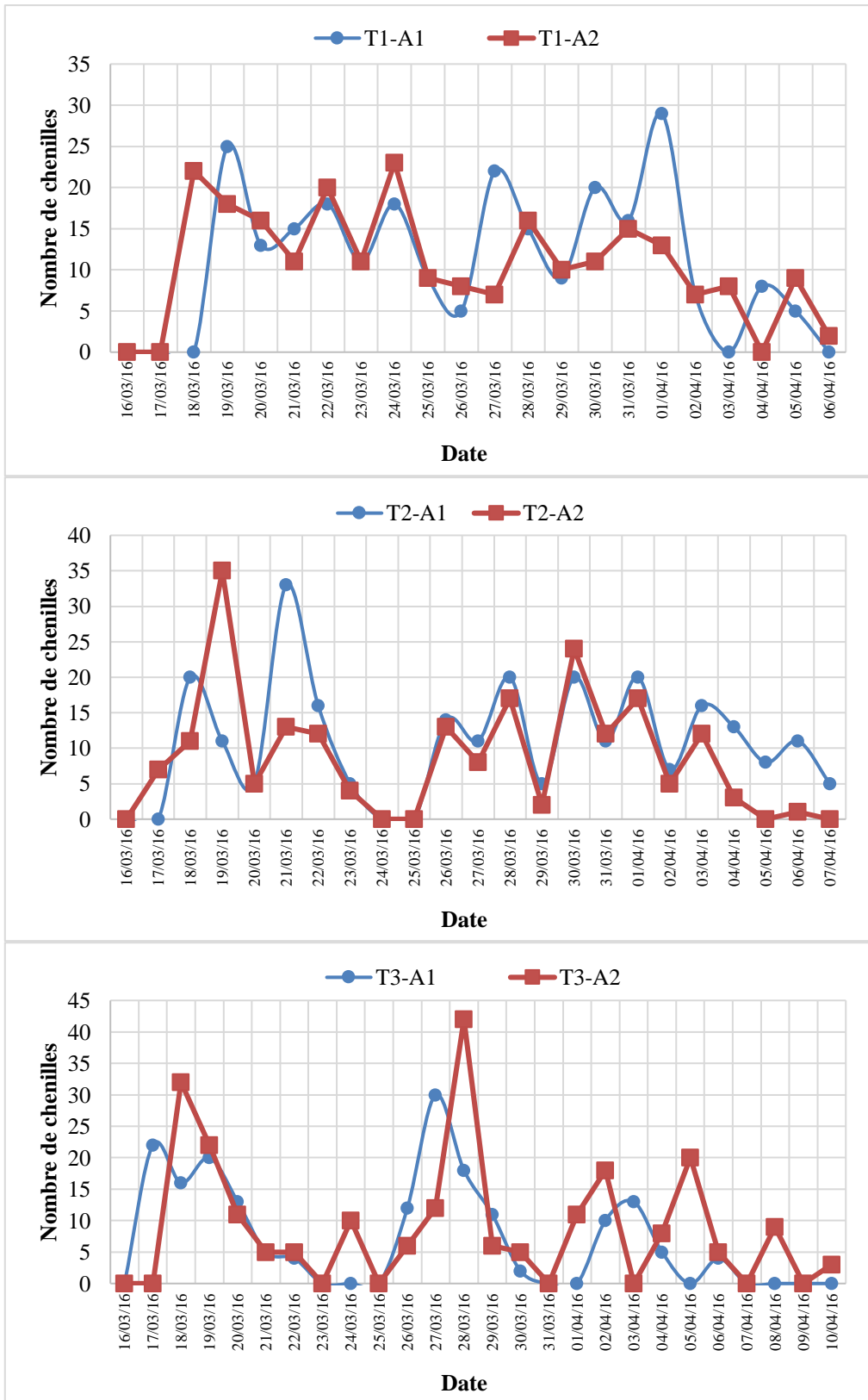


Figure 50 : Effectifs journaliers des descentes des chenilles partant en procession de nymphe dans la station 4 (reboisement de Temoulgha)

4.3. Résultats sur les pontes

4.3.1. Orientation des sites de ponte

L'orientation des manchons des imagos de chenille processionnaire du pin, n'est pas identique pour toutes les stations d'étude. Les figures 51, 52, 53 et 54 représentent les différentes expositions dans les quatre stations d'étude.

Dans la forêt naturelle du mont Doui, les emplacements des pontes montrent une préférence pour la direction Est (30,8%). Par la suite viennent le Nord (25,6%), l'Ouest (23,1%) et le Sud (20,5%) (Fig. 51).

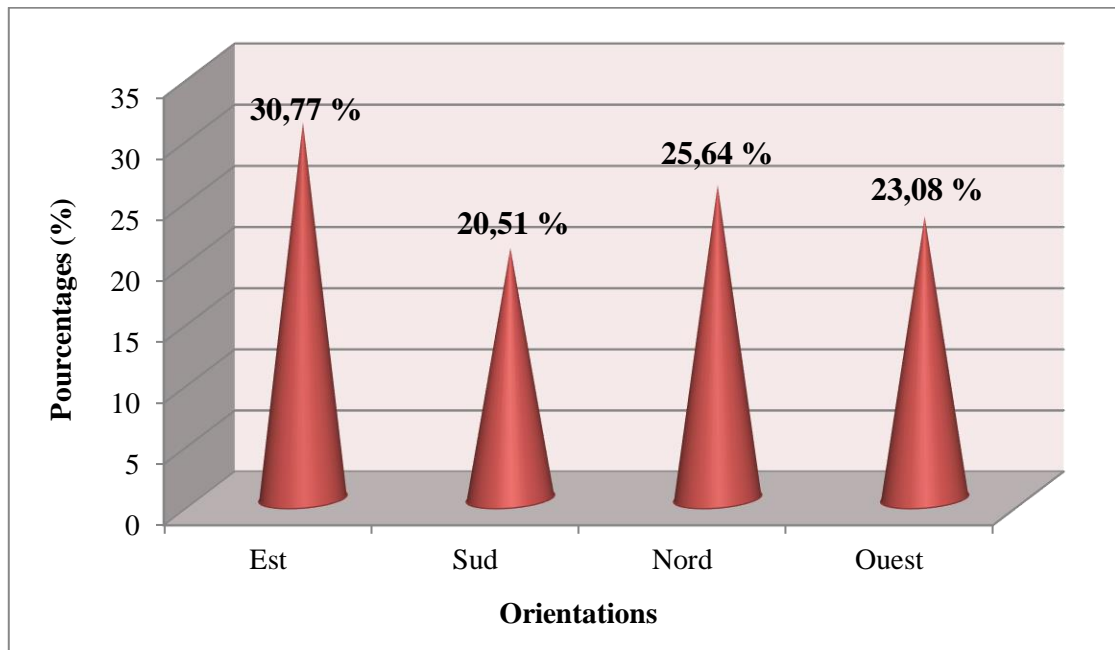


Figure 51 : Orientation des manchons de la station 1 (forêt naturelle du mont Doui)

Dans la forêt naturelle du mont Temoulgha, nous avons enregistré une légère préférence pour l'exposition Est (31,7%), puis l'Ouest (30,0%), après viennent les directions Sud (21,7%) et Nord (16,7%) (Fig. 52).

Dans le reboisement de Babor, nous avons enregistré une égalité pour les expositions Est et Ouest avec 31,7%. Par la suite vient la direction Sud (21,7%) et le Nord (15,0%) (Fig. 53).

Dans le reboisement de Temoulgha, nous avons noté une légère préférence pour l'exposition Est (31,7%), puis l'Ouest (30,0%), après viennent les directions Sud (23,3%) et Nord (15,0%) (Fig. 54).

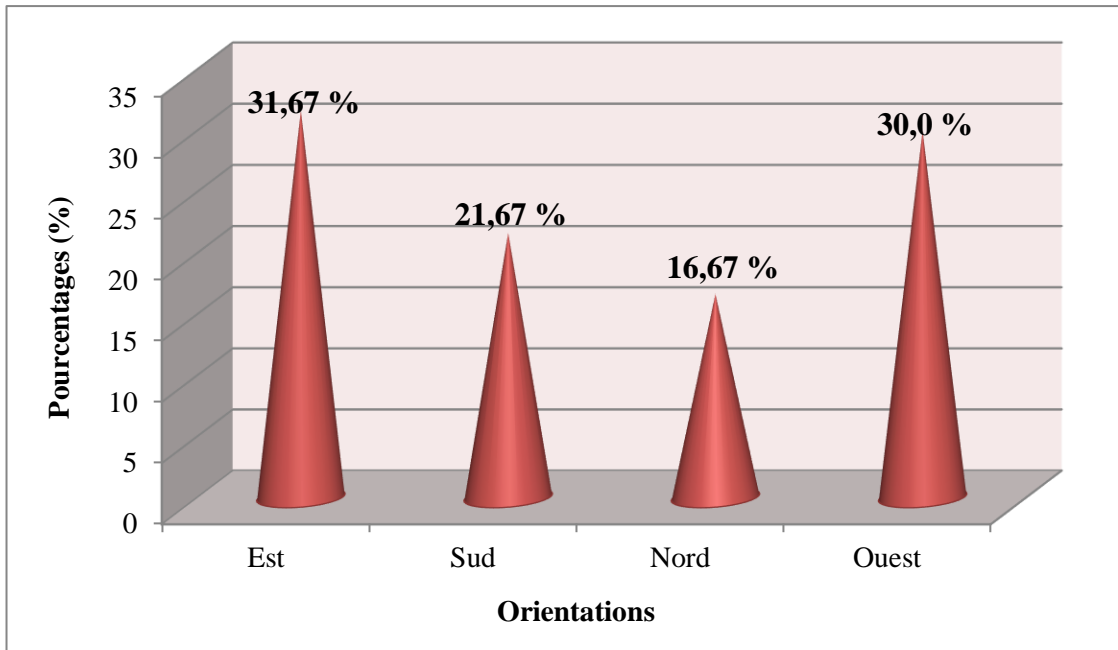


Figure 52 : Orientation des manchons de la station 2 (forêt naturelle du mont Temoulgha)

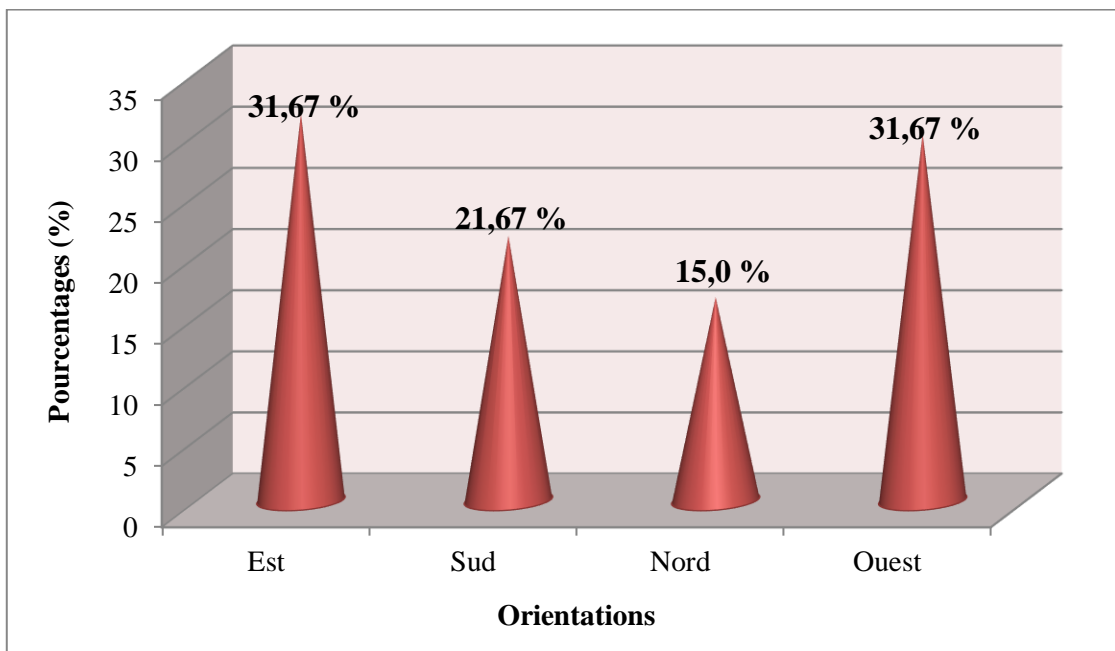


Figure 53 : Orientation des manchons de la station 3 (reboisement de Babor)

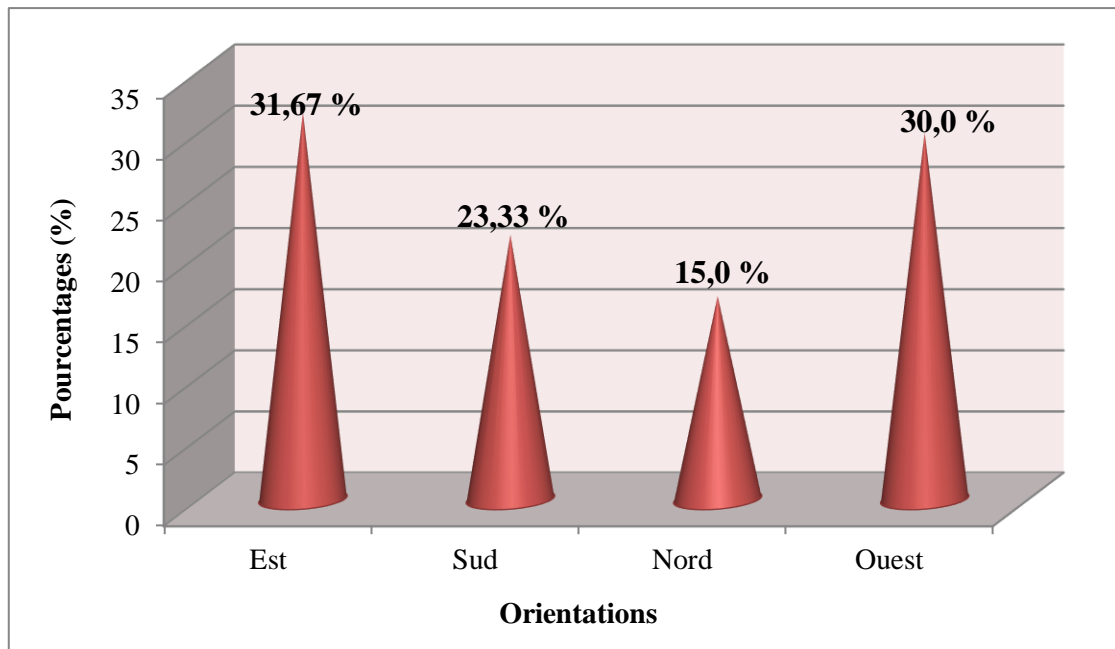


Figure 54 : Orientation des manchons de la station 4 (reboisement de Temoulgha)

4.3.2. Distribution des pontes en fonction de la hauteur des arbres

Les hauteurs des pontes trouvées dans les stations d'études sont variables, le tableau 17 présente les résultats relevés.

Tableau 17. Disposition des manchons en fonction de la hauteur des arbres

Paramètres		Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Nombre d'arbre
Station 1	Transect 1	1,2	2,3	1,93	0,31	10
	Transect 2	1,5	4	2,18	0,7	10
	Transect 3	1,2	3,5	2,1	0,59	10
Station 2	Transect 1	1	2,5	1,73	0,4	10
	Transect 2	1,2	4	2,13	0,81	10
	Transect 3	1,2	3,6	2,05	0,51	10
Station 3	Transect 1	1,2	2,2	1,69	0,28	10
	Transect 2	1,2	2,2	1,73	0,31	10
	Transect 3	1,2	3	1,9	0,41	10
Station 4	Transect 1	0,5	1,3	0,93	0,27	10
	Transect 2	0,4	1,9	1,19	0,43	10
	Transect 3	0,4	2	1,12	0,45	10

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

La hauteur des manchons enregistrée au niveau de la forêt naturelle du mont Doui selon les trois transects prospectés varie entre 1,2 et 4 m, quant à la moyenne elle varie entre $1,93 \pm 0,33$ m et $2,18 \pm 0,70$ m. Quant à la station 2, celle de la forêt naturelle de de Temoulgha, la hauteur de ponte selon les trois transects prospectés varie entre 1 et 4 m par

transect et une moyenne de hauteur qui varie entre $1,73 \pm 0,4$ m et $2,13 \pm 0,81$ m. Cependant les arbres des deux dernières stations sont moins longs que les autres, la hauteur de ponte oscille entre 1,2 et 3 m avec une moyenne qui se situe entre $1,69 \pm 0,28$ m et $1,9 \pm 0,41$ m dans le reboisement de Babor. Par ailleurs, dans la station 4 (reboisement de Temoulgha), la hauteur de ponte est comprise entre 0,4 et 2 m avec une moyenne qui varie entre $0,93 \pm 0,27$ m et $1,19 \pm 0,43$ m. À partir de ces résultats, il ressort que les imagos de la chenille processionnaire du pin d'Alep, pondent leurs œufs à de basses ou moyennes hauteurs, il faudra remarquer que la hauteur des arbres n'a pas d'influence. La hauteur la plus importante enregistrée est de 4 m, tandis que la hauteur la plus basse est de 0,4 m.

4.3.3. Évaluation du nombre d'œufs par ponte

La femelle papillon de la chenille processionnaire pond ses œufs en rangées parallèles, cette disposition nous a facilité leur dénombrement. Le nombre d'œufs existant dans les manchons est variable. Dans ce qui va suivre nous développons des informations sur les œufs de la chenille processionnaire du pin d'Alep. Sur ces manchons nous avons des œufs éclos, non éclos et parasités.

4.3.3.1. Effectif d'œuf total

Nous avons compté tous les œufs (éclos, non éclos, parasités) trouvés dans les manchons. Dans le tableau 18 sont reportés les relevés des quatre stations d'étude.

Tableau 18. Nombre total des œufs par manchon dans les quatre stations d'étude

Paramètres		Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Nombre d'arbre
Station 1	Transect 1	122	197	155,54	24,63	10
	Transect 2	48	244	172,38	57,25	10
	Transect 3	89	194	126,69	36,25	10
Station 2	Transect 1	56	275	160,50	62,66	10
	Transect 2	62	234	162,75	42,00	10
	Transect 3	74	207	125,60	36,72	10
Station 3	Transect 1	39	202	128,35	44,40	10
	Transect 2	43	214	129,35	50,87	10
	Transect 3	69	176	121,10	30,16	10
Station 4	Transect 1	63	219	145,95	38,22	10
	Transect 2	45	226	146,20	39,05	10
	Transect 3	94	211	148,85	35,77	10

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Le dénombrement des œufs pondus présente une hétérogénéité en nombre d'œufs par manchon dans une même station ainsi qu'entre les différentes stations. Le nombre d'œufs par manchon dans l'ensemble des stations varie entre 39 œufs (reboisement de Babor) et 275 œufs (forêt naturelle de Temoulgha). Quant à la moyenne du nombre des œufs par manchon elle est comprise entre $121,10 \pm 30,16$ œufs (reboisement de Babor) et $172,38 \pm 57,25$ œufs (forêt naturelle du mont Doui). Dans la forêt naturelle du mont Doui le nombre d'œufs selon les transects prospectés varie entre 48 et 244 œufs, quant à la moyenne elle est comprise entre $126,69 \pm 36,25$ et $172 \pm 57,25$ œufs par manchon. Cependant, dans la forêt naturelle de Temoulgha, le nombre total d'œufs par manchon est un peu plus élevé que celui noté dans la première station, le nombre d'œufs selon les trois transects prospectés oscille entre 56 et 275 œufs/manchon et une moyenne qui varie entre $125,6 \pm 36,72$ et $162,75 \pm 42$ œufs/manchon. Quant à la station 3, celle du reboisement de Babor, le nombre d'œufs par manchon compté selon les trois transects prospectés varie entre 39 à 202 œufs/manchon et une moyenne d'œuf par manchon qui est comprise entre $121,1 \pm 30,16$ et $128,35 \pm 44,4$ œufs/manchon. Par ailleurs, dans la station 4 (reboisement de Temoulgha), le nombre total d'œufs par manchon varie entre 45 et 291 œufs/manchon, soit une moyenne qui est comprise entre $145,95 \pm 38,22$ et $148,85 \pm 35,77$ œufs/manchon.

4.3.3.2. Effectif d'œuf éclos

Sur les manchons nous avons trois catégories d'œufs (éclos, non éclos et parasités), le tableau 19 représente le nombre d'œufs éclos enregistré dans les quatre stations d'étude.

Tableau 19. Nombre des œufs éclos dénombré dans les quatre stations d'étude

Paramètres		Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Station 1	Transect 1	15	152	100,23	39,95
	Transect 2	24	209	141,38	58,59
	Transect 3	36	170	93,77	41,63
Station 2	Transect 1	9	249	136,90	64,42
	Transect 2	60	223	135,45	48,56
	Transect 3	41	173	99,45	36,59
Station 3	Transect 1	31	171	91,30	36,71
	Transect 2	9	177	102,85	45,13
	Transect 3	51	160	99,10	32,67
Station 4	Transect 1	63	171	120,55	35,14
	Transect 2	44	218	120,70	43,58
	Transect 3	64	210	133,35	39,03

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Les résultats relevés dans le tableau 19 montrent que le nombre d'œufs éclos dans la forêt naturelle du mont Doui selon les trois transects prospectés varie entre 15 et 209 œufs avec une moyenne qui est comprise entre $93,77 \pm 41,63$ et $141,38 \pm 58,59$ œufs. Dans la forêt naturelle de Temoulgha le nombre d'œufs éclos varie entre 9 et 249 œufs avec une moyenne qui se situe entre $99,45 \pm 36,59$ et $136,9 \pm 64,42$ œufs. Au niveau du reboisement de Babor le nombre d'œufs éclos varie entre 9 et 177 œufs avec une moyenne qui est comprise entre $91,3 \pm 36,71$ et $102,85 \pm 45,13$ œufs. La quatrième station est caractérisée par un nombre d'œufs éclos variant entre 44 et 218 œufs avec une moyenne qui est comprise entre $120,55 \pm 35,14$ et $133,35 \pm 39,03$ œufs.

4.3.3.3. Effectif d'œuf non éclos

La deuxième catégorie des œufs est celle qui n'arrive pas à l'éclosion, le tableau 20 représente les résultats trouvés dans cette étude.

Tableau 20. Nombre des œufs non éclos noté dans les quatre stations d'étude

Paramètres		Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Station 1	Transect 1	1	114	39,77	34,92
	Transect 2	0	57	17,00	19,33
	Transect 3	0	58	24,38	17,57
Station 2	Transect 1	0	49	11,05	12,49
	Transect 2	0	98	21,90	25,67
	Transect 3	3	62	15,30	12,49
Station 3	Transect 1	1	66	21,65	17,44
	Transect 2	1	70	16,30	16,06
	Transect 3	0	41	13,40	11,29
Station 4	Transect 1	0	89	14,30	20,02
	Transect 2	0	94	16,85	21,98
	Transect 3	0	23	10,15	6,30

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Le nombre d'œufs non éclos par manchon dans l'ensemble des stations varie entre 1 œuf (forêt naturelle du mont Doui et reboisement de Babor) et 114 œufs (forêt naturelle du mont Doui). Quant à la moyenne du nombre des œufs non éclos par manchon elle est comprise entre $6,30 \pm 6,82$ (reboisement de Temoulgha) et $39,77 \pm 34,92$ œufs non éclos (forêt naturelle du mont Doui). Dans la forêt naturelle du mont Doui, le nombre d'œufs non éclos varie entre 1 et 114 œufs avec une moyenne maximale de $39,77 \pm 34,92$ œufs. Au niveau de la forêt naturelle de Temoulgha, le nombre d'œufs non éclos oscille entre 3 et 98 œufs avec une moyenne maximale de $21,9 \pm 25,67$ œufs. Par ailleurs, dans le reboisement de Babor, le

nombre d'œufs non éclos varie entre 1 et 70 œufs avec une moyenne maximale de $21,65 \pm 17,44$ œufs. Dans le reboisement de Temoulgha, le nombre d'œufs non éclos varie entre 0 œufs et 94 œufs avec une moyenne maximale de $16,85 \pm 21,98$.

4.3.3.4. Effectif des œufs parasités

Les manchons de la chenille processionnaire, sont parasité par des insectes endoparasitaire, ces derniers laissent des trous noirs après leurs sorties, le tableau 21 représente le nombre d'œufs parasités dans les quatre stations.

Tableau 21. Nombre des œufs parasités dans les quatre stations d'étude

Paramètres		Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Station 1	Transect 1	0	43	15,54	12,37
	Transect 2	0	57	14,00	15,88
	Transect 3	0	19	8,54	6,17
Station 2	Transect 1	0	35	12,30	10,94
	Transect 2	0	27	8,40	7,99
	Transect 3	0	27	10,25	10,60
Station 3	Transect 1	2	33	13,45	8,21
	Transect 2	0	40	12,70	9,67
	Transect 3	1	20	9,25	5,14
Station 4	Transect 1	0	34	10,55	9,09
	Transect 2	1	25	9,85	6,82
	Transect 3	0	12	5,35	3,12

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Dans l'ensemble des stations le nombre maximal des œufs parasités a été noté dans la forêt naturelle du mont Doui avec 57 œufs parasités avec une moyenne de $15,54 \pm 12,37$ œufs parasités. Dans les autres stations la moyenne des œufs parasités elle est comprise entre $5,35 \pm 3,12$ dans la le reboisement de Temoulgha et $12,70 \pm 9,67$ dans le reboisement de Babor.

4.3.3.5. Pourcentages des œufs éclos, non éclos et parasités

Dans le tableau 22 sont mentionnés les pourcentages des œufs éclos, non éclos et parasités enregistrés dans les quatre stations d'étude.

Tableau 22. Pourcentages des œufs éclos, non éclos et parasités dans les quatre stations d'étude

Paramètres		Œufs éclos		Œufs non éclos		Œuf parasités	
		N	%	N	%	N	%
Station 1	Transect 1	1303	64,44	517	25,57	202	9,99
	Transect 2	1838	82,02	221	9,86	182	8,12
	Transect 3	1219	74,01	317	19,25	111	6,74
Station 2	Transect 1	2738	85,43	221	6,90	246	7,68
	Transect 2	2709	81,72	438	13,21	168	5,07
	Transect 3	1989	79,56	306	12,24	205	8,20
Station 3	Transect 1	1826	72,23	433	17,13	269	10,64
	Transect 2	2057	78,01	326	12,36	254	9,63
	Transect 3	1982	81,40	268	11,01	185	7,60
Station 4	Transect 1	2411	82,91	286	9,83	211	7,26
	Transect 2	2414	81,89	337	11,43	197	6,68
	Transect 3	2667	89,59	203	6,82	107	3,59

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Dans l'ensemble des stations le pourcentage des œufs éclos est le plus dominant, il varie entre 64,4% dans la forêt naturelle du mont Doui et 89,6% dans le reboisement de Temoulgha. Quant aux œufs non éclos leur taux varie entre 6,8% dans le reboisement de Temoulgha et 25,6% dans la forêt naturelle du mont Doui. Enfin pour les œufs parasités leur taux est compris entre 3,6% dans le reboisement de Temoulgha et 10,6% dans le reboisement de Babor.

4.3.4. Paramètres des manchons

Dans ce qui va suivre est exposé la longueur des manchons, le nombre de lignes d'œufs par manchons et les effectifs des portes-manchons sur l'arbre.

4.3.4.1. Longueur des manchons

Les longueurs varient d'un manchon à un autre, le tableau 23, représente les tailles relevées dans les quatre stations d'étude.

La longueur des manchons indique une variation entre les stations d'études et même entre les transects de la même station. Pour ce qui concerne la forêt naturelle du mont Doui, la longueur des manchons varie entre 1,4 et 4,2 cm avec une moyenne qui se situe entre $2,35 \pm 0,61$ et $2,61 \pm 0,36$ cm. Au niveau de la forêt naturelle de Temoulgha, la longueur des

manchons selon les trois transects prospectés varie entre 1,7 et 4,3 cm, avec une moyenne qui varie entre $2,3 \pm 0,45$ et $2,96 \pm 0,64$ cm.

Tableau 23. Biométrie des manchons dans les quatre stations d'étude

Paramètres		Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Nombre d'arbre
Station 1	Transect 1	2,1	3,2	2,61	0,36	10
	Transect 2	1,5	4,2	2,50	1,09	10
	Transect 3	1,4	3,5	2,35	0,61	10
Station 2	Transect 1	1,7	4,3	2,78	0,75	10
	Transect 2	1,7	4,1	2,96	0,64	10
	Transect 3	1,7	3,5	2,30	0,45	10
Station 3	Transect 1	1,4	4	2,29	0,69	10
	Transect 2	1,4	3,9	2,37	0,67	10
	Transect 3	1,5	3,2	2,32	0,48	10
Station 4	Transect 1	1,9	4,1	2,74	0,58	10
	Transect 2	1,5	4,3	2,77	0,60	10
	Transect 3	2	4	2,74	0,60	10

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Par ailleurs dans le reboisement de Babor, la longueur des manchons selon les trois transects prospectés varie entre 1,4 cm et 4 cm, avec une moyenne qui est comprise entre $2,29 \pm 0,69$ et $2,37 \pm 0,67$ cm. Quant au niveau du reboisement de Temoulgha, les valeurs de la longueur des manchons relevés dans les trois transects étudiés varient entre 1,5 cm et 4,3 cm, la moyenne est comprise entre $2,74 \pm 0,58$ et $2,77 \pm 0,6$.

4.3.4.2. Nombre de lignes d'œufs par manchon

Le nombre de lignes d'œufs trouvées dans les manchons est variable, le tableau 24 représente les résultats trouvés.

La chenille processionnaire dépose ses œufs le long d'une aiguille, quelquefois un rameau du pin, à la queue leu-leu en plusieurs rangées parallèles jusqu'à la recouvrir entièrement d'une couche unique formant ainsi un manchon. Dans la forêt naturelle du mont Doui, le nombre de lignes par manchon dans les trois transects prospectés varie entre 6 et 14 lignes/manchon avec une moyenne qui varie entre $8,85 \pm 2,61$ et $10,46 \pm 2,88$ lignes/manchon. Au niveau de la forêt de Temoulgha, le nombre de lignes par manchon dans les trois transects prospectés varie entre 3 et 14 lignes/manchon, avec une moyenne qui varie entre $6,8 \pm 1,58$ et $7,3 \pm 1,95$ lignes/manchon.

Tableau 24. Nombre de ligne d'œufs par manchon

Paramètres		Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Nombre d'arbre
Station 1	Transect 1	6	14	10,46	2,88	10
	Transect 2	6	14	9,15	2,94	10
	Transect 3	6	13	8,85	2,61	10
Station 2	Transect 1	6	14	7,1	2,15	10
	Transect 2	6	14	7,3	1,95	10
	Transect 3	6	13	6,8	1,58	10
Station 3	Transect 1	6	14	8	2,51	10
	Transect 2	6	12	7,8	2,14	10
	Transect 3	6	12	7,35	1,95	10
Station 4	Transect 1	4	13	6,9	2,05	10
	Transect 2	5	13	7	1,81	10
	Transect 3	6	10	6,6	1,23	10

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Par ailleurs, dans le reboisement de Babor, le résultat relevé dans les trois transects montre un nombre qui est compris entre 6 et 14 lignes/manchon et une moyenne qui varie entre $7,35 \pm 1,95$ et $8 \pm 2,51$ lignes/manchon. Enfin, au niveau du reboisement de Temoulgha, le nombre de ligne varie entre 4 et 13 lignes/manchon et une moyenne qui se situe entre $6,6 \pm 1,23$ et $7 \pm 1,81$ lignes/manchon.

4.3.4.3. Effectifs des portes-manchons sur l'arbre

Les femelles papillons de la chenille processionnaire du pin d'Alep pondent leurs œufs sur les feuilles (aiguille) et les rameaux, le tableau 25 représente les pourcentages des pontes selon leur support.

Tableau 25. Pourcentage moyen des supports de pontes

	Aiguille %	Rameau %
Station 1	41,02	58,97
Station 2	91,66	8,33
Station 3	76,66	26,66
Station 4	90	10

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Dans la forêt naturelle du mont Doui, le pourcentage moyen des pontes installées sur les feuilles (aiguilles) est de 41,0%, tandis que le pourcentage des pontes installées sur les

rameaux est de 58,97%. Contrairement dans la forêt naturelle de Temoulgha et le reboisement de Temoulgha, nous avons enregistré une nette prédominance des pontes sur les feuilles avec des pourcentages respectifs de 91,7% et 90,0%. Également dans le reboisement de Babor, nous enregistrons une dominance des pontes installées sur les feuilles avec 76,7% et seulement 26,7% de pontes sur les rameaux.

4.3.5. Identification des parasites des œufs

Nous avons identifié le parasite trouvé dans notre étude comme étant *Ooencyrtus pityocampae* (Mercet, 1921) (Hymenoptera : Encyrtidae) dans les quatre stations. Il s'agit d'un parasitoïde oophage.



(Originale)

Figure 55 : *Ooencyrtus pityocampae* (Mercet, 1921)

4.4. Effectif et biométrie des chenilles et des adultes

Les chenilles capturées au moment de la procession, sont transportées au laboratoire, pour prendre leurs longueurs et poids, également les adultes subissent les mêmes opérations après leurs émergences.

4.4.1. Biométrie des chenilles récoltées et conditionnées au laboratoire

Le tableau 26, présente les paramètres biométriques des chenilles processionnaires dans les quatre stations d'étude.

Tableau 26. Mensuration des chenilles processionnaires de la nymphose

	Station 1		Station 2		Station 3		Station 4	
	Poids	Long.	Poids	Long.	Poids	Long.	Poids	Long.
Minimum	0,21	2,10	0,17	2	0,25	2,50	0,21	2,40
Maximum	0,60	4,80	0,60	4,30	0,60	4,30	0,58	4,30
Moyenne	0,38	3,42	0,39	3,38	0,41	3,46	0,40	3,44
Écart-type	0,09	0,63	0,12	0,65	0,09	0,53	0,10	0,57

Long. : longueur ; Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Selon les données obtenues, le poids le plus important des chenilles ne dépasse pas 0,6 g tandis que le poids le plus faible, il est de 0,17 g, quant à la longueur maximale, nous avons enregistré, une taille maximale de 4,8 cm et 2 cm pour la plus petite chenille. Dans la forêt naturelle du mont Doui, le poids des chenilles varie entre 0,21 et 0,60 g (moy. = $0,38 \pm 0,09$ g). Quant à la longueur des chenilles, elle se situe entre 2,1 et 4,8 cm (moy. = $3,42 \pm 0,63$ cm). Dans la forêt naturelle de Temoulgha, le poids des chenilles varie entre 0,17 et 0,6 g (moy. = $0,39 \pm 0,12$ g), quant à la longueur, elle est comprise entre 2 et 4,3 cm (moy = $3,38 \pm 0,65$ cm). Au reboisement de Babor, nous avons noté un poids de chenilles qui varie entre 0,25 et 0,6 g (moy. = $0,41 + 0,09$ g), quant à la longueur des chenilles, elle se situe entre 2,5 et 4,3 cm (moy. = $3,46 \pm 0,53$ cm). Par ailleurs, dans le reboisement de Temoulgha, le poids des chenilles varie entre 0,21 et 0,58 g (moy = $0,4 \pm 0,1$ g), quant à la longueur, elle est comprise entre 2,4 et 4,3 cm (moy. = $3,44 \pm 0,57$ cm).

4.4.2. Effectifs des chrysalides, des chrysalides parasitées et des chenilles n'arrivant pas à se transformer en chrysalides

Après quelque jour de conditionnement, les chenilles commencent à se transformer en chrysalides. Le tableau 27 représente les résultats trouvés.

Tableau 27. Résultats du conditionnement des chenilles de nymphose

	Chrysalides intactes (%)	Chrysalides parasitées (%)	Chenilles n'arrivant pas à se transformer en Chrysalides (%)
Station 1	82,0	8,0	10,0
Station 2	72,0	16,0	12,0
Station 3	74,0	14,0	12,0
Station 4	92,0	6,0	2,0

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Quelques jours après la mise des chenilles dans les tubes en verre. Certaines d'entre elles ont commencées à se transformer en chrysalides, mais d'autres n'arrivent pas à terminer leur cycle phénologique. Concernant les chrysalides intactes, le pourcentage dépasse 70,0% dans les 4 stations d'étude. Quant au taux des chrysalides parasitées, il varie entre 6,0% dans le reboisement de Temoulgha et 16,0% dans la forêt naturelle de Temoulgha. Pour ce qui concerne les chenilles n'arrivant pas à se transformer en Chrysalides, le pourcentage enregistré varie entre 2,0% dans le reboisement de Temoulgha et 12,0% dans la forêt naturelle de Temoulgha et le reboisement de Babor.

4.4.3. Émergences journalières des adultes issus du conditionnement des chrysalides au laboratoire

4.4.3.1. Effectifs des papillons après leur émergence

Les chenilles qui sont arrivées à se transformer en chrysalides, ont été mises dans des blocs séparés pour achever leurs métamorphoses. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 28.

Tableau 28. Taux de papillons issus des chrysalides

	Imagos mâles (%)	Imagos femelles (%)	Chrysalides déformées (%)	Chrysalides n'arrivant pas à se transformer en imagos (%)	Total
Station 1	36,59	26,83	12,20	24,39	100%
Station 2	25,0	33,33	8,33	33,33	100%
Station 3	29,73	37,84	0	32,43	100%
Station 4	30,43	39,13	0	30,43	100%

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Après l'émergence des papillons de la chenille processionnaire conditionnée, nous avons relevé les taux d'imagos mâles, d'imagos femelles, de chrysalides déformées et de chrysalides n'arrivant pas à se transformer en papillons (Tab. 28).

Dans la forêt naturelle du mont Doui, nous avons enregistré 35,6% des imagos mâles et 26,8% imagos femelle. Le taux des chrysalides n'arrivant pas à se transformer en imagos est de 24,4%, quant aux chrysalides déformées sont recensées avec un taux de 12,2% (Fig.

56). Cependant dans la forêt naturelle de Temoulgha, nous avons noté 33,3% imagos femelles et 25,0% mâles, quant aux chrysalides qui ne sont pas transformées en imagos leur taux est de 33,3% (Fig. 57). Également dans le reboisement de Babor, le taux des imagos femelles est de 37,8% contre 29,7% imagos mâles, quant aux chrysalides non transformées leur taux est de 32,4% (Fig. 58). Même constatation est observée dans le reboisement de Temoulgha, avec 39,1% imagos femelles contre 30,4% imagos mâles et 30,4% de chrysalides non transformées (Fig. 59).

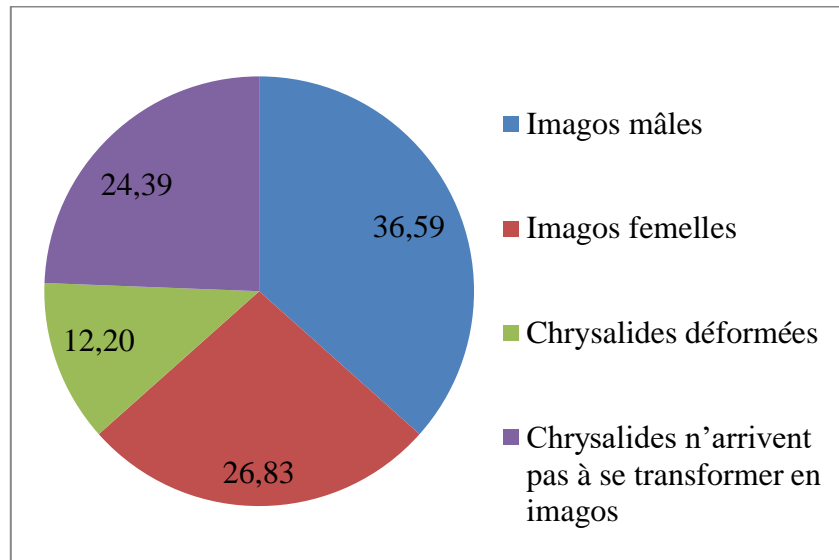


Figure 56 : Taux des papillons issus des chrysalides dans la forêt naturelle du mont Doui

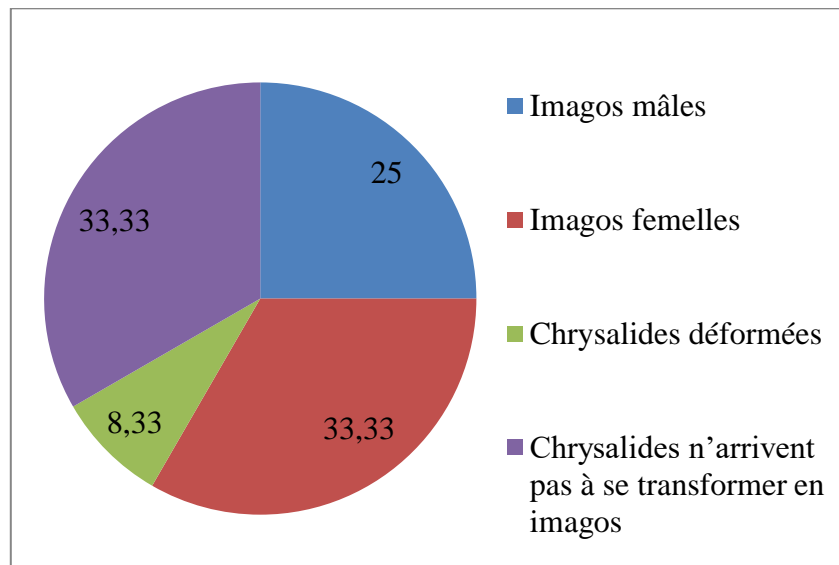


Figure 57 : Taux des papillons issus des chrysalides dans la forêt naturelle de Temoulgha

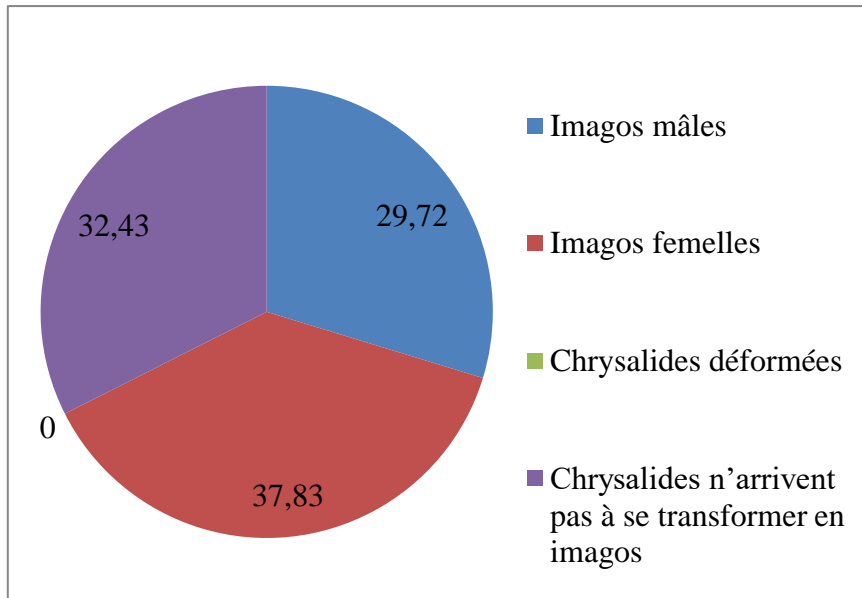


Figure 58 : Taux des papillons issus des chrysalides dans le reboisement de Babor

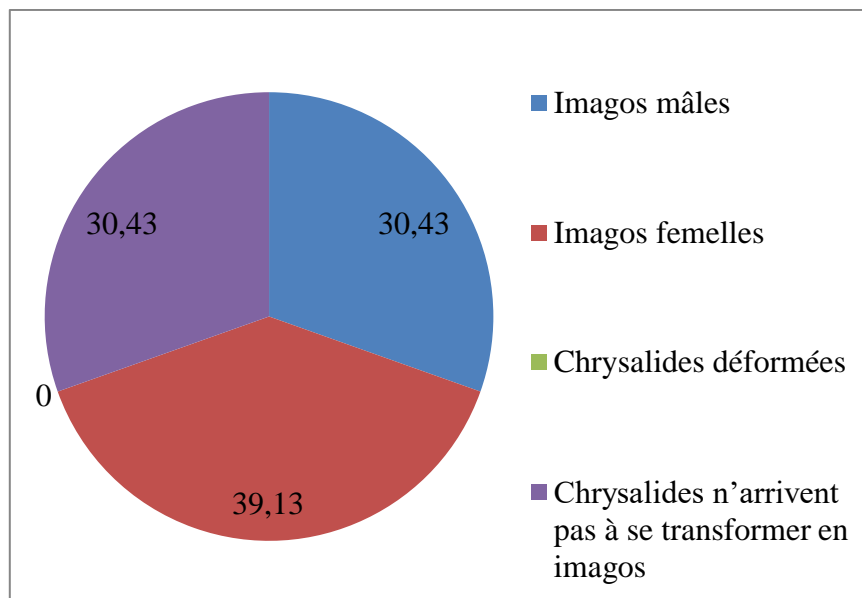


Figure 59 : Taux des papillons issus des chrysalides dans le reboisement de Temoulgha

4.4.3.2. Biométrie des adultes après leurs émergences

Après l'émergence et l'identification des imagos, nous avons procédé au relevé de leurs mensurations, le tableau 29, représente les résultats trouvés.

Tableau 29. Biométrie des imagos mâles et femelles

	Mâles				Femelles			
	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	Min.	Max.	Moy.	Écart-type
Longueur de l'abdomen (cm)	1,5	2,2	1,79	0,14	2	2,7	2,4	0,15
Longueur des ailes (cm)	2,9	4	3,14	0,18	3	4,3	4,04	0,24
Poids (g)	0,02	0,08	0,05	0,01	0,08	0,16	0,12	0,02

Min. : minimum ; Max : maximum ; Moy. : moyenne.

Nous constatons que les femelles des papillons de la chenille processionnaire sont plus grandes et plus lourdes que les mâles. Pour les imagos femelles, la longueur d'abdomen est comprise entre 2 et 2,7 cm (moy. = $2,4 \pm 0,15$ cm), la longueur des ailes est comprise entre 3 et 4,3 cm (moy. = $4,02 \pm 0,24$ cm) et le poids il se situe entre 0,08 g et 0,16 g (moy. = $0,12 \pm 0,02$ g). Pour les imagos mâles, la longueur de l'abdomen varie entre 1,5 et 2,2 cm (moy. : $1,79 \pm 0,14$ cm), la longueur des ailes se situe entre 2,9 et 4 cm (moy. = $3,14 \pm 0,18$ cm) et le poids il est compris entre 0,029 et 0,08 g (moy. = $0,053 \pm 0,015$ g).

4.5. Résultats obtenus après l'application des huiles essentielles contre la chenille processionnaire du pin d'Alep

Durant cette expérience, nous avons testé l'efficacité de deux huiles essentielles *in vitro* et *in vivo*.

4.5.1. Effet des huiles essentielles sur les chenilles au laboratoire

Le tableau 30, représente les résultats issus de l'analyse de variance de l'effet biocide des huiles essentielles de deux plantes *Thymus vulgaris* et *Lavandula angustifolia* contre les larves de stade trois et cinq de la chenille processionnaire du pin d'Alep dans les conditions *in vitro*.

Les huiles essentielles extraites des deux plantes *Thymus vulgaris* et *Lavandula angustifolia* étaient toxiques pour les larves du troisième (L3) et du cinquième stade (L5), puisqu'ils ont provoqué plus de 90% de mortalité à fortes doses. Différentes doses ont été utilisées avec des différences entre les doses jugées hautement significative pour les huiles essentielles des deux plantes (Tab. 30).

Tableau 30. Analyse de variance sur l'effet des huiles essentielles de deux plantes *T. vulgaris* et *L. angustifolia* contre les larves de la chenille processionnaire du pin au laboratoire

Stade larvaire	Huile essentielle	Source	Ddl	Moyenne des carrés	F
Larve 3	<i>Thymus vulgaris</i>	Dose	4	369,90	118,05**
		Erreur	10	3,13	
		Total	14		
	<i>Lavandula. angustifolia</i>	Dose	5	531,52	298,98**
		Erreur	12	1,77	
		Total	17		
Larve 5	<i>Thymus vulgaris</i>	Dose	4	420,50	143,35**
		Erreur	10	2,93	
		Total	14		
	<i>Lavandula. angustifolia</i>	Dose	4	283,83	67,57**
		Erreur	10	4,20	
		Total	14		

** : différence hautement significative.

Dans les tableaux 31 et 32, sont exposés les résultats des différentes doses létales (DL 10, DL 50, DL 90) de *T. vulgaris* et *L. angustifolia* contre les larves de stade 3 et 5 de la chenille processionnaire au laboratoire.

Tableau 31. Effet de différentes concentrations des huiles essentielles de deux plantes *T. vulgaris* et *L. angustifolia* contre les larves de stade 3 de la chenille processionnaire au laboratoire

	Mortalité moyenne (%)	
	<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Lavandula angustifolia</i>
Dose (ml L ⁻¹)	Larve 3	Larve 3
0,005	40,97	-
0,01	66,67	29,86
0,02	78,47	43,75
0,03	91,67	64,58
0,04	100	81,25
0,05	-	92,36
0,06	-	100
DL10	0,005	0,01
DL50	0,013	0,031
DL90	0,031	0,049
Equation	Y = 4,3 + 2 x	Y = 5,21 + 2,86 x
Ddl	2	3
X²	3,71	1,92

Comme le montre les tableaux 31 et 32, l'effet des huiles essentielles de plantes sur les chenilles est lié à la dose. Par exemple, l'huile essentielle de *Thymus vulgaris* à 0,02 ; 0,03 et 0,04 ml L⁻¹ a produit respectivement 78, 91 et 100% de mortalité pour les chenilles L3 (Tab. 31, Fig. 60). Là encore, l'huile essentielle de *Thymus vulgaris* à 0,06 ; 0,08 et 0,1 ml L⁻¹ a provoqué respectivement 70, 84 et 100% de mortalité chez les larves L5 (Tab. 32, Fig. 61). Cependant l'huile essentielle de *Lavandula angustifolia* à 0,04 ; 0,05 et 0,06 a causé respectivement 81, 92 et 100 % de mortalité chez les larves L3 (Tab. 31, Fig. 60). En revanche chez les larves L5, l'huile essentielle de cette plante a provoqué un maximum de mortalité de 66% pour une dose maximale de 0,12 ml L⁻¹ (Tab. 32, Fig. 61).

Tableau 32. Effet de différentes concentrations des huiles essentielles de deux plantes *T. vulgaris* et *L. angustifolia* contre les larves de stade 5 de la chenille processionnaire au laboratoire

	Mortalité moyenne (%)	
	<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Lavandula angustifolia</i>
Dose (ml L ⁻¹)	Larve 5	Larve 5
0,02	36,11	-
0,04	56,25	14,58
0,06	70,83	27,78
0,08	84,03	43,75
0,1	100	52,78
0,12	-	65,97
DL10	0,035	0,042
DL50	0,056	0,097
DL90	0,091	0,225
Equation	Y = 3,34 + 2,14 x	Y = 3,2 + 3 x
DII	2	2
X²	4,39	0,14

Le plus puissant des deux plantes testées contre les chenilles L3 était *Thymus vulgaris* avec une DL50 de 0,01 ml L⁻¹, tandis que le moins puissant des deux plantes testées était *Lavandula angustifolia* avec une DL50 de 0,03 ml L⁻¹. De même chez les larves L5, *Thymus vulgaris* demeure la plante la plus puissante avec une DL50 de 0,05 ml L⁻¹ contre une DL50 de 0,09 ml L⁻¹ pour la plante *Lavandula angustifolia*.

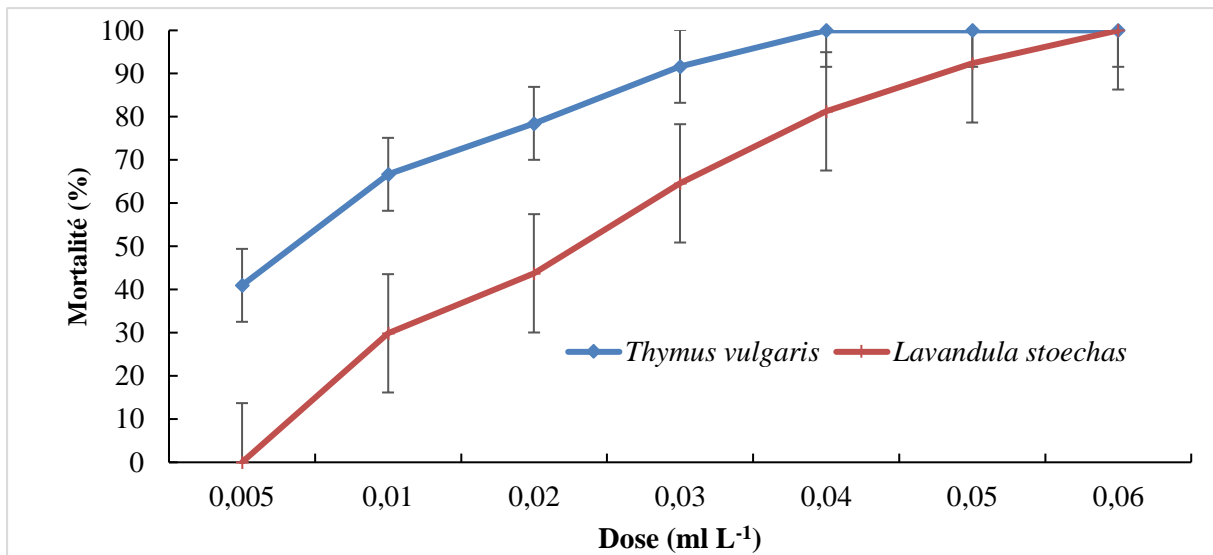


Figure 60 : Pourcentage de mortalité des chenilles processionnaires L3 après exposition aux huiles essentielles de deux plantes sur terrain

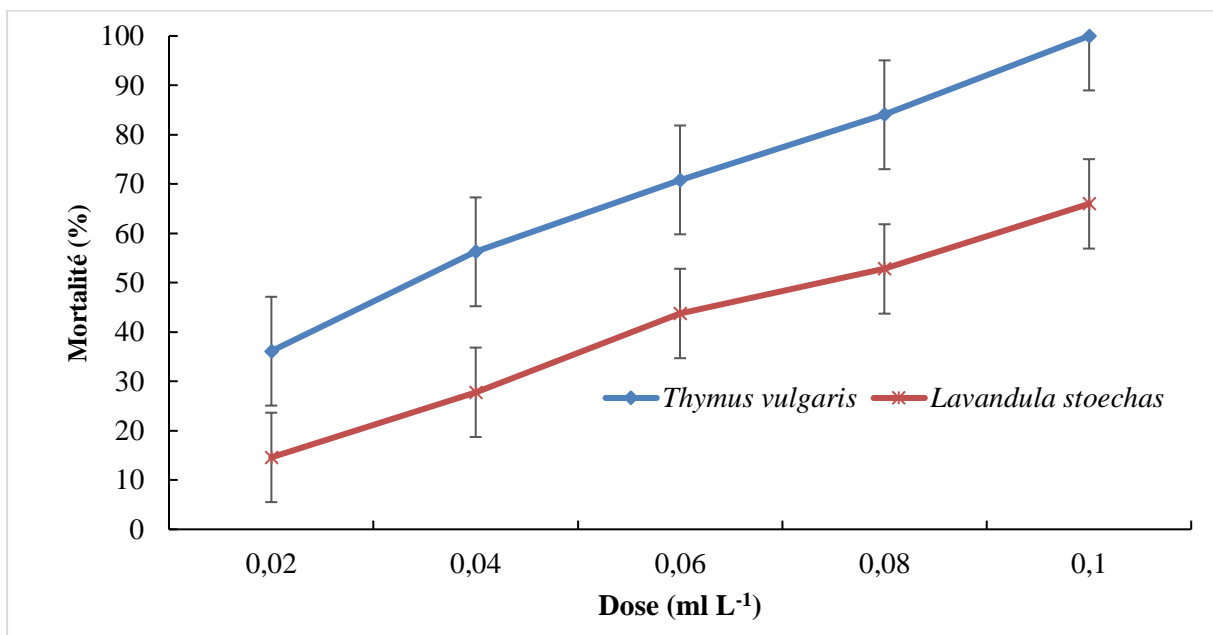


Figure 61 : Pourcentage de mortalité des chenilles processionnaires L5 après exposition aux huiles essentielles de deux plantes au laboratoire

4.5.2. Effet des huiles essentielles sur les chenilles dans les nids d'hiver

Dans le tableau 33 sont présentés les résultats issus de l'analyse de variance de l'effet biocide des huiles essentielles de deux plantes *Thymus vulgaris* et *Lavandula angustifolia* contre les larves de stade trois et cinq de la chenille processionnaire du pin d'Alep dans les conditions *in vivo*.

Tableau 33. Analyse de variance sur l'effet des huiles essentielles de deux plantes *T. vulgaris* et *L. angustifolia* contre les larves de la chenille processionnaire au terrain

Stade larvaire	Huile essentielle	Source	Ddl	Moyenne des carrés	F
Larve 3	<i>Thymus vulgaris</i>	Dose	4	523,76	15,80**
		Erreur	10	33,13	
		Total	14		
	<i>Lavandula. angustifolia</i>	Dose	5	400,90	8,92**
		Erreur	12	44,93	
		Total	17		
Larve 5	<i>Thymus vulgaris</i>	Dose	4	1454,90	4,58*
		Erreur	10	317,33	
		Total	14		
	<i>Lavandula. angustifolia</i>	Dose	4	98,50	6,26**
		Erreur	10	15,73	
		Total	14		

Les tests réalisés *in vivo* montrent que les huiles essentielles extraites des deux plantes *Thymus vulgaris* et *Lavandula angustifolia* étaient toxiques pour les larves du troisième (L3) et du cinquième stade (L5), puisqu'ils ont provoqué plus de 90 % de mortalité à fortes doses. Différentes doses ont été utilisées avec des différences entre les doses jugées hautement significative pour les huiles essentielles des deux plantes (Tab. 33).

Dans les tableaux 34 et 35 sont exposées les résultats des différentes doses létales (DL 10, DL 50, DL 90) de *T. vulgaris* et *L. angustifolia* contre les larves de stade 3 et 5 de la chenille processionnaire sur le terrain.

Tableau 34. Effet de différentes concentrations des huiles essentielles de deux plantes *T. vulgaris* et *L. angustifolia* contre les larves de stade 3 de la chenille processionnaire au terrain

Dose (ml L ⁻¹)	Mortalité moyenne (%)	
	<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Lavandula angustifolia</i>
	Larve 3	Larve 3
0,1	53,85	-
0,2	69,76	49,86
0,3	92,04	-
0,4	93,59	57,26
0,5	100,00	-
0,6	-	62,22
0,8	-	73,35
1,0	-	79,31
DL10	0,13	0,22
DL50	0,22	0,92

DL90	0,37	3,72
Equation	$Y = 2,28 + 2,28 x$	$Y = 0,7 + 1 x$
DII	2	2
X²	3,58	0,59

Comme le montre les tableaux 34 et 35, l'effet des huiles essentielles de plantes sur les chenilles est lié à la dose. Par exemple, l'huile essentielle de *Thymus vulgaris* à 0,2 ; 0,4 et 0,5 ml L⁻¹ a produit respectivement 69, 93 et 100% de mortalité pour les chenilles L3 (Tab. 34, Fig. 62). Là encore, l'huile essentielle de *Thymus vulgaris* à 0,9 ; 1,2 et 1,5 ml L⁻¹ a provoqué respectivement 89, 92 et 100% de mortalité chez les larves L5 (Tab. 35, Fig. 63). Cependant l'huile essentielle de *Lavandula angustifolia* à 0,6 ; 0,8 et 0,1 a causé respectivement 62, 73 et 79% de mortalité chez les larves L3 (Tab. 34, Fig. 62). En revanche chez les larves L5, l'huile essentielle de cette plante a provoqué un maximum de mortalité de 37% pour une dose maximale de 1,5 ml L⁻¹ (Tab. 35, Fig. 63).

Tableau 35. Effet de différentes concentrations des huiles essentielles de deux plantes *T. vulgaris* et *L. angustifolia* contre les larves de stade 5 de la chenille processionnaire au terrain

	Mortalité moyenne (%)	
	<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Lavandula angustifolia</i>
Dose (ml L⁻¹)	Larve 5	Larve 5
0,3	33,96	16,46
0,6	75,75	22,09
0,9	89,55	28,42
1,2	92,88	29,73
1,5	100	37,08
DL10	0,20	0,54
DL50	0,43	3,77
DL90	0,93	25,90
Equation	$Y = 2,86 x + 1,21$	$Y = 0,87 x - 0,47$
DII	2	2
X²	3,32	0,26

Le plus puissant des deux plantes testées contre les chenilles L3 était *Thymus vulgaris* avec une DL50 de 0,22 ml L⁻¹, tandis que le moins puissant des deux plantes testées était *Lavandula angustifolia* avec une DL50 de 0,92 ml L⁻¹. De même chez les larves L5, *Thymus vulgaris* demeure la plante la plus puissante avec une DL50 de 0,43 ml L⁻¹ contre une DL50 de 3,77 ml L⁻¹ pour la plante *Lavandula angustifolia*.

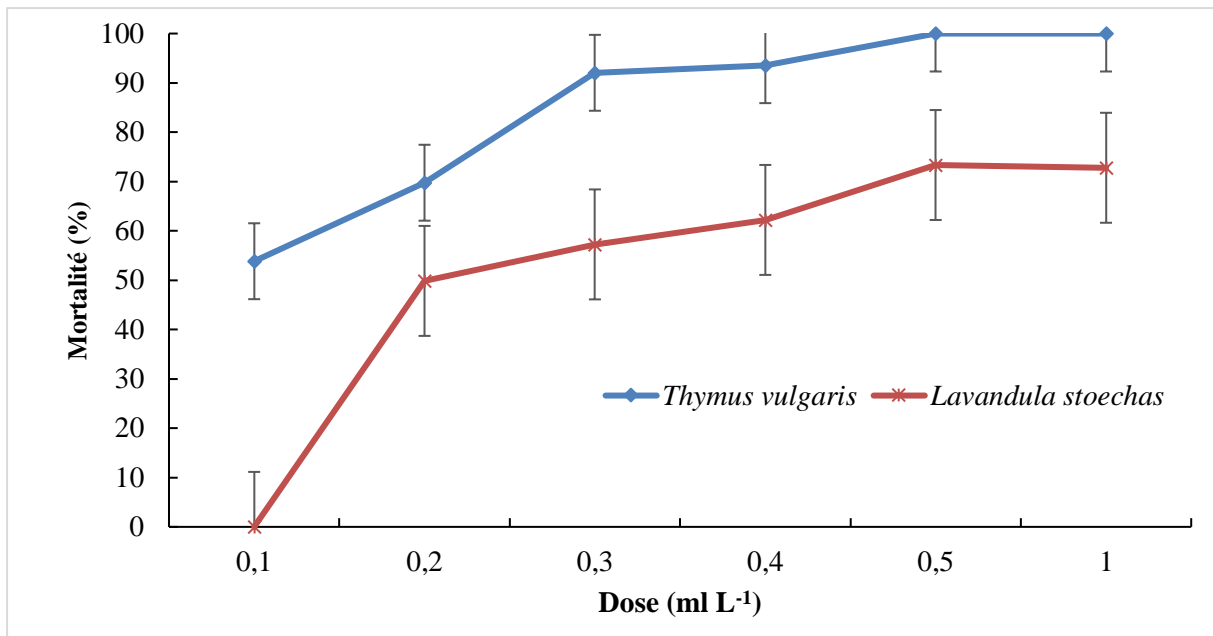


Figure 62 : Pourcentage de mortalité des chenilles processionnaires L3 après exposition aux huiles essentielles de deux plantes sur terrain

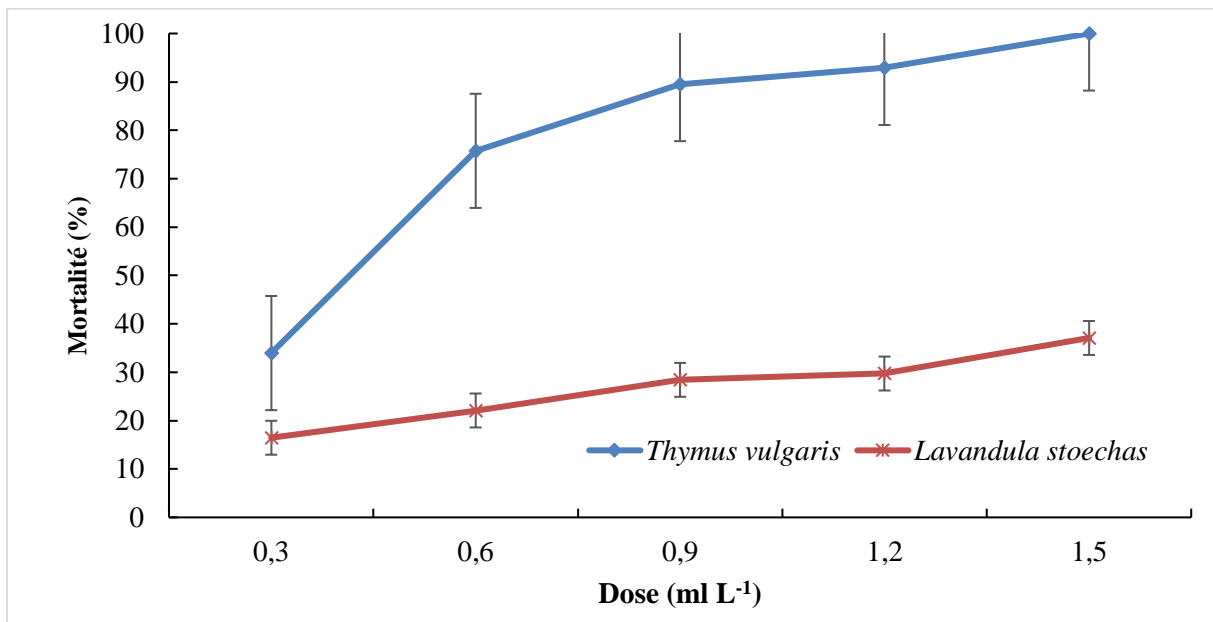
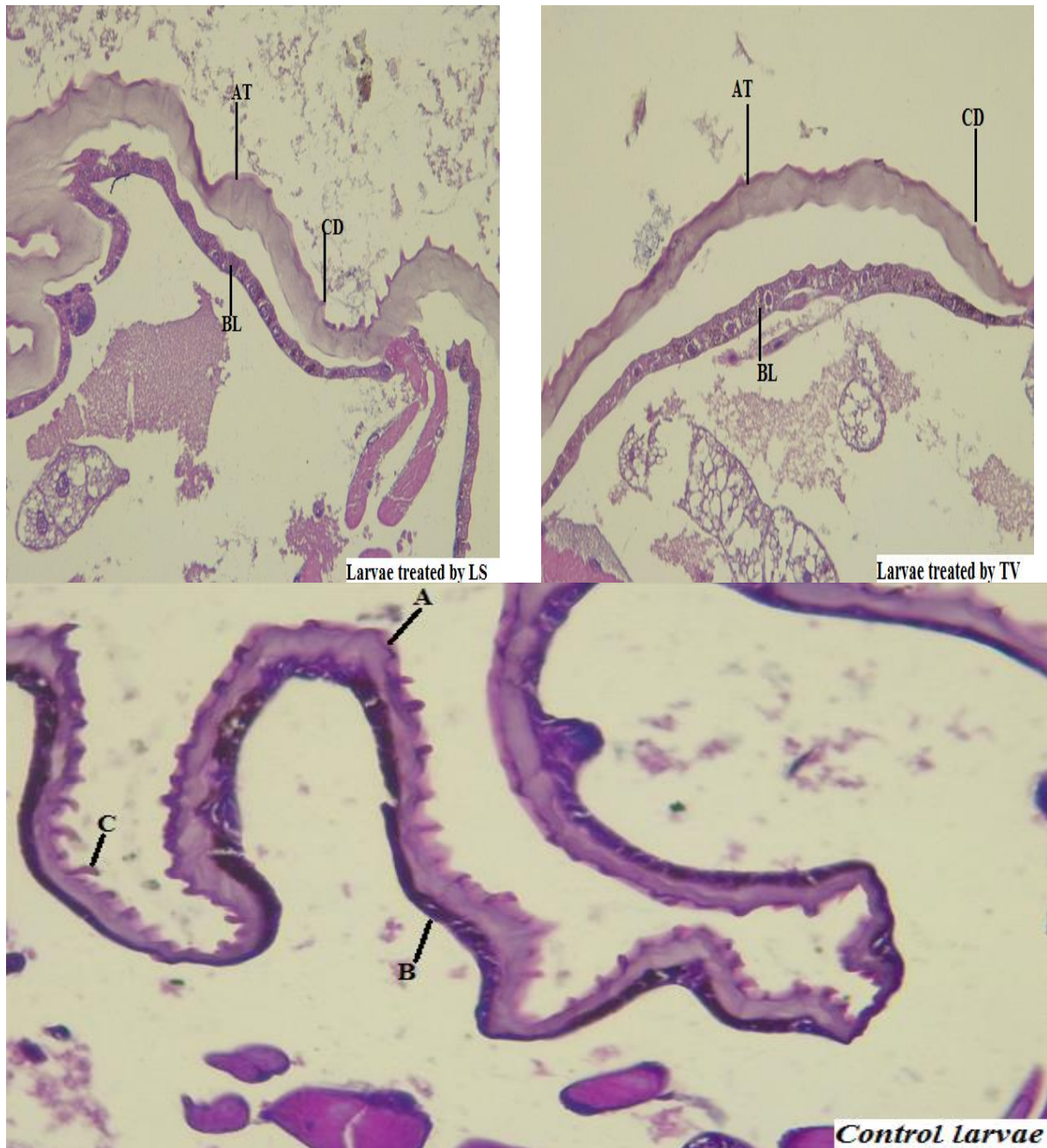


Figure 63 : Pourcentage de mortalité des chenilles processionnaires L5 après exposition aux huiles essentielles de deux plantes sur terrain

4.5.3. Effet des traitements sur les tissus des larves traitées

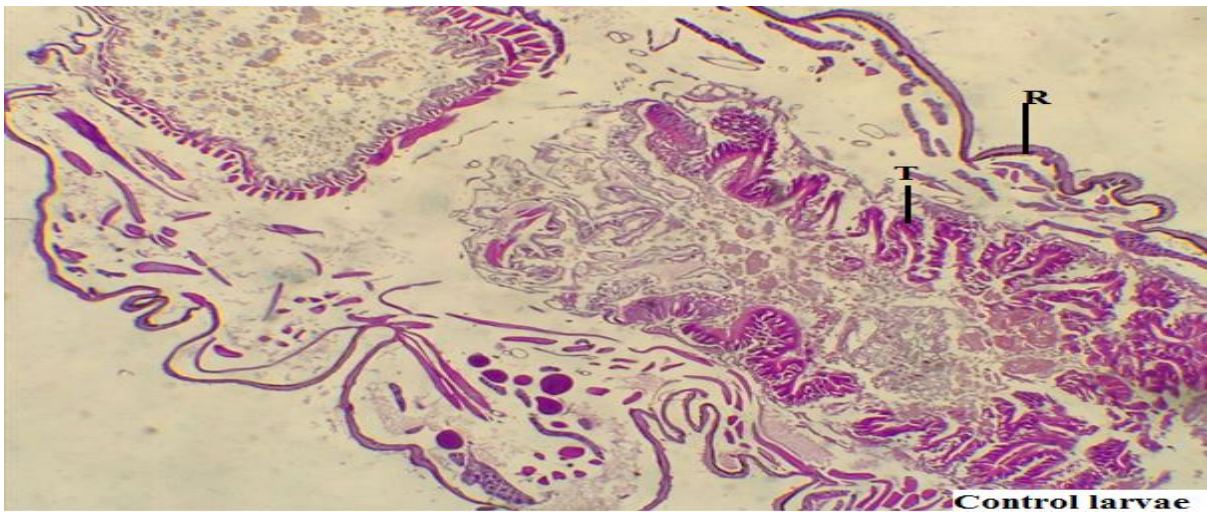
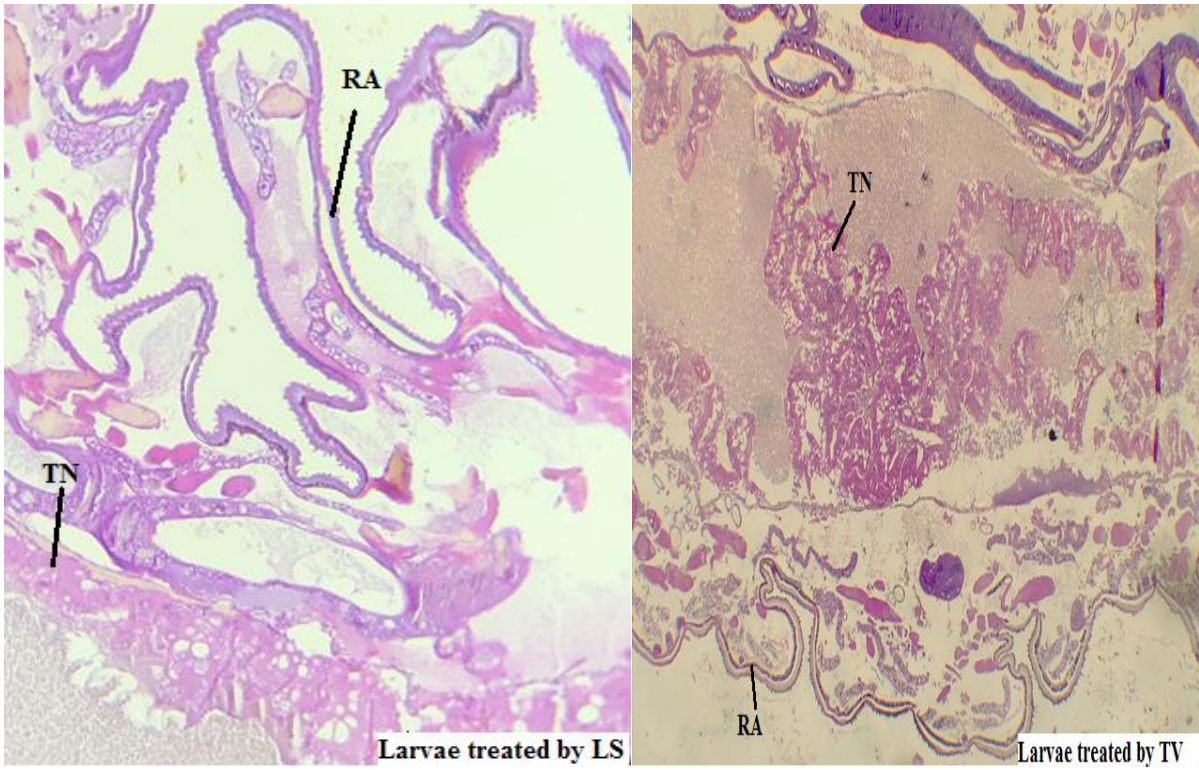
Les figures 64, 65, 66, représentent l'effet des huiles essentielles de deux plantes utilisées, sur l'histologie (revêtement cutané, tube digestive, tractus intestinal et les poils urticantes) de la chenille processionnaire du cinquième stade larvaire.



AT : épicuticule épaissi, **BL** : cellules épidermiques dépourvues (lacking) de granulation noirâtres (venin), **CD** : poils détruits.

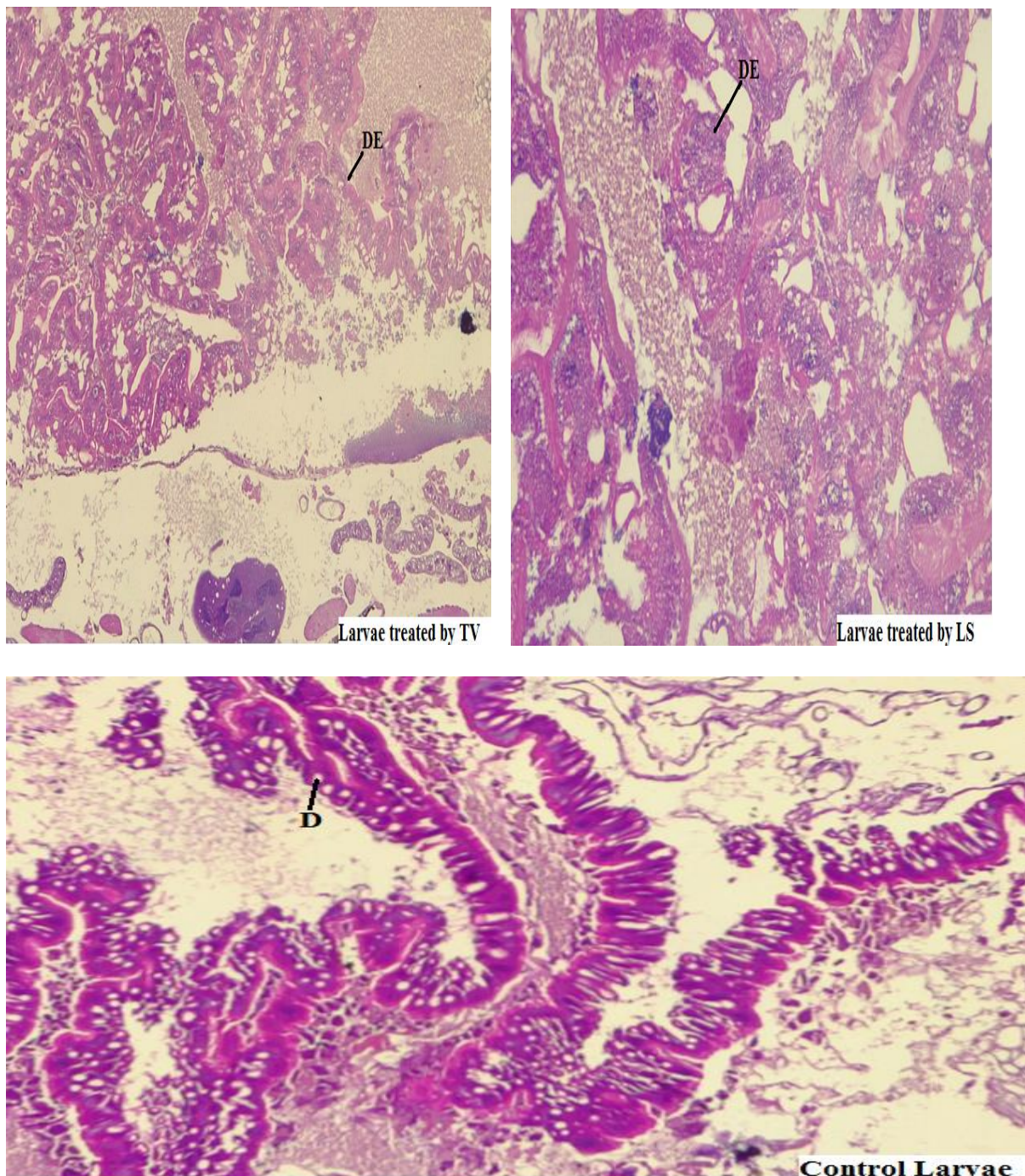
A : épicuticule, **B** : cellules épidermiques, **C** : poils

Figure 64 : Effet histologique de l'huile essentielle de *T. vulgaris* et *L. angustifolia* sur le revêtement cutané de *Thaumetopoea pityocampa*



TN : Tractus Intestinal nécrosé : nécrose des cellules intestinales, **RA** : Revêtement Cutané altéré : altération des cellules épidermiques, **T** : Tractus Intestinal, **R** : Revêtement Cutané.

Figure 65 : Effet histologique de l'huile essentielle de *T. vulgaris* et *L. angustifolia* sur le tractus intestinal de *Thaumetopoea pityocampa*



DE : cellules intestinales nécrosées, **D** : cellules intestinales saine

Figure 66 : Effet histologique de l'huile essentielle de *T. vulgaris* et *L. angustifolia* sur l'intestin de *Thaumetopoea pityocampa*

Les coupes histologiques du tractus intestinal et du revêtement cutané des larves L5 traitées, montrent que les huiles essentielles de *T. vulgaris* et *L. angustifolia* ont provoqué des anomalies histologiques conséquentes. L'examen microscopique dans notre étude montre des

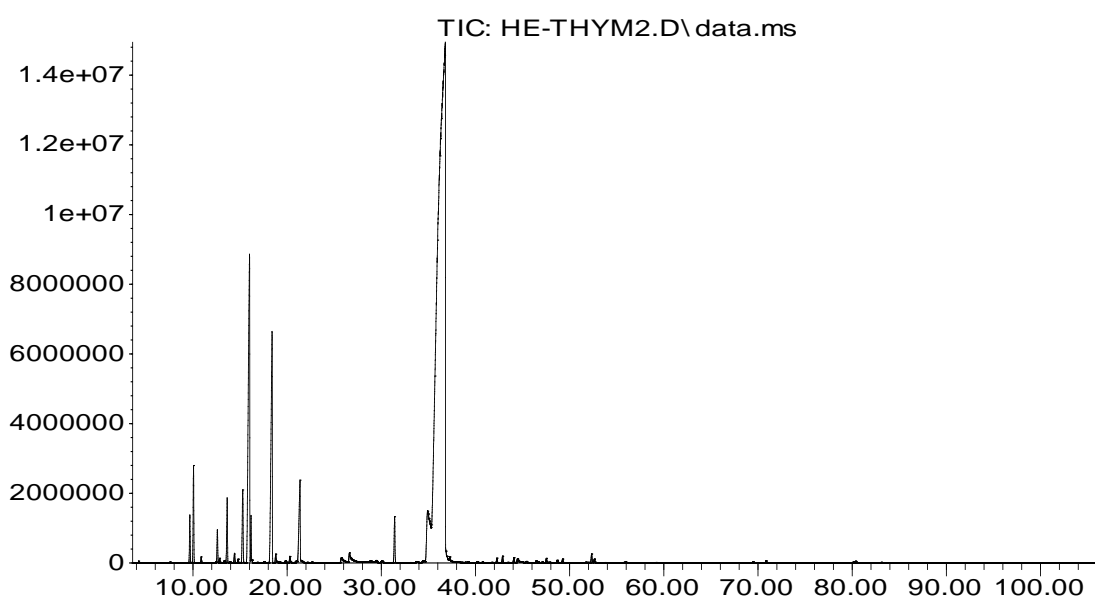
altérations cellulaires représentées par des lésions dégénératives et des foyers de nécrose cellulaire au niveau du tractus intestinal (Fig. 65 et 66) et du revêtement cutané (Fig. 64).

Les structures des larves témoins montrent un aspect conservé, régulier et normal du tractus intestinal (Fig. 65 et 66) et pour le revêtement cutané (Fig. 64), le cytoplasme est clair et entouré par une membrane adhésive basale normale.

4.5.4. Analyse chromatographique des huiles essentielles de *Thymus vulgaris* et *Lavandula angustifolia*

Le rendement moyen en huiles essentielles de *T. vulgaris* est de 2,64 % et de 1,5 % pour *L. angustifolia*. Les analyses chromatographiques des huiles ont permis d'identifier 35 composés représentant environ 98,84 % pour *T. vulgaris* (Fig. 67), contre 36 composés de *L. angustifolia* représentant 98,39 % (Fig. 68).

Abundance



Time-->

Figure 67 : Analyse chimique par Chromatographie en Phase Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse (GC-MS) de l'huile essentielle de *Thymus vulgaris*

L'analyse par CG-MS de l'essence de *T. vulgaris* de la région d'Ain Defla (nord d'Algérie), nous a permis d'identifier 35 composés, dont le principal est le carvacrol (71,35 %), accompagné d'autres constituants avec des teneurs beaucoup plus faibles : p-cymène (8,17 %), γ -terpinène (5,48 %), thymol (3,46 %), linalol (1,89 %), α -pinène (1,25 %) et α -terpinène (1,22 %). Quant aux restes des constituants, ils sont à l'état de traces.

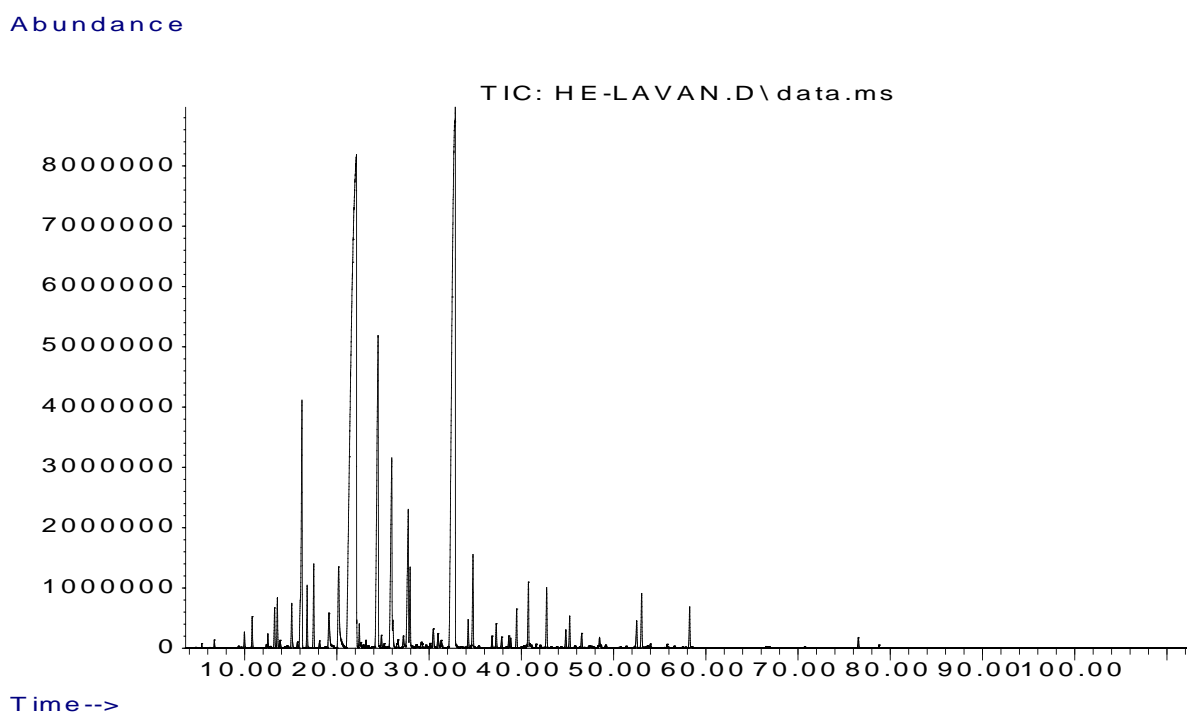


Figure 68 : Analyse chimique par Chromatographie en Phase Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse (GC-MS) de l'huile essentielle de *Lavandula angustifolia*

L'analyse par CG-MS de l'essence de *L. angustifolia* de la région d'Ain Defla (nord d'Algérie) nous a permis d'identifier 36 composés, dont les principaux sont le Linalool (37,92 %) et Linalyl acetate (25,94 %), accompagné d'autres constituants avec des teneurs beaucoup plus faibles : Camphor (6,77 %), Eucalyptol (3,93 %), Borneol (3,68 %), α -Terpineol (2,43 %), Fenchone (1,81 %), Lavandulyl acetate (1,17 %). Quant aux restes des constituants, ils sont à l'état de traces.

4.6. Résultats du piégeage des adultes à l'aide des phéromones sexuelles

4.6.1. Période d'envol des papillons mâles

Pour contrôler le nombre de papillons mâles de la chenille processionnaire du pin, nous avons installé des pièges à phéromones dans les quatre stations d'étude. Les tableaux 36 et 37, présentent les résultats obtenus.

Tableau 36. Période d’envol des papillons mâles de la chenille processionnaire du pin

	Nombre de piège	Hauteur d’arbre	Total des captures	Début de capture	Fin de capture	Période de capture
Station 1	01	8,2 m	150	17/08/2016	05/10/2016	50 jours
Station 2	01	6,5 m	152	22/08/2016	09/10/2016	49 jours
Station 3	01	07 m	179	19/08/2016	12/10/2016	55 jours
Station 4	01	2,4 m	300	20/08/2016	08/10/2016	50 jours

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

La date d’émergence ainsi que la période d’envol des papillons de la chenille processionnaire du pin d’Alep, varient d’un biotope à un autre, cette variation est marquée par une différence d’étendue des distributions d’émergence et une hétérogénéité des effectifs journaliers des papillons mâles piégés. L’étendue représente la période totale de capture ou d’envol du papillon mâle du premier jusqu’au dernier jour de capture. Il ressort du tableau 36 que les captures des papillons mâles varie entre 150 papillons dans la forêt naturelle du mont Doui et 300 papillons piégés dans le reboisement de Temoulgha.

Les moyennes des papillons mâles capturés par les pièges à phéromones dans les quatre stations sont reportées dans le tableau 37.

Tableau 37. Moyenne de capture des papillons mâles de la chenille processionnaire du pin

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Station 1	0	8	3,00	2,50
Station 2	0	8	3,10	2,42
Station 3	0	10	3,25	2,70
Station 4	0	15	6,00	4,24

Station 1 : forêt naturelle du mont Doui; Station 2 : forêt naturelle de Temoulgha; Station 3 : reboisement de Babor; Station 4 : reboisement de Temoulgha.

Dans les trois première stations la moyenne de capture se situe entre $3,0 \pm 2,5$ papillons par jour et $3,25 \pm 2,70$ papillons mâles par jour. Tandis que dans la station 4, la moyenne de capture est de $6,0 \pm 4,24$ papillons mâles par jour.

4.6.2. Comparaison des rythmes de capture des papillons mâles dans les différents biotopes

Les figures 69, 70, 71 et 72 représentent les fluctuations journalières des effectifs des papillons mâles capturés par les pièges à phéromone dans les stations d'études. Elles affichent une variation dans les départs d'émergence, et une hétérogénéité de captures journalière. Le nombre de papillons capturés par les phéromones diffère d'un jour à l'autre dans une même station, nous avons obtenu, parfois, un arrêt des captures, qui atteint quatre jours dans le reboisement de Babor, et deux jours pour les autres stations, puis les imagos mâles recommencent à émerger. Les conditions climatologiques jouent un rôle dans les départs et les fins d'émergence des papillons mâles de la chenille processionnaire du pin.

Selon les constats des suivis journaliers, la cadence d'émergence des mâles est variable dans toutes les stations, avec un enregistrement d'un pic maximal pour chaque station. La période d'enregistrement des pics est variable d'une station à l'autre et se situe entre le dixième et le dix-huitième jour, suivi d'une régression avec enregistrement de pics secondaires d'une durée plus réduite.

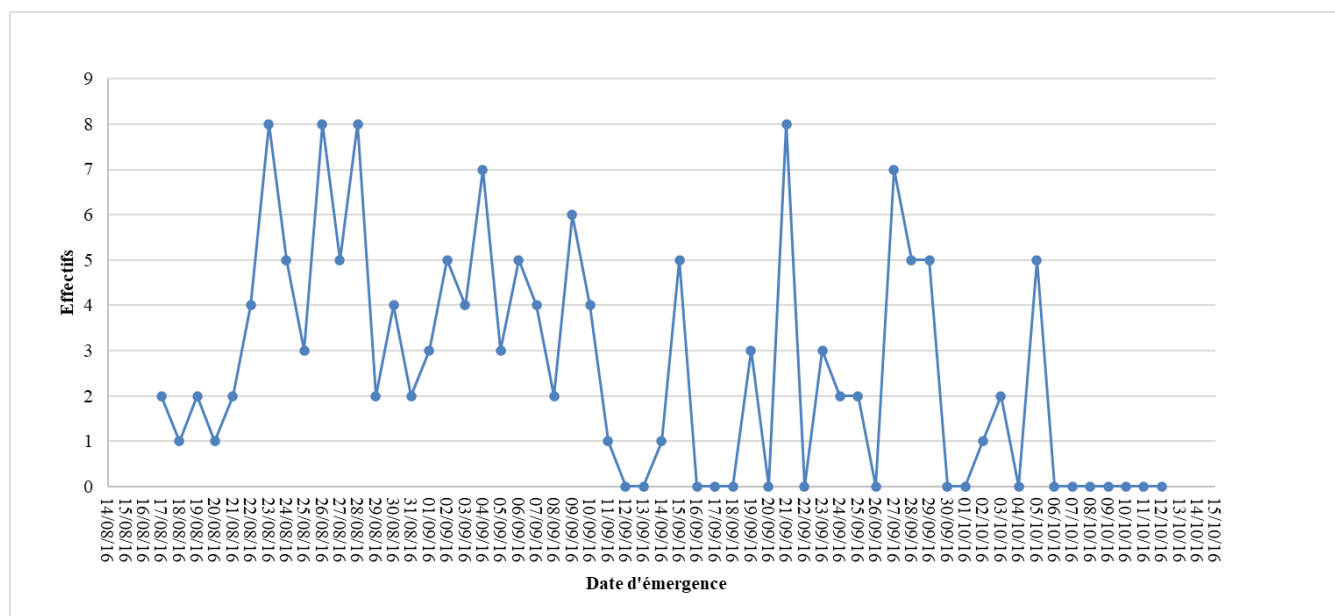


Figure 69 : Effectifs journaliers des captures des imagos mâles dans la forêt naturelle du mont Doui

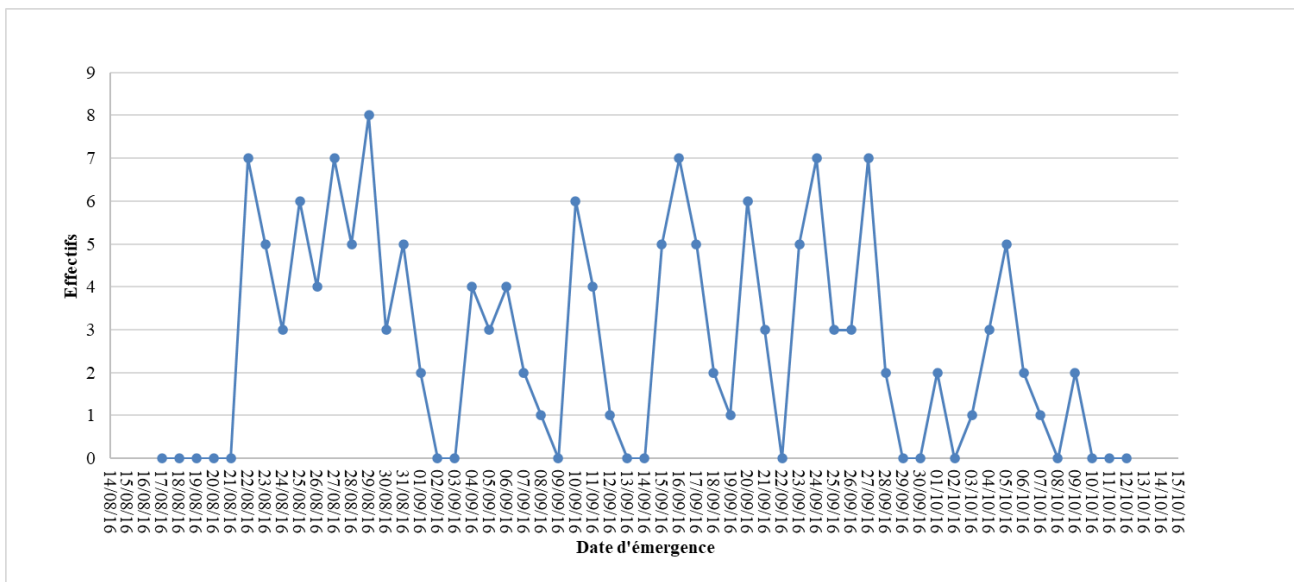


Figure 70 : Effectifs journaliers des captures des imagos mâles dans la forêt naturelle de Temoulgha

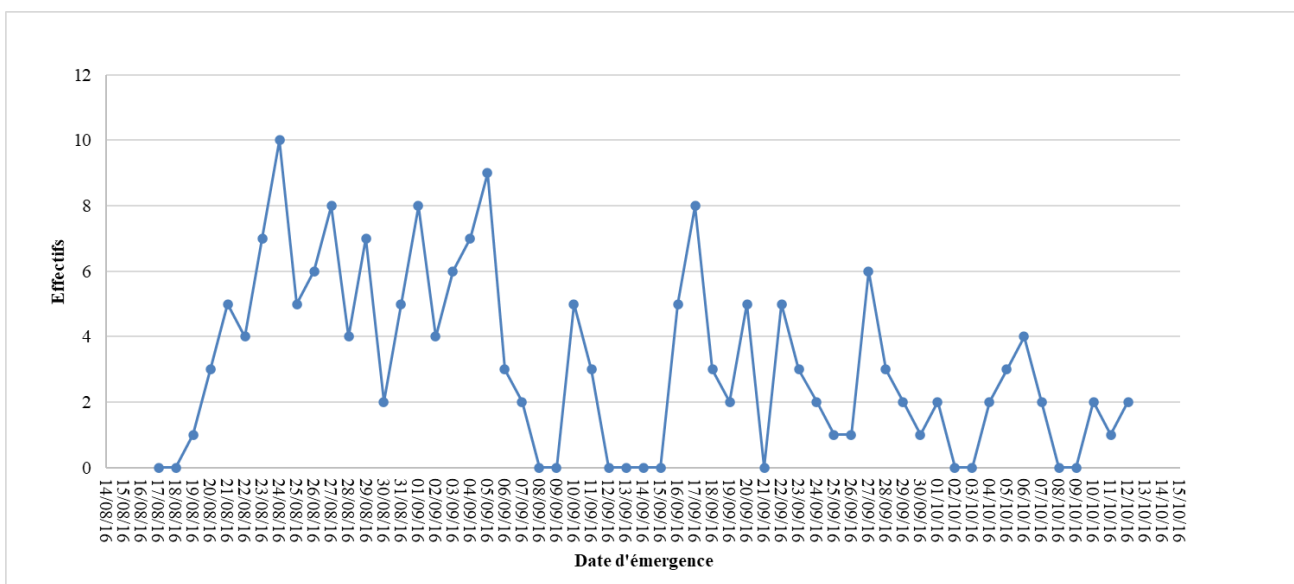


Figure 71: Effectifs journaliers des captures des imagos mâles dans le reboisement de Babor

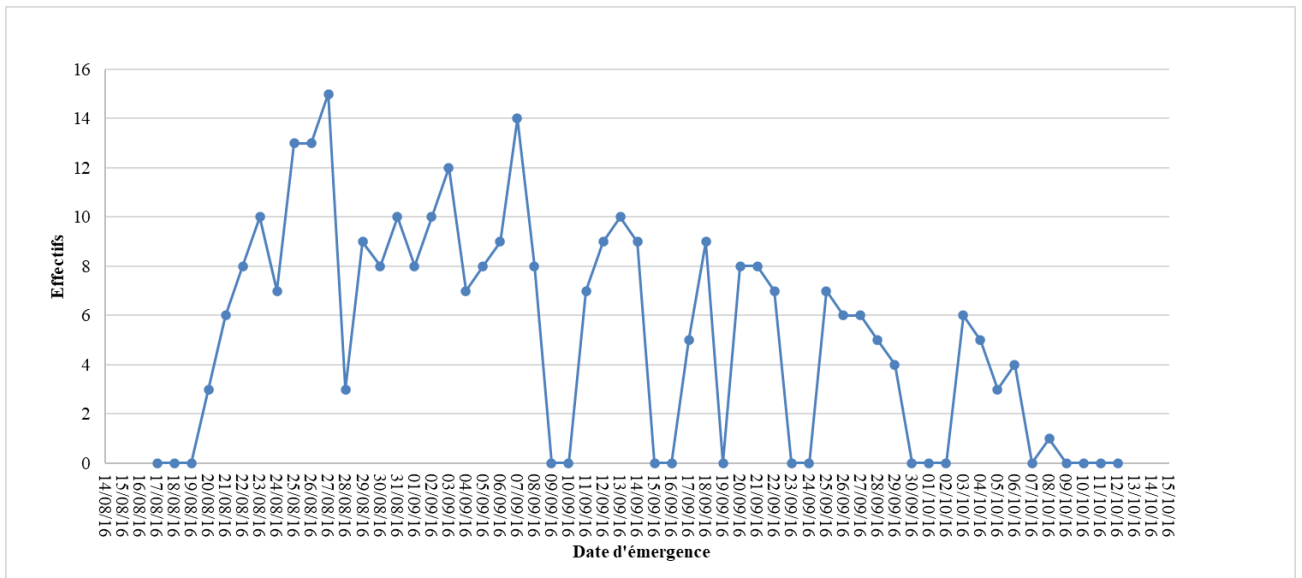


Figure 72 : Effectifs journaliers des captures des imagos mâles dans le reboisement de Temoulgha

4.6.3. Constat du suivi général des stades phénologiques de la chenille processionnaire dans la région d'Ain Defla

Suite aux six années de suivi de la chenille processionnaire dans les quatre stations d'études de la wilaya d'Ain Defla, et suite aux résultats trouvés dans la présente étude, nous avons élaboré un schéma général qui résume les différents stades phénologiques (Fig. 73).

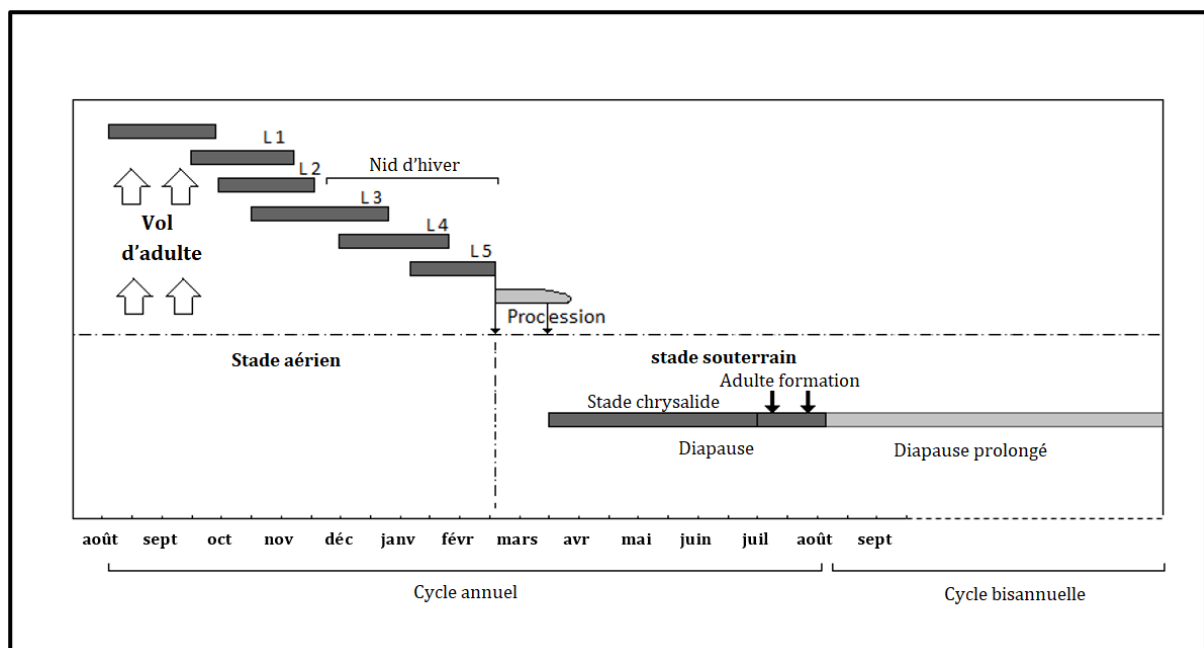


Figure 73 : Différentes écophases de la chenille processionnaire du pin dans la région d'Ain Defla

L'émergence des imagos a débuté durant le dernier mois de la période estivale (mois d'août) et a pris fin au mois d'octobre. Les périodes étant variables d'une station à l'autre. À la mi-septembre nous avons enregistré les premières éclosions d'œufs dans la forêt naturelle d'Ain Defla, c'est le stade larvaire un (L1), suivi directement par le stade larvaire deux (L2) au courant du même mois (septembre). Ces deux stades ont duré entre 10 et 12 jours selon la station. Au début du mois d'octobre nous avons commencé à observer le troisième stade larvaire (L3), ces observations ont duré jusqu'à la fin du mois de décembre.

Les nids d'hiver de la chenille processionnaire commencent à apparaître dès la fin du mois de novembre, durant cette période nous avons observé des chenilles de quatrième stade larvaire (L4). L'observation du stade L4 a duré jusqu'à la fin du mois de janvier. Au début de ce dernier, les chenilles du dernier stade larvaire (L5) ont commencé à apparaître, leur observation a duré jusqu'à la fin du mois d'avril.

La procession des chenilles a débuté à la mi-février et s'est achevée à la fin du mois d'avril. Parfois, durant ce suivi, nous avons observé un mélange de différents stades larvaires dans un même nid d'hiver :

- Stade larvaire deux, trois et quatre ;
- Stade larvaire trois, quatre et cinq ;
- Stade larvaire quatre et cinq.

Quant à la phase sous-terrainne qui est impossible à suivre de manière aisée *in vivo*, nous l'avons remplacé par un suivi *in vitro*. Les chenilles capturées au moment de la procession sont conditionnées *in vitro*. Elles ont commencé à se transformer en chrysalides quelque jours après, mais il faut remarquer que nous avons observé les faits suivants :

- Certaines chenilles se sont transformées en imagos ;
- Certaines chenilles sont restées telles qu'elles ;
- Certaines chenilles sont parasitées ;
- Certaines chenilles sont restées à l'état de chrysalides.

Cette écophase dure de quatre à cinq mois selon les conditions climatiques.

Chapitre 5

Chapitre 5 : Discussion sur la bio-écologie de la chenille processionnaire du pin, sur la lutte par l'utilisation des huiles essentielles et le piégeage des mâles par les phéromones sexuelles.

5.1. Discussion sur les nids d'hiver

5.1.1. Caractéristiques des nids d'hiver

Les nids d'hivers de la chenille processionnaire, prennent des formes multiples, mais la forme la plus observée est celle d'une bourse sphérique de soie, d'une couleur blanche, remarquable. Lorsque les chenilles ont choisi l'emplacement où construire le nid définitif, elles le construisent de façon coordonnée et l'entretiennent régulièrement. La colonie ne quitte son habitacle que la nuit si la température est supérieure à 0 °C (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

La hauteur moyenne des nids d'hivers observés dans notre étude varie selon la hauteur des arbres hôtes, d'une manière générale la hauteur des nids dans les deux forêts naturelles varie entre 7,05 et 8,02 m (forêt naturelle du mont Doui) et entre 3,74 et 4,32 m (forêt naturelle de Temoulgha). Cependant dans les reboisements, les hauteurs relevées sont faibles comparativement aux forêts naturelles, avec une moyenne comprise entre 2,56 et 3,44 m (reboisement de Babor) et entre 0,79 et 0,93 m (reboisement de Temoulgha).

Les résultants trouvés dans les deux reboisements sont pratiquement proches de ceux notés par GUENDOUZ (2001) et AZZOUZI et ZERGUINE (2012), avec respectivement des hauteurs comprises entre 1,88 et 2,94 m et entre 0,9 et 2,4 m. BAKRIA (2015), souligne que la hauteur moyenne des nids du reboisement d'El Maâlba (Djelfa) varie entre 1,5 et 6,3 m, ces valeurs sont proches à nos résultats enregistrés dans le reboisement de Babor.

Il ressort de notre étude que la hauteur des nids d'hivers est soumise à plusieurs paramètres, tel que la hauteur des arbres et leurs formes (la biomasse) et la densité de leurs rameaux. Nous avons remarqué, systématiquement, que dans les arbres élancés, hauts et dépourvus de rameaux bas, les nids d'hivers sont installés en hauteur. Cette observation est la plus notée dans la forêt naturelle du mont Doui. Les arbres dans cette station sont caractérisés par leurs cimes qui atteignent plus de 10 m, avec un tronc dépourvu de rameaux bas.

5.1.2. Estimation de la densité des nids d'hiver

Le comptage des nids d'hivers fait apparaître une claire différence entre la station forêt naturelle du mont Doui et les autres stations. Le nombre de nids varie entre 12 et 17 nids dans celle-ci, quant aux autres stations, il est compris entre 25 et 27 nids dans la forêt naturelle de Temoulgha, entre 31 et 35 nids dans le reboisement de Babor et entre 32 et 35 au niveau du

reboisement de Temoulgha. Le nombre de nids enregistrés dans les deux reboisements de la présente étude est presque similaire à celui noté par BAKRIA (2015) dans le reboisement de Maâlba (Djelfa), avec une densité comprise entre 34 et 37 nids/arbre. A Moudjebara (Djelfa), GUENDOUIZ (2001) souligne un nombre de nids qui fluctue entre 31 et 90 nids.

Quant aux moyennes de nids par arbre, nous avons enregistré une densité qui varie entre 1,2 et 1,7 nids/arbre dans la forêt naturelle du mont Doui, entre 2,5 et 2,7 nids/arbre dans la forêt naturelle de Temoulgha, entre 3,1 et 3,4 nids/arbre dans le reboisement de Babor et entre 3,2 et 3,3 nids/arbre dans le reboisement de Temoulgha. Ces résultats sont proches de ceux trouvés par GUENDOUIZ (2001), avec une densité qui se situe entre 0,5 et 2,2 nids/arbre à Moudjebara et entre 1,7 et 3,3 nids/arbre dans la bande forestière d'El Mesrane (Djelfa). La même densité est signalée par AZZOUZI et ZERGUINE (2012), elle est proche de celle de notre étude, avec une moyenne comprise entre 1,67 et 2,73 nids/arbre et un nombre total de nids se situe entre 50 et 82 nids.

Nos résultats obtenus dans les deux reboisements sont similaires à ceux trouvés par GAZRAM et BENMELOUKA (2013) au niveau du reboisement de Moudjebara à Djelfa, avec une moyenne comprise entre 3,1 et 4,66 et un nombre total de nids qui oscille entre 31 et 41 nids. Les mêmes auteurs ont trouvé dans le reboisement de Djebel Shary (Djelfa) des résultats pratiquement identiques aux nôtres dans la forêt naturelle de Temoulgha, avec une moyenne qui varie entre 2,5 et 3,58 nids/arbre et un nombre total compris entre 24 et 32 nids.

5.1.3. Biométrie des nids d'hiver

La moyenne des mensurations des longueurs des nids d'hiver varie selon plusieurs facteurs. Pour les deux forêts naturelles nous avons relevé des mesures de 5 à 24 cm, avec une moyenne comprise entre 9,99 et 16,85 cm. Quant aux stations reboisées, les mesures relevées sont comprises entre 3 et 25 cm. La moyenne varie entre 9,33 et 12,23 cm. BAKRIA (2015) souligne que la longueur moyenne des nids d'hiver au reboisement d'El Maâlba (Djelfa) varie entre 5,68 et 7,06 cm. DEIA (2002) enregistre une longueur moyenne de 8,6 cm. Nos résultats sont supérieurs à ceux trouvés par ces auteurs.

Cependant nos résultats enregistrés dans les reboisements sont similaires à ceux de GUENDOUIZ (2001) à Hassi Bahbah (Djelfa) et El Mesrane (Djelfa), avec une moyenne de 11,8 cm et 11,9 cm respectivement, et légèrement supérieur à ceux trouvés par AZZOUZI et ZERGUINE (2012) qui ont enregistré une moyenne de 8,56 cm et 9,91 cm, ainsi que de celle de DEIA (2002), qui a trouvé une longueur moyenne de 8,6 cm à Djelfa.

Quant à la largeur des nids, nous avons trouvé des limites minimales et maximales comprises entre 4 et 15 cm et une moyenne qui varie entre 5,92 et 9,38 cm pour les deux forêts naturelles. Concernant les deux reboisements, les limites minimales et maximales sont comprises entre 3 et 15 cm, avec une moyenne qui varie entre 6,63 et 7,73 cm.

La largeur moyenne de 5,7 cm trouvée par GUENDOUZ (2001) à Hassi Bahbah, est presque dans l'intervalle des résultats que nous avons noté dans les forêts naturelles, mais inférieur par rapport à ceux des reboisements. Cependant, le même auteur, note une largeur moyenne de 8,1 cm dans la station d'El Mesrane (Djelfa). Ce résultat est dans l'intervalle des résultats enregistrés dans les forêts naturelles et supérieur à ceux trouvés dans les reboisements. BAKRIA (2015), rapporte des moyennes comprises entre 4,27 et 5,73 cm. Ces résultats sont inférieurs à ceux que nous avons relevé dans les quatre stations d'étude.

Concernant le poids des nids, les résultats relevés dans cette étude varient selon les stations, pour les deux forêts naturelles, nous avons enregistré des moyennes qui varient entre 56,71 et 95,08 g. En outre, les moyennes enregistrées dans les deux stations reboisées varient entre 51,97 et 88,1 g. GAZRAM et BENMELOUKA (2013) notent une moyenne de poids qui varie entre 14,58 et 25 g dans le reboisement de Moudjebara, et entre 29,16 et 39,16 g dans la forêt naturelle de Djebel Shary (Djelfa). Par ailleurs, BAKRIA (2015), note une moyenne comprise entre 15,43 et 27,18 g (Djelfa). Nos résultats sont supérieurs à ceux relevés par ces auteurs. Les différences relevées dans les mensurations et le poids, sont probablement dû à plusieurs facteurs tels que la hauteur des arbres et la densité de leurs feuilles, le nombre de chenilles qui réussissent à survivre à la période hivernale ainsi que le taux d'infestation des stations.

5.1.4. Effectifs des chenilles trouvées dans les nids d'hiver

L'effectif des chenilles processionnaires capturées dans les nids d'hivers, varie d'une station à l'autre, le nombre le plus élevé est enregistré dans le reboisement de Temoulgha, avec un nombre maximal qui atteint 530 chenilles/nids. Le nombre moyen des chenilles dénombrées au sein des nids dans les forêts naturelles varie entre 70 et 80,84 Chenilles/nids (min. = 9 Chenilles/nids ; max. = 268 Chenilles/nids). Pour les reboisements, la moyennes est comprise entre 50,73 et 92,37 Chenilles/nids (min. = 7 Chenilles/nids ; max. = 530 Chenilles/nids). DEIA (2002) à Hassi Bahbah, note un nombre moyen de chenilles/nids qui varie entre 11 et 155 Chenilles/nids. AZZOUZI et ZERGUINE (2012) soulignent que le nombre de chenilles processionnaires par nid d'hiver varie d'une station à une autre. L'effectif le plus élevé est noté dans la station 2 avec une moyenne de 191,3. Il est suivi par

celui enregistré dans la quatrième station avec 152,5. La troisième position revient à la station 1 avec 144,6. En quatrième place vient la station 3 avec un effectif de 123,2. Dans une autre étude menée par GAZREM et BENMELOUKA (2013) dans le reboisement de Moujebara (Djelfa), le nombre de chenilles processionnaires par nid d'hiver varie d'un transect à un autre. L'effectif le plus élevé est noté dans le transect 1 avec une moyenne de 145,0 chenilles. Par ailleurs dans la forêt naturelle de Djebel Shary le nombre le plus élevé est noté dans le transect 3 avec une moyenne de 156,5 chenilles.

5.1.5. Orientation des sites des nids d'hiver

La distribution des nids d'hivers dans les stations d'études n'est pas homogène. Dans chaque station nous avons relevé une exposition dominante mais qui diffère de celle des autres. Cette hétérogénéité est observée dans plusieurs études. BAKRIA (2015), note que l'exposition Sud, est l'orientation la plus observée avec 68,9%, suivi par les orientations Est et Ouest avec 11,7 % et 7,6 % pour l'orientation Nord. Les résultats de BAKRIA (2015) sont proches aux nôtres concernant la dominance de l'exposition Sud de la forêt naturelle de Temoulgha et le reboisement de Babor. GUENDOZ (2001), signale que l'orientation Sud est toujours la plus observée, avec un taux variant de 45 à 71 % à Moujebara (Djelfa), et 60 % dans les bandes forestières de Hassi Bahbah et El Mesrane (Djelfa), les autres expositions (centre, Nord) sont limitées. L'orientation Sud est la plus observée par BADRANI (2014), dans la région de Laghouat avec 69,2 % dans la station de Khneg et 77,7 % dans la station de M'bed.

Selon les résultats trouvés dans les quatre stations et en comparaison avec d'autres études dans différents biotopes, nous pouvons en déduire que la chenille processionnaire ne tisse pas ses nids avec des orientations aléatoires, elle choisit leurs expositions selon plusieurs facteurs tels que l'ensoleillement, le vent, les rameaux les plus feuillés. Dans notre étude, nous avons observé l'emplacement des nids au centre (frondaison de l'arbre) dans les quatre stations contrairement aux observations de la plupart des autres auteurs.

5.2. Piégeage des chenilles partant en procession de nymphose

Dans cette optique, nous avons deux variables, la variation des départs en procession et la variation de la période de procession de nymphose. Pour les quatre stations d'étude, on note une variation dans l'étendue des distributions des descentes et une hétérogénéité des chenilles capturées chaque jour. L'étendue, représente la période totale de la procession (de la première capture jusqu'à la dernière), cette période varie d'une station à l'autre, pour les deux

forêts naturelles, la moyenne de la période de procession varie entre 15 et 21 jours dans la forêt naturelle du mont Doui et entre 19 et 22 jours dans la forêt naturelle de Temoulgha. Cependant la période enregistrée dans les deux stations reboisées, elle varie entre 33 et 43 jours dans le reboisement de Babor et entre 18 et 24 jours dans le reboisement de Temoulgha.

Les premières descentes sont enregistrées le 15 mars 2016, tandis que la dernière est notée le 5 avril 2016 pour la forêt naturelle du mont Doui. Dans la forêt naturelle de Temoulgha, elle débute le 17 mars 2016 et s'achève le 9 avril 2016. Dans le reboisement de Babor, elle commence le 15 mars 2016 et se termine le 26 avril 2016. Et enfin, dans le reboisement de Temoulgha, elle démarre le 17 mars et s'achève le 10 avril 2016.

GUENDOUIZ (2001), à El Mesrane et Hassi Bahbah (Djelfa), AZZOUZI et ZERGUINE (2012), à Moujebara (Djelfa) trouvent que les premières descentes massives des chenilles ont lieu à partir de la mi-mars. De même BAKRIA (2015), enregistre les premières descentes le 17 mars au reboisement d'El Maâlba (Djelfa) avec une étendue de capture qui varie entre 26 et 36 jours. Nos résultats sont similaires à ceux trouvés par ces auteurs pour le début de descente des chenilles, mais différent à ceux de BAKRIA (2015) concernant l'étendue de capture de procession de nymphose.

Par ailleurs, ZAMOUM (1987) note une descente précoce commençant le 4 mars et le 24 février à Moujebara (Djelfa), cela est peut-être dû à la température. En outre, dans la forêt de Djebel Shary, GAZREM et BENMELOUKA (2013) observent une procession tardive par rapport aux nôtres, elles débutent le 14 avril et le 20 avril.

Suite à tous ces résultats on peut déduire que le début de procession et la période de celle-ci, sont contrôlés par les conditions climatologiques, dominées principalement par la température, l'humidité et les précipitations, de plus la biomasse elle joue un rôle remarquable.

5.3. Discussion des résultats des pontes

5.3.1. Orientation des sites de pontes

La distribution de l'orientation des sites de pontes est variable, nous observons des orientations presque équitables dans la forêt naturelle du mont Doui. Cependant, pour les autres stations nous avons observé une dominance pour les orientations Est et Ouest, suivies par les orientations Sud et Nord. Enfin nous avons remarqué une dominance de l'exposition Est, qui a été la direction la plus enregistrée dans toutes les stations.

ZAMOUM (1998) à Djelfa, note que l'orientation moyenne dominante des manchons se situe à l'Est au reboisement de Moudjebara et le Sud pour la forêt de Senalba Chergui et

pratiquement une équitable distribution pour les autres orientations. Le même auteur note que les pontes sont préférentiellement observées dans la partie médiane des arbres hôtes.

Cette disparité dans les orientations est probablement due à des raisons trophiques (biomasse foliaire) dans le but de faciliter l'accès à la nourriture pour les chenilles juvéniles, ou, aussi, pour une exposition optimale à la lumière afin de capturer le maximum de chaleur, sachant que les chenilles pendant leurs premiers stades larvaires sont très faibles et influencée par les changements climatiques.

5.3.2. Distribution des pontes en fonction de la hauteur des arbres

La hauteur moyenne des pontes dans les arbres se situe entre 1,93 et 2,18 m (min. = 1 m ; max. = 4 m) dans les forêts naturelles, tandis qu'elle est entre 0,93 e 1,73 (min. = 0,4 m; max. = 3 m) dans les reboisements. ZAMOUM (1998), rapporte que la plus forte densité des hauteurs des pontes dans les arbres se situe entre 0,5 et 2 m, pour des arbres ayant une hauteur comprise entre 0,5 et 2,5 m. Concernant les arbres ayant une hauteur comprise entre 3 et 7 m, la concentration des pontes se situe entre 3,5 et 5 m. À partir de ces résultats, il ressort que les imagos de la chenille processionnaire du Pin d'Alep pondent leurs œufs à de basses ou moyennes hauteurs. Il faudra remarquer que la hauteur des arbres n'a pas vraiment d'influence. En revanche la hauteur des branches sur les troncs joue un rôle prépondérant dans l'installation des pontes, car ces dernières s'effectuent sur les branches les plus basses quelle que soit la hauteur de l'arbre.

5.3.3. Évaluation du nombre d'œufs par ponte

5.3.3.1. Effectif total des œufs

Les œufs des femelles sont déposés à partir du bas des aiguilles du pin et remontent vers le haut, ils sont visibles sur les extrémités des rameaux. Le nombre d'œuf diffère d'un manchon à l'autre. Parfois les œufs sont pondus sur les aiguilles et d'autre fois sur les petits rameaux, selon la taille de l'arbre.

Le nombre moyen d'œufs varie entre 93,77 et 141,38 œufs/manchon (min. = 9 ; max. = 249 œufs/manchon) dans les forêts naturelles, quant aux stations reboisées, il se situe entre 91,3 et 133,35 œufs/manchon (min. = 9 ; max. = 218 œufs/manchon). GACHI *et al.* (1996), notent que les pontes renferment, en fonction du stade de gradation de la population, de 70 à 300 œufs/manchon. Une étude réalisée en Algérie par BOUCHOU (2015) sur plusieurs étages bioclimatiques, donne les valeurs moyennes suivantes :

- La forêt de Blida : 187 œufs/manchon (valeurs extrêmes = 112-308 œufs/manchon) ;

- La forêt de Batna : 131 œufs/manchon (valeurs extrêmes = 60-198 œufs/manchon) ;
- La forêt de Cherchell : 174 œufs/manchon (valeurs extrêmes = 90-308 œufs/manchon) ;
- La forêt de Tlemcen : 122 œufs/manchon (valeurs extrêmes = 72-186 œufs/manchon) ;
- La forêt de Djelfa (Senalba) : 128 œufs/manchon (valeurs extrêmes = 60-210 œufs/manchon) ;
- La forêt de Sétif : 153 œufs/manchon (valeurs extrêmes = 84-234 œufs/manchon) ;
- La forêt d'El Kala : 185 œufs/manchon (valeurs extrêmes = 84-308 œufs/manchon) ;
- Reboisement d'El Bayadh : 160 œufs/manchon (valeurs extrêmes = 60-252 œufs/manchon) ;
- Reboisement de Djelfa (Moudjebara) : 121 œufs/manchon (valeurs extrêmes = 56-217 œufs/manchon).

Du point de vue général, pour les forêts, nos résultats sont pratiquement en concordance avec les valeurs trouvées dans les sites de Batna, Djelfa, Sétif et Tlemcen et légèrement inférieurs aux valeurs des autres sites (Blida, Cherchell et El Kala). Cependant, pour les reboisements, nos résultats sont presque similaires à ceux trouvés au niveau du reboisement de Djelfa (Moudjebara), mais légèrement inférieur à ceux d'El Bayadh. Si le nombre d'œufs est proche de 300 œufs/manchon la dynamique de la population de la chenille processionnaire est élevée (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

5.3.3.2. Effectif des œufs éclos

Le nombre d'œufs éclos dans les pinèdes varie d'un manchon à l'autre, la moyenne de celle-ci est comprise entre 93,77 et 141,38 œufs, soit un taux compris entre 64,44% et 85,4% dans les deux forêts naturelles et entre 91,30 et 133,35 œufs, soit un taux compris entre 72,2% et 89,6% dans les reboisements. Il s'avère que le nombre d'œufs éclos dans les reboisements est plus conséquent que celui enregistré dans les forêts naturelles. SCHMIDT *et al.* (1997) notent un taux d'éclosion comparable avec le nôtre, qui atteint 72,7%. BOUCHOU (2015) trouve les résultats suivants :

- La forêt de Blida : 176 œufs/manchon, 94,21% (valeurs extrêmes = 94-283 œufs/manchon) ;
- La forêt de Batna : 117 œufs/manchon, 89,6% (valeurs extrêmes = 46-191 œufs/manchon) ;
- La forêt de Cherchell : 163 œufs/manchon 92,84% (valeurs extrêmes = 90-250 œufs/manchon) ;

- La forêt de Tlemcen : 76 œufs/manchon 61,93% (valeurs extrêmes = 0-181 œufs/manchon) ;
- La forêt de Djelfa (Senalba) : 110 œufs/manchon 85,26% (valeurs extrêmes = 2-202 œufs/manchon) ;
- La forêt de Sétif : 105 œufs/manchon, 69,09% (valeurs extrêmes = 0-217 œufs/manchon) ;
- La forêt d'El Kala : 167 œufs/manchon, 90,28% (valeurs extrêmes = 0-280 œufs/manchon) ;
- Reboisement d'El Bayadh : 149 œufs/manchon, 93,28% (valeurs extrêmes = 41-245 œufs/manchon) ;
- Reboisement de Djelfa (Moujebara) : 110 œufs/manchon, 90,6% (valeurs extrêmes = 0-187 œufs/manchon).

Le taux d'œufs éclos dans les forêts de Tlemcen, Djelfa et Sétif est dans l'intervalle de nos résultats pour les forêts naturelles, par contre le taux d'œufs éclos dans les forêts de Batna, Blida, Cherchell et El-Kala est faiblement supérieur au nôtre, ce constat s'applique également aux reboisements. Cette variabilité est peut-être due à des facteurs extrinsèques, tels que la température, l'humidité etc.

5.3.3.3. Effectif des œufs non éclos

Le nombre moyen des œufs non éclos dans les forêts naturelles se situe entre 11,05 et 39,77 œufs soit un taux compris entre 6,9% et 25,6%. Pour les reboisements le nombre varie entre 10,15 et 21,65 œufs soit un taux compris entre 6,8% et 17,1%.

BOUCHOU (2015), dans son étude réalisée en Algérie sur plusieurs étages bioclimatiques rapporte les résultats suivants :

- La forêt de Blida : 4 œufs/manchon, 2,2% (valeurs extrêmes = 0-20 œufs/manchon) ;
- La forêt de Batna : 3 œufs/manchon, 2,3% (valeurs extrêmes = 0-11 œufs/manchon) ;
- La forêt de Cherchell : 1 œuf/manchon, 0,34% (valeurs extrêmes = 0-6 œufs/manchon) ;
- La forêt de Tlemcen : 41 œufs/manchon, 33,3% (valeurs extrêmes = 0-167 œufs/manchon) ;
- La forêt de Djelfa (Senalba) : 13 œufs/manchon, 9,83% (valeurs extrêmes = 0-155 œufs/manchon) ;
- La forêt de Sétif : 37 œufs/manchon, 24,0% (valeurs extrêmes = 0-153 œufs/manchon) ;
- La forêt de Kala : 6 œufs/manchon, 3,1% (valeurs extrêmes = 0-80 œufs/manchon) ;

- Reboisement d'EL-Bayadh : 4 œufs/manchon, 2,61% (valeurs extrêmes = 0-41 œufs/manchon) ;
- Reboisement de Djelfa (Moujebara) : 9 œufs/manchon, 7,3% (valeurs extrêmes = 0-170 œufs/manchon).

Dans les forêts naturelles, le taux d'œufs non éclos dans les forêts de Blida, Batna, Cherchell et El Kala est très faible et nettement inférieur au nôtre, par contre les résultats trouvés dans les forêts de Tlemcen et Djelfa sont dans l'intervalle de nos résultats. Cependant, le taux d'œufs non éclos à Tlemcen est supérieur à celui que nous avons relevé. Concernant les reboisements, le taux d'œufs non éclos enregistré à d'El Bayadh est inférieur à celui trouvé dans la présente étude. Tandis que dans le reboisement de Djelfa (Moujebara), le taux moyen est dans l'intervalle de nos résultats dans les deux stations reboisées.

5.3.3.4. Effectif des œufs parasités

Pour ce qui concerne les œufs parasités, le nombre moyen dans les deux forêts naturelles se situe entre 8,40 et 15,54 œufs, soit un taux compris entre 5,1% et 9,99%, en outre, la moyenne d'œufs parasités dans les deux stations reboisées varie entre 5,35 et 13,45 œufs, soit un taux compris entre 3,6% et 10,6%. Des résultats comparables ont été obtenus par BOUCHOU (2015) sur des échantillons dans différents milieux forestiers, les moyennes enregistrées sont comme suit :

- La forêt de Batna : 3 œufs/manchon, 8,1% (valeurs extrêmes = 0-12 œufs/manchon) ;
- La forêt de Cherchell : 12 œufs/manchon, 6,7% (valeurs extrêmes = 0-114 œufs/manchon) ;
- La forêt de Djelfa (Senalba) : 6 œufs/manchon, 4,9% (valeurs extrêmes = 0-24 œufs/manchon) ;
- La forêt de Sétif : 10 œufs/manchon, 6,9 % (valeurs extrêmes = 0-46 œufs/manchon) ;
- La forêt de Kala : 12 œufs/manchon, 6,6 % (valeurs extrêmes = 0-57 œufs/manchon).

Le même l'auteur note des résultats légèrement inférieurs à nos résultats dans les forêts de Blida et Tlemcen. Les résultats obtenus sont comme suit :

- La forêt de Blida : 7 œufs/manchon, 3,61 % (valeurs extrêmes = 0-33 œufs/manchon) ;
- La forêt de Tlemcen : 6 œufs/manchon, 4,75 %.

Comparativement à nos résultats, dans les stations reboisés, BOUCHOU (2015) enregistre des résultats similaires dans le reboisement d'El Bayadh, mais inférieur dans le reboisement de Djelfa, ils sont comme suit :

- Reboisement d'El Bayadh : 7 œufs/manchon, 4,1% (valeurs extrêmes = 0-39 œufs/manchon) ;
- Reboisement de Djelfa (Moujebara) : 3 œufs/manchon, 2,1% (valeurs extrêmes = 0-22 œufs/manchon).

SCHMIDT *et al.* (1997) démontre un taux de parasitisme très élevé qui atteint 21,4%. D'autres études similaires montrent un taux de parasitisme chez la processionnaire du pin élevé dans différents pays, tel que celui noté en Bulgarie, avec un taux compris entre 19,3 et 38,9% (TSANKOV *et al.*, 1996, 1998) et en Albanie, avec un taux qui varie entre 15,2 et 23,2% (MIRCHEV *et al.*, 1999).

5.3.4. Paramètres des manchons

5.3.4.1. Longueur des manchons

Les papillons de la chenille processionnaire pondent leurs œufs sur les aiguilles et les rameaux, leurs longueur moyenne varie dans les deux forêts naturelles où nous avons enregistré des longueurs moyennes comprises entre 2,3 et 2,96 cm (min. = 1,4 cm ; max. = 4,3 cm). Dans les stations reboisées, la longueur moyenne mesurée se situe entre 2,29 et 2,77 cm (min. = 1,4 cm ; max. = 4,3 cm).

Dans l'étude de BOUCHOU (2015), les valeurs moyennes des longueurs sont données dans ce qui suit :

- La forêt de Blida : 2,6 cm (valeurs extrêmes = 2 – 3,5 cm) ;
- La forêt de Batna : 2,2 cm (valeurs extrêmes = 1 – 3,5 cm) ;
- La forêt de Cherchell : 2,6 cm (valeurs extrêmes = 1,5 – 3,5 cm) ;
- La forêt de Tlemcen : 2 cm (valeurs extrêmes = 1,5 – 3 cm) ;
- La forêt de Djelfa : 2,2 cm (valeurs extrêmes = 1 – 3,5 cm) ;
- La forêt de Sétif : 2,5 cm (valeurs extrêmes = 1,5 – 3,5 cm) ;
- La forêt de Kala : 2,7 cm (valeurs extrêmes = 1,5 – 4 cm) ;
- Reboisement d'El Bayadh : 2,3 cm (valeurs extrêmes = 1 – 3,5 cm) ;
- Reboisement de Djelfa : 2,4 cm (Moujebara) (valeurs extrêmes = 1,2 – 4 cm).

En comparaison aux données recueillies dans les forêts naturelles, citée ci-dessus, nos résultats sont supérieurs à ceux de Batna, Tlemcen et Djelfa, et relativement similaires à ceux de Blida, Cherchell, Sétif et El Kala. Quant aux reboisements, nous relevons les mêmes constats, en effet, les longueurs de manchons notées dans la wilaya d'Ain Defla sont supérieures à celles relevées par BOUCHOU (2015). On peut déduire que plusieurs facteurs

extrinsèques influencent la fécondité des femelles, tels que, l'âge des arbres hôtes, leur structure, la température au moment d'accouplement, l'altitude et d'autres facteurs intrinsèques liées à l'insecte lui-même, tels que l'émergence tardive ou précoce des imagos. Selon BOUCHOU (2015), la structure de la plante hôte et sa composition peuvent influencer la fécondité des femelles dans leur environnement.

5.3.4.2. Effectifs des porte-manchons sur l'arbre

Les papillons femelles pondent leurs œufs indifféremment sur les aiguilles et sur les petits rameaux, la comparaison des taux de manchons déposés sur des rameaux ou sur des aiguilles montre une variabilité d'une station à l'autre. Le taux moyen des pontes déposées sur les aiguilles est de 41,02% dans la forêt naturelle du mont Doui ; 91,66% dans la forêt naturelle de Temoulgha ; 76,66% dans le reboisement de Babor et 90 % dans le reboisement de Temoulgha. Par ailleurs, les taux moyen des pontes déposées sur les rameaux représentent 58,97% dans forêt naturelle du mont Doui ; 8,33% dans la forêt naturelle de Temoulgha ; 26,66% dans le reboisement de Babor et 10% dans le reboisement de Temoulgha.

ZAMOUM (1998) note un taux moyen de 84,5% de pontes déposées sur les aiguilles à Moujebara (Djelfa) et 98,4% à Senalba Chergui (Djelfa). Ces résultats sont légèrement inférieurs à nos résultats notés dans la forêt naturelle de Temoulgha et dans le reboisement de Temoulgha, mais supérieurs à ceux relevés dans les deux autres stations.

Le choix des rameaux pour le dépôt des œufs est lié à la disponibilité des aiguilles idéales, les femelles toujours préfèrent en priorité les aiguilles à la place des rameaux. La même observation a été signalée par ZAMOUM (1998) dans la région de Djelfa. Pour permettre aux femelles de pondre leurs œufs, sans contraintes, il faut que le diamètre des aiguilles soit compris entre 1,6 et 2 mm (DÉMOLIN, 1969c). Selon ZAMOUM (1998), l'abondance des pontes sur les rameaux pourrait constituer une indication sur l'historique des attaques de *T. pityocampa* (variation de qualité physique des aiguilles).

Nous avons aussi observé des œufs déposés sur deux, trois ou quatre aiguilles rassemblées entre elles. Ces aiguilles sont généralement dépourvues d'écaillés, ces mêmes aiguilles portent, parfois individuellement, les œufs de ponte. Ces œufs sont exposés directement aux facteurs extrinsèques, parasitoïdes, vent, stress thermique et précipitations ce qui met en péril la réussite de l'éclosion. Les écaillés sont les protectrices des œufs contre le stress thermique (NORBETRO, 1990).

5.3.5. Identification des parasites des œufs

L'étude de matériel biologique indique une dominance totale du parasite oophage, *Ooencyrtus pityocampae*. BOUCHOU (2015), note trois espèces de parasite *Baryscapus servadeii*, *Ooencyrtus pityocampae* et *Anastatus bifasciatus*, avec une dominance des deux premières espèces. Ces deux espèces actives *Baryscapus servadeii* et *Ooencyrtus pityocampae* ont aussi été signalées par ZAMOUM (1998) dans les peuplements de Pin de Djelfa et par BERTELLA (1987) à Batna.

Les études existantes sur les parasitoïdes de la processionnaire du pin ont toujours mis en évidence la prédominance des deux espèces de parasitoïdes *Baryscapus servadeii* et *Ooencyrtus pityocampae* avec des proportions variantes selon les régions (BOUCHOU, 2015).

5.4. Effectif et biométrie des chenilles, des chrysalides et des adultes

5.4.1. Biométrie des chenilles soumises aux conditionnements dans le laboratoire

Dans les deux forêts naturelles, le poids des chenilles varie en moyenne entre 0,38 et 0,39 g, et entre 0,40 et 0,41 g dans les reboisements. BAKRIA (2015), note un poids moyen variant entre 0,33 et 0,35 g à Djelfa. D'autres résultats signalés par GUENDOOUZ (2001), qui rapporte un poids moyen de 0,37 g à Hassi Bahbah (Djelfa), et 0,36 g à El Mesrane (Djelfa) pour les chenilles mâles. Quant aux chenilles femelles elles sont plus grandes que les mâles, elles pèsent en moyen 0,51 g à Hassi Bahbah et 0,52 g à El Mesrane. Nos résultats sont pratiquement proches de ceux trouvés par ces deux auteurs.

Pour les longueurs des chenilles, nous avons enregistré une moyenne comprise entre 3,38 et 3,42 cm dans les forêts naturelles et entre 3,44 et 3,46 cm dans les reboisements. Nos résultats sont légèrement supérieurs à ceux trouvés par BAKRIA (2015) à Djelfa, où il a noté une moyenne de longueur de chenille qui varie entre 2,52 et 2,56 cm. Cependant, les résultats de GUENDOOUZ (2001) sont différents selon le sexe, pour les chenilles mâles la moyenne de longueur est de 2,6 cm et 2,7 cm à El Mesrane et Hassi Bahbah respectivement, par contre les chenilles femelles sont plus longues que les mâles et mesurent en moyenne 2,9 cm à Hassi Bahbah et 3 cm à El Mesrane. Comparativement à nos résultats, les chenilles de la région d'Ain Defla sont plus lourdes et plus longues que les chenilles de la région de Djelfa.

5.4.2. Effectifs des chrysalides, chrysalides parasitées et chenilles n'arrivant pas à se transformer

Après le conditionnement des chenilles dans des tubes en verre, la phase chrysalide démarre. Les chrysalides sont complètement formées après 20 à 25 jours de conditionnement. Nous avons observé trois classes, la première représente les chenilles qui arrivent à se transformer en chrysalides, avec un taux de 82% dans la forêt naturelle du mont Doui, 72% dans la forêt naturelle de Temoulgha, 74% dans le reboisement de Babor et 92% dans le reboisement de Temoulgha. La deuxième classe représente les chrysalides parasitées avec un taux de 8% dans la forêt naturelle du mont Doui, de 16% dans la forêt naturelle de Temoulgha, de 14% dans le reboisement de Babor et de 6 % dans le reboisement de Temoulgha. La troisième catégorie représente les chenilles qui n'arrivent pas à se transformer en chrysalides, avec un taux de 10% dans la forêt naturelle du mont Doui, de 12% dans la forêt naturelle de Temoulgha et le reboisement de Babor et de 2% dans le reboisement de Temoulgha.

Les résultats trouvés, montrent qu'il existe des facteurs internes et externes, ayant une incidence sur la réussite de la phase sous-terrainne et qui entraînent une diminution de leur nombre. Nous observons, dans cette étude, que certaines chenilles n'arrivent pas à se transformer en chrysalides, ce facteur de mortalité peut être intrinsèque est liée à la chenille elle-même ou par d'autres facteurs extrinsèques tels que la température, la structure du sol, ou l'aération. Les parasites des chrysalides sont aussi un autre facteur qui contribue à diminuer le nombre des imagos. Le taux de mortalité dû à ces deux facteurs combinés dépasse 20%. On peut dire que le nombre des imagos commence à baisser dès que les chenilles s'enfouissent sous terre.

5.4.3. Émergences journalières des adultes issus du conditionnement des chrysalides au laboratoire

Après la transformation en chrysalide, les chenilles font une métamorphose complète. En premier lieu, les chrysalides subissent un arrêt du développement, c'est la diapause. Leur période est variable selon les facteurs extrinsèques, plus précisément la température. La diapause joue le complément du cycle annuel de la chenille processionnaire. Ce qui implique que, plus la durée d'évolution est courte (région à hivers chauds), plus la diapause sera longue et inversement (HUCHON et DÉMOLIN, 1970). Dans notre région d'étude, l'été est très chaud, la température dépasse 40 °C, l'émergence des papillons débute à la fin de la période estivale. Selon les données relevées dans cette étude, nous avons quatre classes de résultats,

imagos mâles, imagos femelles, chrysalides déformées et chrysalides saines n'arrivant pas à se transformer en imagos.

Dans la forêt naturelle du mont Doui, nous avons enregistré 35,6% des imagos mâles et 26,8% imagos femelles. Le taux des chrysalides n'arrivant pas à se transformer en imagos est de 24,4%, quant aux chrysalides déformées leur taux est de 12,2%. Cependant dans la forêt naturelle de Temoulgha, nous avons noté 33,3% imagos femelles et 25,0% mâles, quant aux chrysalides qui ne sont pas transformées en imagos leur taux est de 33,3%. Également dans le reboisement de Babor, le taux des imagos femelles est de 37,8% contre 29,7% imagos mâles, quant aux chrysalides non transformées leur taux est de 32,4%. Même constatation est observée dans le reboisement de Temoulgha, avec 39,1% imagos femelles contre 30,4% imagos mâles et 30,4% de chrysalides non transformées. A l'exception la forêt naturelle du mont Doui, nous avons observé une dominance des imagos femelles dans toutes les autres stations. Les taux d'émergences sont pratiquement similaires, exception faite pour le reboisement de Temoulgha. On n'observe pas de différences remarquables entre les forêts naturelles et les reboisements.

Suite à cette étude, nous avons observé que la moitié des chrysalides n'arrivent pas à la fin du cycle phénologique et ne se transforment pas en imagos. Ceci est dû à plusieurs facteurs, tels que la température, le conditionnement des chrysalides et les champignons qui les affectent. Quand la température est très élevée, la période de diapause est prolongée. Dans ce cas, la sortie de l'adulte pourra être non seulement retardée, mais le ralentissement pourra remplacer l'organisme en diapause pour une durée d'une ou plusieurs années (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

5.5. Discussions des résultats obtenus après l'application des huiles essentielles contre le ravageur de pin d'Alep

Dans cette partie, nous allons développer des discussions sur la lutte biologique envers les deux stades larvaires de la chenille processionnaire L3 et L5, ainsi sur l'effet des huiles essentielles sur les tissus de la chenille processionnaire et celles des analyses des huiles essentielles.

5.5.1. Effet des huiles essentielles sur les chenilles au laboratoire et sur terrain

Il a été signalé dans les recherches scientifiques que les composés obtenus à partir des plantes ont un effet insecticide (PAVELA, 2008 ; PAVELA *et al.*, 2009). Dans la littérature, il a été démontré que *T. vulgaris* exercent une forte activité insecticide contre divers insectes

tels que *Culex pipiens*, *Culex quinquefasciatus*, le charançon *Acanthoscelides obtectus* et *Anopheles labranchiae* (BOUCHIKHI *et al.*, 2008 ; PAVELA *et al.*, 2009 ; EL AKHAL *et al.*, 2016).

Les traitements réalisés sur les chenilles L3 et L5 ont révélé que l'huile de *Thymus vulgaris* a provoqué une mortalité des chenilles qui atteint jusqu'à 100 % et cela *in vitro* et *in vivo*. Cependant les traitements réalisés avec l'huile de *Lavandula angustifolia* ont révélé une mortalité de 100 % qu'au niveau du laboratoire, alors que sur le terrain le taux maximal de mortalité est de 79 % pour les larves L3 et 37 % seulement pour les larves L5.

L'importante activité larvicide observée chez le *T. vulgaris* pourrait s'expliquer par l'effet des composants principaux. Les effets des huiles essentiels sont dus aux actions conjuguées des principales substances qui les composent, cependant la synergie de plusieurs substances peut en réalité être beaucoup plus importante en termes d'activité biologique (EL AKHAL *et al.*, 2016).

Les DL50 et les DL90 (ml) de l'huile essentielle de *T. vulgaris* obtenues dans notre étude sur les larves de *T. pityocampa* (L3 et L5) sont très hautement significatives par rapport à ceux trouvées chez *L. angustifolia*. Le taux de mortalité de 100% observé chez les deux stades larvaires 3 et 5, lors de l'utilisation d'huile essentielle de *T. vulgaris in vitro* et *in vivo* est en concordance avec celui de KANAT et ALMA (2004). Ces derniers ayant testés l'activité insecticide de neuf plantes sur les stades larvaires 4 et 5, avec un taux de mortalité de 100 % sous différentes doses de ces huiles. Ils ont constaté une efficacité prédominante de *T. vulgaris* par rapport à *L. angustifolia*.

Ces taux de mortalité de chenilles sont similaires à ceux trouvés par BREUER et DEVKOTA (1990), qui ont enregistré un taux de mortalité atteint 100% en utilisant *Melia azedarach*, comme biopesticide. KESDEK *et al.* (2014) notent un taux de mortalité qui fluctue entre 80 et 90 % chez les L2 et L4 de la chenille processionnaire du pin en utilisant les extraits d'*Achillea wilhelmsii* et de *Nepeta meyeri*. Par ailleurs BACHIR *et al.* (2017), ont obtenu des taux de mortalité des larves compris entre 54,4 et 56,2% en utilisant les extraits de *Juniperus phoenicea* et *Juniperus oxycedrus*. Ces taux sont relativement faibles en les comparants à nos résultats.

L'effet de l'huile essentielle de *Thymus vulgaris* sur d'autres insectes ravageurs a été confirmé par plusieurs auteurs. Ait TAADAOUIT *et al.* (2012) ont enregistré un taux de mortalité compris entre 90 % et 97 % chez *Tuta absoluta* (Lepidoptera), après les avoir traités par l'huile essentielle de *Thymus vulgaris*. KHOSRAVI et SENDI (2013) ont enregistré un effet remarquable de *T. vulgaris*, caractérisé par une diminution de la nymphose. En outre,

OULEBSIR-MOHANDKACI *et al.* (2015) rapportent un effet répulsif, causant une mortalité de *Myzus persicae* (Homoptera) comprise entre 63% et 58%

Tous ces résultats confirment l'efficacité de l'huile essentielle de *T. vulgaris* comme un biopesticide anti-appétant et répulsif sur plusieurs espèces ravageuses, en particulier la chenille processionnaire du pin.

Quant à l'huile essentielle de *L. angustifolia*, il est originaire du sud de l'Europe et de la région méditerranéenne (SHAWL et KUMAR, 2000). Cette plante a été testée comme biopesticide contre *Acanthoscelides obtectus* (REGNAULT-ROGER et HAMRAOUI, 1993), contre les larves de *Musca domestica* (BOSLY, 2013), contre les protozoaires *Giardia duodenalis*, *Trichomas vaginalis* et *Hexamita inflata* (MOON *et al.*, 2006). Il a été testé aussi comme herbicide contre *Xanthium strumarium*, *Avena sterilis* et *Phalaris brachystachys* (UREMIS, 2009) et antibactérienne contre sept souches microbiennes pathogènes (*Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Enterobacter cloacae*, *Proteus rettgeri*, *Pseudomonas aeruginosa* « Gram- » et une souche bactérienne « Gram+ » *Staphylococcus aureus*) (CHEBAIBI *et al.*, 2016).

Nous n'avons trouvé aucun autre travail concernant l'activité larvicide de *L. angustifolia* contre l'espèce *T. pityocampa*, à part celui de KANAT et ALMA (2004). Cependant, l'activité insecticide de l'huile de *L. angustifolia*, obtenue *in vitro* au stade L3 dans notre étude est très significative si l'on considère que 100% des larves de *T. pityocampa* sont mortes en raison de leur exposition à 0,06 ml L⁻¹ d'huile essentielle (DL50 = 0,03 ml L⁻¹). *In vivo*, nous avons enregistré un taux de mortalité de 73 % à la dose de 0,12 ml (DL 50 = 0,92 ml L⁻¹), cette efficacité insecticide diminue d'une manière significative au stade L5, avec un taux de mortalité de 65% à une dose de 0,12 ml (DL 50 = 0,097 ml L⁻¹) dans les conditions *in vitro*.

In vivo, le taux mortalité continu à se baisser, il atteint 37 % et une dose de 1,5 ml, (DL 50 = 3,77 ml L⁻¹). Comparativement aux résultats obtenus par KANAT et ALMA (2004), au stade L5, nos résultats, *in vitro*, sont beaucoup plus faibles. Cela est dû probablement aux faibles dosages que nous avons utilisé, sachant que notre plus forte dose est de 1,5 ml (15 %) alors que la plus faible dose appliquée par KANAT et ALMA (2004) est de 25 %, largement supérieure à celle utilisée dans la présente étude.

Néanmoins, nos résultats *in vivo* au stade L3, sont relativement en concordance avec ceux de KESDEK *et al.* (2014). Ces derniers en testant les extraits d'*Achillea wilhelmsii* et *Satureja hortensis* ont obtenu 80 % de mortalité avec la dose de 0,5 mg ml⁻¹. L'application des extraits d'*Origanum rotundifolium* et *Tanacetum argyrophyllum* ont donné 80 % et 76,6

% de mortalité respectivement en utilisant la dose de 1 mg ml⁻¹ au stade L2. Les mortalités sont aussi importantes après l'utilisation d'*Origanum onites* (86,6 %) et *Origanum rotundifolium* (83,3 %) à une dose de 1 mg ml⁻¹ et *Tanacetum argyrophyllum* (73,3 %) à une dose de 0,25 mg ml⁻¹ au stade L4 (KESDEK *et al.*, 2014).

Nous avançons la même explication pour justifier les faibles taux de mortalité *in vivo*, de plus les conditions de traitement qui sont un facteur décisif, l'application *in vivo* provoque une perturbation et affaiblit significativement l'efficacité de l'huile essentielle, cet affaiblissement est dû aux facteurs extrinsèques (vent, ensoleillement, humidité, température, densité et volume du nid) et intrinsèque (l'agglutinement des chenilles fait que celle qui sont à l'extérieur forment une carapace protectrice pour le reste de la colonie).

L'isolement des chenilles dans des récipients et le dépouillement de leur nid, qui assurait leur protection (DÉMOLIN, 1967), a eu un impact significatif sur leur résistance en les rendant vulnérables aux facteurs externes par affaiblissement de leur effet de masse, ce dernier étant un facteur de résistance et de développement du *T. pityocampa* (HUCHON et DÉMOLIN, 1970).

Dans les conditions *in vivo*, *T. vulgaris* (DL 90 = 0,37 ml) montre une supériorité très claire comparativement à *L. Angustifolia* (DL90 = 3,72 ml) chez les larves L3. Cette prédominance reste permanente au stade L5 avec une DL90 de 3,93 ml pour *T. vulgaris* contre une DL90 de 25,9 ml pour *L. angustifolia*. Cela peut s'expliquer par la différence des composés chimiques des huiles.

Après un jour de traitement les chenilles qui ne sont pas mortes commencent à quitter le nid, et tomber dans le filet tendu en contrebas, car ce nid est rendu invivable pour les chenilles, après la pulvérisation des huiles. L'odeur piquante des huiles persiste pendant 2 jours pour *L. angustifolia* et 5 jours pour *T. vulgaris* selon vitesse du vent.

Comme le nid a une structure très hiérarchisée (DÉMOLIN, 1967), comprenant deux enveloppes de soie superposées internes d'épaisseur importante, et une autre externe, plus lâche, il fait office d'éponge en absorbant l'huile, de plus les poils urticants du *T. Pityocampa*, qui ont des flèches munies de barbillons (VEGA *et al.*, 2004) ainsi que leur densité par chenille, qui est d'environ un million (CHARMOT 1987, BEDRY et GROMB 2009) sont susceptibles de retenir un maximum d'huiles. Les nids restent humides deux à trois jours après l'application des traitements selon leur position face au soleil et à la vitesse du vent.

Sachant que les extraits de plantes perdent leur activité biologique sous les radiations solaires et à la lumière (SCOTT *et al.*, 2003), il est important de faire des études plus poussées, pour trouver une combinaison optimale de composés qui aideront à maintenir plus

longtemps les huiles en place lors des traitements sur me terrain.

Le mécanisme insecticide des huiles n'est pas clair, mais il semblerait que ce soit diversifié, il est difficile de faire des comparaisons exactes avec d'autres études en raison de la grande variation de la composition des huiles, des insectes et leurs modes d'actions (KUMAR *et al.*, 2011).

Les insecticides à base de *Bacillus* sont les seuls utilisés et les plus efficaces contre ce type de lépidoptères agissant en particulier sur les jeunes larves (DÉMOLIN, 1987 ; SEBTI, 2015). Nos deux traitements durant les stades avancés, où l'insecte devient plus résistant ont montré une efficacité comparable à celles des traitements à base de *Bacillus thuringiensis* qui n'est efficace que durant les premiers stades larvaires.

Les huiles essentielles de *T. vulgaris*, provoquent des convulsions immédiates de type S chez les larves après traitement qui persistent pendant cinq minutes, la même observation fut rapportée par KANAT et ALMA (2004) sans toutefois préciser la durée.

5.5.2. Effet des huiles essentielles sur les tissus de la chenille processionnaire

Les coupes histologiques du tractus intestinal et du revêtement cutané des larves L5 traitées, montrent que les huiles essentielles de *T. vulgaris* et *L. angustifolia* ont provoqué des anomalies histologiques conséquentes. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par BACHIR *et al.* (2017) au niveau intestinal en montrant que le mélange de *Bacillus thuringiensis* et l'extrait méthanolique *M. azedarach* ayant un effet pareil sur les cellules intestinales que celui obtenu dans la présente étude. Même effet des extraits méthanoliques de *Juniperus oxycedrus* et *Juniperus phoenicea* est enregistré aux niveaux du tube digestif des chenilles (BACHIR *et al.*, 2017). Les huiles essentielles ayant présenté un double effet histologique sur le revêtement cutané et le tube digestif de la chenille processionnaire du pin.

5.5.3. Composition chimique des huiles essentielles

Le rendement en huile de *T. vulgaris* obtenu (2,6%) est relativement plus élevé que ceux obtenus par BOUGUERRA *et al.* (2017) à Blida (Algérie) avec 1,58%, par Nezhadali *et al.* (2014) en Iran avec 1,39%, par IMELOUANE *et al.* (2009) au Maroc avec 1 % et par EL-NEKEETY *et al.* (2011) en Egypte avec 0,6%. L'huile de cette espèce est légèrement supérieure, en rendement, en les comparant à d'autres espèces du même genre en Algérie telles que *Thymus numidicus* (2,1%) (KABOUCHE, 2005) et *Thymus fontanesii* (2%) (HADDOUCHI *et al.*, 2009).

Cette variabilité en rendement est probablement liée à la période et la région de récolte ainsi qu'à l'âge de la plante, qu'à la partie et l'homogénéité entre fleur et feuille (NEZHADALI *et al.*, 2014). Selon les mêmes auteurs, le rendement est différent à différents stades de la croissance de la plante.

L'huile essentielle de *T. vulgaris* d'Ain Defla renferme 35 composés, le carvacrol étant le composé majoritaire avec 71,35%, suivi par p-cymène (8,17%), γ -terpinène (5,48%). Nos résultats sont similaires avec ceux obtenus en France par KALOUSTIAN *et al.* (2008) concernant la composition chimique de *T. vulgaris*, avec des pourcentages proches de carvacrol (73,7%), γ -terpinène (13,5%) et p-cymène (10,6%).

La comparaison de nos résultats avec ceux trouvés dans la littérature montre une différence qualitative et quantitative dans les compositions et les rendements. Selon les résultats exposés par BOUGUERRA *et al.* (2017) concernant les composants de *T. vulgaris* récolté à Blida (nord d'Algérie), nous remarquons une absence totale de carvacrol et une prédominance de linalool (82,88%), suivi par le thymol (4,92%), linalyl acétate (2,43%), cymène (2,08%). Le nombre de composés identifiés dans cette étude est de 18 composés chimiques. De même nous constatons l'absence de carvacrol pour le *T. vulgaris* du Maroc (IMELOUANE *et al.*, 2009), avec une prédominance de camphor (38,54%), suivi par le camphène (17,19%), α -pinène (9,35%), 1, 8-cineole (5,44%), borneol (4,91%) et β -pinène (3,90%), quant au nombre de composés identifiés et de 41 composés chimiques. Par ailleurs au Cameroun TCHOUMBOUGNANG *et al.* (2009) notent que l'essence de *T. vulgaris* est dominé par le thymol (40,1%), p-cymène (23,4%), γ -terpinène (15,1%), avec la présence de carvacrol en faible teneur (2,4%), le nombre de composés identifiés est de 23 composés chimiques.

Le rendement en huile de *L. angustifolia* obtenu est de 1,5%. Ce rendement est relativement plus faible que celui obtenu par BELHADJ *et al.* (2014) à Batna (Est Algérie) avec 2,0%, par WESOLOWSKA *et al.* (2010) en Pologne avec 2% et par ARABACI et BAYRAM (2005) en Turquie avec 1,54% et 2,34%. Par contre, il est beaucoup plus faible que celui signalé par VERMA *et al.* (2010) en Inde avec 2,8%, par MESSAOUDI *et al.* (2017) au Maroc avec 2,32%, ainsi que celui de BENYAGOURB *et al.* (2014) à Tlemcen (ouest d'Algérie) avec 4,12%, mais il est relativement plus élevé que celui de JIANU *et al.* (2013) en Roumanie avec 1,13%.

Notre huile est légèrement supérieure en rendement en la comparant à d'autres espèces en Algérie telles que *Lavandula stoechas* avec 1,03% (CHEKOUA *et al.*, 2018), *Lavandula*

multifida avec 1% (SAADI *et al.*, 2016), *Lavandula dentata* avec 1,18% (DRISI *et al.*, 2017) et *Lavandula officinalis* avec 1,5% (BOUGHENDJIOUA, 2017).

L'huile essentielle de *L. angustifolia* d'Ain Defla renferme 36 composés, elle se caractérise par la prédominance de deux composés, linalool (37,92%) et linalyl acétate (25,94%).

Dans la littérature les deux composés majeurs obtenus, dans notre étude, sont enregistrés dans plusieurs pays au monde, mais avec des proportions différentes. En chine, ZHANG *et al.* (2006) ont enregistré les composés suivants : linalool (37,6%), linalyl acetate (35,8%), terpinen-4-ol (4,5%), lavandulyl acetate (4,1%). En Grèce les mêmes chémotypes sont enregistrés dans l'étude menée par Chatzopoulou *et al.* (2003), avec le linalool (50,6%), linalyl acétate (15,7%), terpinen-4-ol (7,8%), (Z)- β -ocimene (4,3%), (E)- β -ocimene (2,7%). Dans le même pays DAFERERA *et al.* (2000) soulignent les mêmes composés chimiques avec le linalool (44,5%), linalyl acetate (32,7%), terpinen-4-ol (6,9%) et 1,8-cineole (4,8%), borneol (3,9%).

En Algérie, plusieurs études ont été menées pour tester l'efficacité de *L. angustifolia* et identifier les composés chimiques de cette plante. Les mêmes chémotypes sont enregistrés, le linalool et linalyl acétate, mais avec des pourcentages relativement inférieurs aux nôtres, 22,35% et 21,80% respectivement (DJENANE *et al.*, 2012). Cependant l'huile essentielle de *L. angustifolia* de Batna (Est Algérie) est totalement différente à celle d'Ain Defla, elle est caractérisée par une prédominance de 1,8-cineole (29,4%), camphor (24,6%), borneol (4,1%) et viridiflorol (3,3%) (BELHADJ *et al.*, 2014). A Tizi Ouzou (Nord Algérie), l'étude de DJENANE *et al.* (2011) montrent une prédominance de 1,8-cinéole (37,80%), β -Caryophyllène (20,90%) et limonène (11,20%).

Suite à nos résultats et ceux obtenus dans différents pays au monde, pour la même espèce ou d'autres espèces de *Lavandula* ou de *Thymus*, nous constatons que les compositions chimiques et les rendements varient d'un pays à un autre et d'une zone à une autre, parfois nous obtenons partiellement le même profil chimique ou bien le même chémotype pour différentes espèces.

D'un autre côté nous observons différentes compositions chimiques ou chémotypes pour la même espèce, cela est peut-être dû à la plante elle-même, telles que l'espèce, la génétique, le stade phénologique ou bien d'autres facteurs extrinsèques, comme le sol, le climat, la période de récolte, la région de récolte, les amendements dans le cas des plantes cultivées et de la partie de la plante analysée (OZCAN et CHALCHAT, 2004 ; IMELOUANE *et al.*, 2009).

5.6. Piégeage des adultes à l'aide des phéromones sexuelles

Le retard d'émergence, constaté cette année est dû à la vague de chaleur, inhabituelle, enregistrée cet été avec une température moyenne du mois de juillet de 32,3 °C et du mois d'août de 32 °C, quant aux températures maximales elles oscillent entre 41,5 pour le mois de juillet et 39,1 °C pour le mois d'août.

L'observation du retard d'émergence est conforme aux résultats constatés par IMBERT (2012) qui a démontré que le stade nymphal dure environ quatre mois, mais il dépend étroitement des conditions du milieu. De même HOCH *et al.* (2009) ont observé que lorsque la température moyenne mensuelle dépasse 25 °C, le développement larvaire ralentit et par conséquent les adultes émergeront plus tardivement. La durée du développement larvaire dépend donc de trois principaux facteurs : la température (l'amplitude thermique), la radiation globale et la photopériode (DÉMOLIN, 1969a).

Le temps et la durée d'émergence sont pratiquement identiques dans la forêt naturelle du mont Doui, le reboisement de Babor et celui de Temoulgha. Ces stations ont un microclimat très semblable, une différence de température d'un degré selon les services de météorologie locale et une altitude entre 350 m et 400 m. La différence de la durée et du moment d'émergence enregistrée dans la forêt naturelle de Temoulgha est due à son microclimat particulier, avec une altitude de 250 m et sa proximité du barrage d'eau.

D'autres études telle que celle de ZANKOV (1960), menée durant plusieurs années, montre que le vol des imagos débute aux environs le 20 juin et dure jusqu'au 8 à 25 juillet. Nos résultats sont différents à ceux trouvés par cet auteur. Nous avons constaté que l'émergence, dans nos stations sont plus tardives que celle constatée par de MIRCHEV et GEORGIEV (2013), qui note le début d'émergence au mois de juin avec une durée plus longue par rapport à celle enregistrée dans la présente étude.

La meilleure période de capture enregistrée par MIRCHEV et GEORGIEV (2013) était entre le mois juillet et août, et en mi-juillet notée par DÉMOLIN (1969b). CHENCHOUNI *et al.* (2010) ont rapporté qu'un pic de capture de papillons mâles est enregistré entre le 16 et le 24 du mois d'août à Batna, par contre la meilleure période de capture enregistrée dans la présente étude est comprise entre le 19 août et le 10 septembre 2015, elle est identique avec celle de ATHANASSIOU *et al.* (2007) qui ont obtenu les meilleures captures à la fin du mois d'août et le début de septembre dans les régions de Magnésie et Thessalie en Grèce centrale.

Le maximum d'imagos piégés est enregistré dans le reboisement de Temoulgha. Cela est dû à la densité élevée des nids d'hiver, ces résultats sont en concordance avec ceux de JACTEL *et al.* (2006), et ceux de MIRCHEV et GEORGIEV (2013) qui ont obtenu le plus

grand nombre de mâles capturés enregistrés dans le village de Golyamo Dryanovo dans le district de Stara Zagora en Bulgarie. Ce site étant le plus infesté parmi les 5 stations étudiées par cet auteur.

*Conclusion
&
perspectives*

Conclusion et perspectives

La chenille processionnaire du pin, fait l'objet de multiples recherches au niveau national. C'est le principal déprédateur des forêts et reboisement algériens. La difficulté pour contrôler sa population est exacerbée par la pratique de la monoculture de l'espèce du genre *Pinus* en Algérie, de ce fait, la pullulation atteint toutes les plantations du pin d'Alep. Ce risque a été clairement observé, surtout dans les années 90, au niveau du barrage vert dans le sud Algérien, où l'état a procédé au traitement par le Bt. Nous constatons actuellement que ce ravageur ne cesse de s'étendre.

La démarche de notre étude effectuée dans la région d'Ain Defla a été très importante dans la mesure où elle nous a permis de cueillir des informations sur la bio-écologie et les facteurs de mortalités de cet insecte et aussi de trouver certains moyens biologiques pour lutter contre ce ravageur, sachant que le couvert végétal de cette région est dominé principalement par le Pin d'Alep. Le choix des quatre stations d'études, deux forêts naturelles et deux reboisées, nous a permis de recueillir des informations intéressantes.

En premier lieu nous avons travaillé sur les caractéristiques des nids d'hivers, leurs hauteurs moyennes en relation avec la hauteur et la biomasse des arbres hôtes. Ce qui nous a permis de trouver qu'elles se situent entre 7,05 et 8,02 m (forêt naturelle du mon Doui) et entre 3,79 et 4,32 m (forêt naturelle de Temoulgha). Par ailleurs, pour les deux stations reboisées, la hauteur moyenne varie entre 2,56 et 3,44 m (reboisement de Temoulgha) et entre 0,79 et 0,93 m (reboisement de Babor). Quant au nombre moyen de nids d'hivers dénombrés par arbre est compris entre 1,2 et 1,7 dans la forêt naturelle du mon Doui, entre 2,5 et 2,7 dans la forêt naturelle de Temoulgha, entre 3,1 et 3,4 dans le reboisement de Temoulgha et entre 3,2 et 3,3 dans le reboisement de Babor.

Nous observons que les stations reboisées sont plus infectées que les stations naturelles, ce constat est régi par plusieurs facteurs, tels que les prédateurs, qui sont riches dans les forêts naturelles, la biodiversité des peuplements (plusieurs espèces d'arbres dans les stations naturelles et une monoculture pour les reboisements). La biométrie des nids de la chenille processionnaire du pin varie selon le nombre de chenilles par nids. Dans les forêts naturelles, l'intervalle moyen de la longueur de nids est compris entre 5 et 24 cm, dans les forêts reboisées, il est se situe entre 9,33 et 12,23 cm. Quant à la largeur, l'intervalle moyen varie entre 5,92 et 9,38 cm dans les forêts naturelles et entre 6,63 et 7,73 cm dans les forêts reboisées. Concernant le poids des nids, les résultats recueillis varient entre 56,71 et 95,08 g

(min. = 6 g ; max. = 430 g) dans les forêts naturelles et entre 51,97 et 88,1 g (min = 8 g ; max. = 360 g) dans les reboisements.

Quant au nombre moyen de chenilles par nids dans les deux forêts naturelles du pin d'Alep est compris entre 70 et 80,84 (min = 09 ; max = 268). Pour les deux reboisements du pin d'Alep, la moyenne est comprise entre 50,73 et 92,37 (min = 07 ; max = 530). Ces écarts, importants, observés entre les nids dans les stations d'études, sont probablement liés aux conditions trophiques et thermiques. Dans les forêts, les basses températures peuvent causer des perturbations physiologiques chez les larves de l'insecte par interruption de leur alimentation nocturne.

La dernière phase aérienne est la procession pour l'enfouissement au sol. Nous avons observé une hétérogénéité pour l'étendu des périodes de processions et pour le premier jour de descente dans les différents sites prospectés. L'étendue moyenne dans les forêts naturelles est de 15 à 22 jours. Cependant, nous avons observé une longue période de descente qui atteint 43 jours dans le reboisement de Babor, ceci peut être expliqué par le voisinage du barrage d'eau, qui a optimisé l'humidité de ce site. L'étendue de descente dans le reboisement de Temoulgha est de 18 à 24 jours. Nous n'avons pas observé un grand écart entre les stations, sauf pour le reboisement de Babor, cité auparavant. Les premières descentes enregistrées ont débuté pour toutes les stations pratiquement à la mi-mars.

La deuxième partie de cette étude est consacrée, aux relevés d'informations sur les pontes de la chenille processionnaire. Nous avons commencé cette investigation par la distribution des manchons de pontes. Les orientations sont pratiquement équilibrées bien que légèrement dominées par celle de l'Est. Toutes les directions des orientations possibles sont enregistrées est, ouest, sud, nord et centre. Les papillons femelles des chenilles installent leurs manchons sur les arbres a de moyennes hauteurs. La hauteur des arbres n'a aucune incidence majeure sur l'installions des pontes. Il semble que la biomasse des arbres et le vent ont une influence sur la hauteur des pontes sur les arbres hôtes. Nous avons procédé au dénombrement des œufs pour chaque manchon de ponte. Il y a trois catégories d'œufs, ceux qui ont éclos, avec des taux compris entre 64,4% et 85,4% dans les forêts naturelles et entre 72,2% et 89,6% dans les reboisements, ceux qui n'arrivent pas à éclosion, avec des taux compris entre 6,9% et 25,6% dans les forêts naturelles et entre 6,8% et 17,1% dans les reboisements. La dernière catégorie est celle des œufs parasités, pour laquelle nous avons enregistré des taux qui varient entre 5,1% et 9,9% dans les forêts naturelles et entre 3,6% et 10,6% dans les reboisements. Il ressort de ces résultats que le nombre moyen d'œufs éclos est pratiquement invariable pour les reboisements et les forêts naturelles, la même remarque

s'applique pour les œufs parasités mais concernant les œufs qui n'ont pas éclos, les forêts naturelles comptabilisent des moyennes nettement remarquables.

Les longueurs de pontes relevées dans les forêts naturelles sont légèrement plus élevées que celles des stations reboisées, les longueurs mesurés sont comprises entre 2,30 et 2,96 cm dans les forêts naturelles et entre 2,29 et 2,77 cm dans les stations reboisées. Les pontes sont déposées sur deux types de support, les aiguilles et les rameaux d'arbres. Selon les résultats trouvés les aiguilles sont les plus attractives pour les femelles. L'étude du matériel biologique indique une dominance totale du parasite oophage *Ooencyrtus pityocampae*.

La troisième partie de cette étude est dédiée à l'étude des caractéristiques morphométriques des chenilles, des chrysalides et des adultes. Les longueurs moyennes des chenilles varient entre 3,38 et 3,42 cm dans les forêts naturelles et entre 3,44 et 3,46 cm dans les reboisements. Quant au poids moyen relevé est compris entre 0,38 et 0,39 g dans les forêts naturelles et entre 0,41 et 0,40 g dans les reboisements. Les chenilles femelles sont plus lourdes et plus grandes que les chenilles mâles. Le conditionnement des chenilles capturées au moment de la procession nous a renseigné sur le déroulement de la phase épigée, les résultats trouvés montrent qu'une moyenne de 20% de chenilles n'arrivent pas à se transformer en chrysalides. L'émergence des imagos a commencé fin août. Nous avons relevé un taux de papillons femelles légèrement supérieur à celui des mâles qui ont une taille plus faible. Dans cette phase, nous avons observé que le taux des chrysalides qui n'arrivent pas à terminer leurs stades phénologiques est supérieur à 40%. Cet échec est peut-être dû à la température, l'humidité ou à l'entrée en diapause prolongée.

Une attention toute particulière a été consacrée à l'utilisation de moyens de contrôle biologiques de cet insecte. En premier lieu nous avons évalué l'activité insecticide des huiles essentielles de deux espèces de plantes aromatiques appartenant à la famille des lamiacées, à savoir *Thymus vulgaris* et *Lavandula angustifolia*, contre les larves du stade L3 et L5 dans le laboratoire et en pleine nature. Les traitements par contact à base d'huiles essentielles montrent une activité insecticide très forte au stade L3 et L5 dans les conditions *in vitro*, elle atteint 100% pour *Thymus vulgaris*. Le taux de létalité enregistré grâce aux huiles de *Lavandula angustifolia* est aussi de 100% pour le stade L3, mais il est de 66% pour le stade L5. Pour les essais *in vivo*, nous avons observé que *T. vulgaris* est létale à 100% pour les deux stades L3 et L5. En revanche les huiles essentielles de *L. angustifolia* tuent 79 % de L3 et 37% seulement de L5.

En deuxième lieu pour évaluer l'efficacité insecticide des huiles essentielles, nous avons fait une étude histologique des coupes anatomiques sur des larves du stade L5. L'observation des micrographies montre des anomalies histologiques conséquentes.

Enfin nous avons analysé les huiles essentielles des deux plantes par la technique CG/MS (chromatographie phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse), ce qui nous a permis d'identifier les composés des deux huiles essentielles. Le carvacrol étant le composé majoritaire du *T. vulgaris* (71,4%). Par ailleurs, le linalool (37,9%) et linalyl acétate (25,9%) sont les composés prédominants pour la *L. angustifolia*.

Cet essai de lutte pourrait contribuer à évaluer la possibilité d'utiliser des plantes endémiques de nos régions, comme insecticides potentiels, en veillant à sélectionner celles dont les huiles sont les plus actives dans un souci environnemental, car les plantes ne peuvent produire que des quantités infimes d'huile. Les résultats trouvés plus haut ouvrent des perspectives intéressantes dans l'application de l'huile de *T. vulgaris* pour la production de biocides. Nous prévoyons de poursuivre ce travail dans le but de déterminer la nature des constituants, responsables de l'activité biocide, par fractionnement et ainsi déterminer leurs performances en tant qu'agent de lutte biologiques.

Afin de suivre l'émergence des adultes mâles et déterminer l'étendue des dates d'envol de cet insecte nous avons installé des pièges à phéromones. L'émergence des papillons mâles a commencé durant la troisième semaine d'août, les moyennes des étendues des périodes d'envols sont de 49 à 55 jours. Nous n'avons pas remarqué un grand écart entre les stations. La détermination du début et de la fin d'émergence nous permettra, plus tard, d'observer précocement ce ravageur, c'est une technique appropriée pour maîtriser les niveaux de population des insectes nuisibles, dans notre cas la chenille processionnaire du pin, surtout dans les forêts où l'accessibilité est difficile et où le temps est compté.

A l'avenir, il serait souhaitable de mener des études plus approfondies sur la bio-écologie de la chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* en multipliant le nombre de station, en étudiant aussi l'influence de différents facteurs écologique sur le changement du cycle biologique de ce ravageur, en menant une étude sur les éventuels prédateurs de ce ravageur et approfondir les recherches sur les parasitoïdes potentiels, en cherchant les moyens les plus utiles pour préserver ces prédateurs et ces parasitoïdes afin de minimiser l'emploi des moyens chimiques.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

1. ABBOTT W.S., 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J. Econ. Entomol.*, 18(2): 265-267.
2. ADAMS R.P., 2001. Identification of essential oil components by gaz chromatography: quadrupole mass spectroscopy. *Allured Pub. Corp: Carol Stream*, 456 p.
3. AGENJO R., 1941. Monographia de la familia Thaumetopoeidae (Lepidoptera, Thaumetopoeidae). *Eos. Rev. Esp. Ent.* XVII. pp : 69-130.
4. AIT TAADAOUT N., HSAINE M., ROCHDI A., NILAHYANE A., BOUHARROUD R., 2012. Effet des extraits végétaux méthanoliques de certaines plantes marocaines sur *Tuta absoluta* (Lepidoptera, Gelechiidae). *EPPO Bulletin*, 42 (2): 275-280.
5. ALLABI A.C., BUSIAC K., EKANMIANA V., BAKIONO F., 2011. The use of medicinal plants in self-care in the Agonlin region of Benin. *Journal of Ethnopharmacology*, 133: 234-243.
6. AMARTI F., SATRANI B., GHANMI M., FARAH A., AAFI A., AARAB L., EL AJJOURI M., CHAOUCH A., 2010. Composition chimique et activité antimicrobienne des huiles essentielles de *Thymus algeriensis* boiss. Reut. et *Thymus ciliatus* (Desf) Benth. du Maroc. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 14(1): 141-148.
7. ARABACI O., BAYRAM E., 2005. The effect of nitrogen fertilization and plant density on some agronomic and quality traits of lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) under ecological conditions of Aydin. *Adnan Menderes Univ. J. of Agric. Faculty* 2 (2): 13-19.
8. ARUNA SEFU J., 2011. La consommation du combustible braise (charbon de bois) par les ménages de Bukavu et son impact sur la déforestation au Sud-Kivu. Mémoire, ISDR Bukavu, République démocratique du Congo, 125 p.
9. ASSMAA A., SAID L., NAJIB G., 2011. Production, croissance et modèles de conduite sylvicoles des principales essences (le pin maritime et le pin d'Alep) de reboisement au Maroc. *Journal of Forestry Faculty* 11(1): 68-84.
10. ATHANASSIOU C.N., KAVALLIERATOS S., GAKIS L., KYRTSA B., MAZOMENOS F., GRAVANIS., 2007. Influence of trap type, trap color, and trapping location on the capture of the pine moth, *Thaumetopoea pityocampa*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 122: 117-123.
11. AZZOUZI A., ZERGUINE M., 2012. Paramètre bioécologique de la chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. (Lepidoptera, Thaumetopoeidae) dans le reboisement de Moudjebara (Djelfa). Mém. Ing. Agro., Inst., Agropast., Univ. Ziane Achour de Djelfa, 91 p.

12. BACHIR K., 2019. Biocénose de *Pinus halepensis*, *Cupressus dupreziana* de la région de Djelfa et test d'un biocide pour lutter contre *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. (Lepidoptera, Notodontidae). Thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Univ. Ziane Achour de Djelfa 148 p.
13. BACHIR K., TAIL G., BOURAGBA N., ZAMOUM M., TRIGUI M., TOUNSI S., SAIDI F., 2017. Synergic effect between *Bacillus thuringiensis* *Kurstaki* HD1 δ -endotoxins and *Melia azedarach* (Meliaceae) methanolic extract against the larvae of *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. (Lepidoptera, Notodontidae), *J. Ent. Res.* 41 (4): 343-352.
14. BADRANI M.E., 2014. Contribution à l'étude des nids de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. dans la pineraie de la région de Laghouat (Aflou). Mém. Lic., Fac. Sci. Nat. Vie, Univ. Djelfa, 34 p.
15. BAGNOUL S.F, GAUSSEN H., 1953. Saison sèche et indice xérothermique Bull. *Soc. Hist. Nat.* Toulouse: 193-239.
16. BAKKALI F., AVERBECK S., AVERBECK D., 2008. Idaomar M: Biological effects of essential oils. *A Review Food Chem. Toxicol.* 46: 446-475.
17. BAKRIA M., 2015. Contribution à l'étude de quelques paramètre bioécologique de la chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. (Lepidoptera, Thaumetopoeidae) dans le reboisement de Moudjbara (Djelfa). Mém. Master, Univ. Ziane Achour de Djelfa, 91 p.
18. BARRENTO M.J., SANTOS H., BRANCO M., PAIVA M.R., 2008. Monitorizaçao da processionaria do pinheiro, *Thaumetopoea pityocampa*. Monitorizaçao e estimava de estragos, capitulo 2.
19. BATTISTI A., 1986. Host-plant relationship and population dynamics of pine processionary *Thaumetopoea pityocampa*. *J. Appl. Entomology* 105: 393-402.
20. BATTISTI A., BERNARDI M. et GHIRALDO C., 2000. Predation by the hoopoe (*Upupa epops*) on pupae of *Thaumetopoea pityocampa* and the likely influence on other natural enemies. *Bio. Control* 45: 311-323.
21. 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 (6) : 2084-2096.
22. BATTISTI A., HOLM G., FAGRELL B., LARSSON S., 2011. Urticating hairs in arthropods: their nature and medical significance. *Annu. Rev. Entomol.* 56, 203-220.

23. BEDRY R., GROMB S., 2009. Les intoxications particulières de la région aquitaine. *Rev. Méd. Interne* 30 (7): 640-645.
24. BELHADJ M.M., KABOUCHE A., ABAZA I., ABURJAI, TOUZANI R., KABOUCHE Z., 2014. Chemotypes investigation of *Lavandula* essential oils growing at different North African soils. *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (6) : 1896-1901.
25. BEN KHEDHER S., BOUKEDI H., DAMMAK M., KILANI-FEKI O., SELLAMI-BOUDAWARA T., ABDELKEFI-MESRATI L., TOUNSI S., 2017. Combinatorial effect of *Bacillus amyloliquefaciens* AG1 biosurfactant and *Bacillus thuringiensis* Vip3Aa16 toxin on *Spodoptera littoralis* larvae. *Journal of Invertebrate Pathology* 144: 11-17.
26. BENSOUIAH R., 2004. Politique forestière et lutte contre la désertification en Algérie : Du barrage vert au PNDA. *Forêt méditerranéenne* T. XXV, n° 3 : 191-198.
27. BENYAGOUB E., NABBOU N., SIRAT M., DAHLIS Z., 2014. Propriétés antibactériennes et constituants phytochimiques des extraits de la Lavande de la région de Tlemcen et leur Effet sur quelques espèces bactériennes responsables d'infection alimentaire. *Revue des Bioressources* 4 (2) : 18-28.
28. BERTELLA N., 1987. Bio-écologie de *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. (Lepidoptera, Thaumetopoeidae) dans quelques régions de l'Algérie. Thèse Magister, INA, El-Harrach, 168 p.
29. BILGILI E., 2002. Pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff.): its past, present and future. Proceedings of Pine Processionary Moth Symposium, Kahramanmaraş, Turkey, pp 12-18.
30. BILIOTTI E., 1958. Les parasites et prédateurs de *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. (Lepidoptera). *Entomophaga* 3 (1) : 23-24.
31. BONNET C., MARTIN J.C., MAZET R., 2008. La processionnaire du pin. Stantari - Histoire naturelle et culturelle de la Corse, Kyrnos publications, 14, pp. 29-33.
32. BOSLY A.H., 2013. Evaluation of insecticidal activities of *Mentha piperita* and *Lavandula angustifolia* essential oils against house fly, *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae). *J. of Entomology and Nematology* 5(4): 50-54.
33. BOUCHIKHI T.Z., KHELIL M.A., HASSANI F., 2008. Fight against the bruchid bean *Acanthoscelides obtectus* (Coleoptera: Bruchidae) and the mite *Tineola bisselliella* (Lepidoptera. Tineidae) by the essential oils extracted from *Rosmarinus officinalis*. *Biosciences, Biotechnology Research Asia* 5 (2): 651-656.

34. BOUCHOU L., 2015. Les parasitoïdes embryonnaires de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. et leur importance dans quelques peuplements de pin et de cèdre du Nord de l'Algérie. Thèse de doctorat, ENSA, El Harrach, 131 p.
35. BOUDJAHAM I., 2020. Bio-écologie de la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff. (Lepidoptera ; Thaumetopoeidae) dans la région de Guelma. Effet de certaines molécules sur la formule hemocytaire des chenilles. Thèse de Doctorat, Univ. Frères Mentouri, Algérie, 148 p.
36. BOUGHENDJIOUA H., 2017. Chemical composition and antibacterial activity of essential oil of *Lavandula officinalis* grown in the region of Skikda – Algeria. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 86 : 88-95.
37. BOUGUERRA N., TINE DJEBBAR F. and SOLTANI S., 2017. Algerian *Thymus vulgaris* essential oil: chemical composition and larvicidal activity against the mosquito *Culex pipiens*. *International Journal of Mosquito Research* 4(1): 37-42.
38. BOURGEOIS A., 2003. Les chenilles processionnaires en France ; la lutte contre la chenille processionnaire du pin en France. Thèse Méd. Vét., Alfort, n° 041, 122 p.
39. BOUTCHICHE, F., BOUTRIGUE, S., 2016. Caractérisation morpho métrique de la chenille processionnaire (*Thaumetopoea pityocampa*) et de son hôte au niveau de la wilaya de Tlemcen. Mém. Master, 78 p.
40. BRAZIER J.D., 1982. Patterns, trends and forecasts of wood consumption to the year 2000. Address to the Annual Meeting of the British Association for the Advancement of Science.
41. BREUER M., DEVKOTA B., 1990. Control of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) by extracts of *Melia azedarach* L, (Meliaceae). *Journal of Applied Entomology* 110: 128-135.
42. BUFFO E., BATTISTI A., STASTNY M., LARSSON S. 2007. Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the Italian Alps. *Agr. For. Entomol.* 9 (1): 65-72.
43. BURT S.A., 2004. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods: a review. *Internat. J. Food Microbiol.* 94: 223-253.
44. CALAS J., 1897. La processionnaire du Pin (*Thaumetopoea pityocampa*). Mœurs et métamorphoses ravages, destruction. *Bulletin de la société Agricole Scientifique et Littéraire des Pyrénées Orientales* 38, 4-90.

45. CEBALLOS, P., 1969. Vertebrates preying on *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. and possibilities of their use. *Boln Serv. Plagas for.* 12: 35-38 (in Spanish, French and English Summary).
46. CHARARAS C., 1979. Écophysiologie des insectes parasites des forêts. Paris. 297 p.
47. CHARMOT P., 1987. La chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schiff. et son importance médicale. Thèse Méd. Vét., Lyon, n° 020, 132 p.
48. CHEBAIBI A., MAROUF Z., RHAZI-FILALI F., FAHIM M., ED-DRA A., 2016. Évaluation du pouvoir antimicrobien des huiles essentielles de sept plantes médicinales récoltées au Maroc. *Phytothérapie*, 14 (6) : 355-362.
49. CHEKOUA L., AISSAT A., AIT-KACI AOURAHOUN K., BENABDELKADER T., 2018. Comparative study of yield, chemical composition and antioxidant activity of wild Algerian *Lavandula stoechas* L. obtained by ultrasound pre-treatment and by conventional hydrodistillation. *Revue Phytothérapie* 16 (1): 109-118.
50. CHENCHOUNI H., ZANATI K., REZOUGUI A., BRIKI A., ARAR A., 2010. Population Monitoring of Pine Processionary Moth (*Thaumetopoea pityocampa*) by Pheromone Trapping at the Southern Limit of Distribution of *Pinus halepensis* in Eastern Algeria. *Forest Science and Technology* 6 (2): 67-79.
51. CHRISPIN NGOMBO V., 2007. Impacts du changement climatique sur la recrudescence des dégâts dus au charançon du bananier (*Cosmopolites sordidus*) dans la région de Luki au bas Congo/RDC. Université de Kinshasa. Mém. Ingénieur en agronomie (phytotechnie).
52. CRONQUIST A., 1988. The Evolution and Classification of Flowering Plants. The New York Botanical Garden, New York, USA, 555 p.
53. DAFERERA D.J., ZIOGAS B.N., POLISSIOU M.G., 2000. GC-MS analysis of essential oils from some greek aromatic plants and their fungitoxicity on *Penicillium digitatum*. *J. Agric. Food Chem.* 48: 2576-2581.
54. DAGET P., 1982. Sur le concept de mesure et son application en écologie générale. *Vie et milieu*, 32 : 281-282.
55. DAJOZ R., 1971. Précis d'Écologie, Ed. Dunod, Paris, 434 p.
56. DAJOZ R., 1996. Précis d'écologie. 2ème et 3ème cycles universitaires. Ed. Dunod, Paris, 551 p.
57. DAJOZ R., 1998. Les insectes et la forêt. Ed. Lavoisier tec & doc, Paris, 594 p.
58. DAJOZ R. 2000. Insects and Forests. The Role and Diversity of Insects in the Forest Environment. Lavoisier Publishing, Paris, 668 p.

59. DAJOZ R., 2002. Les coléoptères carabidés et ténébrionidés. Ed. Tec & doc, 521 p.
60. DEIA D., 2002. Contribution à l'étude de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* dans les reboisements de Hassi Bahbah. Mémoire. Ing. Agro. Univ. Ziane Achour Djelfa, 78 p.
61. DÉMOLIN G., 1963. Les miroirs urticants de la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. *Revue de zoologie agricole et appliquée* (4) : 107-114.
62. DÉMOLIN G., 1964. Réflexions sur le comportement des insectes nocturnes soumis à une source lumineuse attractive. Application à une nouvelle technique de piégeage. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, Tome LXXI, n° 1-2, pp. 15-24.
63. DÉMOLIN G., 1965. Grégarisme et subsocialité chez *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. Nids d'hiver activité de tissage. *Actes du 5^{ème} Congrès U.I.E.I.S.*, 69-77.
64. DÉMOLIN G., 1967. Comportement des adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. Dispersion spatiale, importance écologique. *Ann. Sci. Forest.*, 26 (1): 81-102.
65. DÉMOLIN G., 1968. Comportement des adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. Dispersion spatiale. Importance économique. *Annales des sciences forestières*, Vol. 26, fasc. 1, pp. 81-102.
66. DÉMOLIN G., 1969a. Incidence de quelques facteurs agissant sur le comportement social des chenilles de *Thaumetopoea pityocampa* en procession de nymphose. Répercussion sur l'efficacité des parasites. Colloque de Pont-à-Mousson - Novembre 1969 (A paraître dans les Annales de zoologie, écologie animale).
67. DÉMOLIN G., 1969b. Bioécologia de la processionnaire del pino, *Thaumetopoea pityocampa*, Inccidencia de los factores climaticos. *Bol. Serv. Plagas Forest*, 23 :9-24.
68. DÉMOLIN G., 1969c. Comportement des adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. Dispersion spatiale, importance écologique. *Ann. Sci. Forest*, 26(1) : 81 102.
69. DÉMOLIN G., 1971. Incidence de quelques facteurs agissant sur le comportement social des chenilles de *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. (Lepidoptera) pendant la période des processions de nymphose. Répercussion sur l'efficacité des parasites. *Ann. Zool. Ecol. Anim.*, Vol. hors-série 'La Lutte biologique en Forêt', pp. 33-56.
70. DÉMOLIN G., 1974. Réflexions générales sur la diapause et les diapauses renforcées chez la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiff., Lepidoptera Thaumetopoeidae. Compte-rendu de la Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique.

71. DÉMOLIN G., 1986. Intensification de la protection phytosanitaire des forêts en Algérie. Rapport scientifique - projet F.A.O. n° DP-FO-ALG/83/013 : 27 p, 30 planches.
72. DÉMOLIN G., 1987. La processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Au Mont Ventoux. *Etude Vauclusiennes*, n° spécial (3): 157-173.
73. DÉMOLIN G. et DELMAS J.C., 1967. Les Ehippigères, Orthoptères Tettigonidae, prédateurs occasionnels mais importants de *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. *Entomophaga* 12 : 399-401.
74. DÉMOLIN G., RIVE J.L., 1968. La processionnaire du pin en Tunisie. *Annales de l'INRF -Tunisie*. Vol 1., Fasc. 1 : 19 p.
75. DÉMOLIN G., FREROT B., CHAMBON J.P., MARTIN J.C., 1994. Réflexions bio systématiques sur toutes les processionnaires du genre *Thaumetopoea* Lep. considérés comme ravageurs importants. *Ann. Rech. For. Maroc* 27 : 593-611.
76. DÉMOLIN G., ABRALL J.F., BOUHOT-DELDUC L., 1996. Evolution de l'Aire de la processionnaire du pin en France. *Les Cahiers du DSF*, 1: 26-28.
77. DEVKOTA B., SCHMIDT G.H., 1990. Larval development of *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiff.) (Lep., Thaumetopoeidae) from Greece as influenced by different host plants under laboratory conditions. *Journal of Applied Entomology*, 109 : 321-330.
78. DGF (Direction Générale des forêts), 2015. Direction générale des forêts, Campagne de lutte contre la chenille processionnaire du pin : 2015, Etat des superficies infestées, Conservation des Forêts de Djelfa, 1 p.
79. DIAZ J.H., 2005. The evolving global epidemiology, syndromic classification, management, and prevention of caterpillar envenoming. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 72 (3): 347-57.
80. DJENANE D., LEFSIH K., YANGÜELA J., RONCALES P., 2012. Composition chimique et activité anti-Salmonella Enteritidis CECT 4300 des huiles essentielles d'*Eucalyptus globulus*, *Lavandula angustifolia* et *Satureja hortensis*; Tests in vitro et efficacité sur les œufs entiers liquides conservés à 7±1°C. *Phytothérapie* 9 (6) : 343–353.
81. DPSB, 2014. Monographie de la Wilaya d'Ain Defla (Agriculture, Forêt), 34 p.
82. DREUX P., 1980. Précis d'écologie. Ed. Presses. Univ. France, Paris, 213 p.
83. DRISI D., TINE-DJEBBAR F., SOLTANI N., 2017. *Lavandula dentata* essential oils: chemical composition and larvicidal activity against *Culiseta longiareolata* and *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae). *African Entomology* 25 (2): 387-394.

84. DSA (direction de services agricole) 2011. Rapport sur la chenille processionnaire du pin de la Wilaya de Ain Defla.
85. DSF, 2011. La processionnaire du pin. Information santé des forêts, Ed. Départ. Santé Forêts, Parsi, France, 4 p.
86. DUCOMBS G., LAMY M., MOLLARD S., GUILLARD J.M., MALEVILLE J., 1981. Contact dermatitis from processional pine caterpillar (*Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. (Lepidoptera). *Contact Dermat.* 7(5): 287-288.
87. DULAURENT A.M., 2010. Effet de la diversité des essences forestières sur les niveaux de population de la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*), à différentes échelles spatiales, dans la forêt des Landes de Gascogne. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 164 p.
88. DULAURENT A.M., PORTE A.J., VAN HALDER I., VETILLARD 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.
89. DU-MERLE P., 1969. Le complexe parasitaire hypogé de *Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schiff. (Lepidoptera). *Boletín del Servicio de Plagas Forestales*, 13 : 131-132.
90. DU-MERLE P., 1988. Quelques problèmes de diagnostic posés par les insectes défoliateurs forestiers. *Rev. Forest. Française*, n° spécial, 40 :118-123.
91. DUPONT F., GUIGNARD J., 2007. Botanique, systématique moléculaire. Issy- les Molineaux: Masson, 285 p.
92. EL AKHAL F., GRECHE H., OUAZZANI CHAHDI F., GUEMMOUH R., EL OUALI LALAMI A., 2015. Chemical composition and larvicidal activity of *Culex pipiens* essential oil of *Thymus vulgaris* grown in Morocco. *Journal of materials and Environmental Science* 6 (1): 214-219.
93. EL AKHAL F., GUEMMOUH R., MANIAR S., TAGHZOUTI K., EL OUALI LALAMI A., 2016. Larvicidal activity of essential oils of against of the malaria vector *Anopheles labranchiae* (Diptera: Culicidae) original article. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences* 8 (3): 372-376.
94. EL-NEKEETY A.A., MOHAMED S.R., HATHOUT A.S., HASSAN N.S., ALY S.E., ABDEL-WAHHAB M.A., 2011. Antioxidant properties of *Thymus vulgaris* oil against aflatoxin- induce oxidative stress in male rats. *J. Toxicon* 57 (7-8) : 984-991.
95. EL YOUSFI M., 1989. *Thaumetopoea bonjeani* (POWEL.) : La Processionnaire du cèdre. Polycopié Min. Agr. Réf. Ecologie, 14 p.

96. EMBERGER L., 1955. Une classification biogéographique des climats. *Rev. Tra. Tab.Geol. Fac. Sci. Montpellier*, (7): 1-43.
97. ER M.K., TUNAZ H., GOKCE A., 2007. Pathogenicity of entomopathogenic fungi to *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiff.) (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) larvae in laboratory conditions. *J. Pest Sci.* 80: 235-239.
98. EZEBILO E., MATTSSON L., 2010. Contribution of non-timber forest products to livelihoods of communities in southeast Nigeria. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 17 (3) : 231- 235.
99. FARJON A., 1996. Biodiversity of *Pinus* (Pinaceae) in Mexico: speciation and palaeo-endemism. *Botanical Journal of the Linnean Society* 121 (4): 365-384.
100. FINNEY D.J., 1971. Statistical method in biological assay, 2nd edition. London: Griffin, 333 p.
101. FLOATER G.J. et ZALUCKI M.P., 2000. Habitat structure and egg distributions in the processionary caterpillar *Ochrogaster lunifer*: lessons for conservation and pest management. *Journal of Applied Ecology* 37 (1): 87-99.
102. GACHI M., KHEMICI M. et ZAMOUM M., 1996. Sur la présence en Algérie de la processionnaire du cèdre *T. bonjeani* Powell (Lepidoptera, Thaumetopoeidae). *Ann. Rech. Forest. Algérie* I, pp. 53-63.
103. GARRITY D.P., AKINNIFESI F.K., AJAYI O.C., WELDESEMAYAT S.G., MOWO J. G., KALINGANIRE A., LARWANOU M., BAYALA J., 2010. Evergreen Agriculture: a robust approach to sustainable food security in Africa, *J of Food Security* 2: 197-214.
104. GATTO P., ZOCCA A., BATTISTI A., BARRENTO M. J., BRANCO M., PAIVA M. R., 2009. Economic assessment of managing processionary moth in pine forests: a case-study in Portugal. *J. Environ. Management* 90 : 683-691.
105. GAZRAM T. et BENMELOUKA M., 2013. Contribution à l'étude de quelques paramètres bioécologiques de la chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. (Lepidoptera, Thaumetopoeidae) dans le reboisement de Moudjebara (Djelfa). Mémoire. Master. Ecolo. Arth., Fac. Sci. Nat. Vie, Univ. Djelfa, 67 p.
106. GERI C., 1980. Application des méthodes d'études démécologiques aux insectes défoliateurs forestiers. Cas de *Diprion pini* L. (Hym., Diprinidae), dynamique des populations de la processionnaire du pin dans l'île de Corse. Thèse de doctorat d'état, Orsay, Université Paris Sud, 260 p.
107. GILL SE, HANDLEY JF, ENNOS AR, PAULEIT S., 2007. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure, *Built Environ.*, 33:115-133.

108. GILLETTE D A, ADAMS J, ENDO A, SMITH, D KIHLE R., 1980. Threshold velocities for input of soil particles into the air by desert soils. *Journal of Geophysical Research* 85: 5621.
109. GIORDANO., 1976. Tecnologia dei ligno. Tome 3.
110. GOTTLE A., SÈNE E.H., 1997. Les fonctions protectrices et écologiques des forêts. X^{ème} Congrès forestier mondial, « Fonctions protectrice et environnementale des forêts », p. 9
111. GRISON P., MAURY R., VAGO C., 1959. La lutte contre la processionnaire du pin dans le massif du Ventoux. Essai d'utilisation pratique d'un virus spécifique. *Revue Forestière Française* 5 : 353-367.
112. GROJEAN A. L., DE BAUDOUIN C., FLAMANT S., 2006. Incidences environnementales et sanitaires des chenilles processionnaires et de leurs traitements en France. In : *Ingénieurs du Génie Sanitaire, Atelier Santé-Environnement, promotion 2005-2006* [en ligne]. p. 197.
113. GUENDOUZ H., 2001. Etude bioécologique de la chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera, Thaumetopoeidae) Denis et Schiff dans les reboisements de Moudjebara (Djelfa). Mém. Ing. Agro., Ins, Nati. Agro., El Harrach, 94 p.
114. HADDOUCHI F., LAZOUNI H. A., MEZIANE A. et BENMANSOUR A., 2009. Etude physicochimique et microbiologique de l'huile essentielle de *Thymus fontanesii* Boiss & Reut. *Afrique Science*, 5 (2) : 246-259.
115. HERBULOT C., 1958. Atlas des lépidoptères de France. Ed. N. Boubée de Cie. 6, Fasc. II, 114 p.
116. HIRSCHFELD H. and HIRSCHFELD K., 1973. Zur Brut und Ernährungsbiologie des Wiedehopfes, *Upupa epops* L., unter Berücksichtigung seiner Verhaltensweisen. *Beitr. Vogelk.* 19: 81-152.
117. HMIMINA M., 1986. Stratégie d'occupation des cultures et d'hivernation chez *Helicoverpa armigera* Hb, (Lepidoptera, Noctuidae): Essais de modélisation prévisionnelle. Thèse Docteur es Science, Université Aix-Marseille III, Faculté Sciences, 184 p.
118. 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. *Agr. Forest. Entomol.* 11 (3): 313-320.

119. HODAR J. A., CASTRO J., ZAMORA R., 2003. Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warning. *Biol. Conservat.*, 110 : 123-129.
120. HUCHON H., DÉMOLIN G., 1970. La Bio-écologie de la processionnaire du Pin dispersion potentielle. Dispersion actuelle. *Revue forestière française*, Vol. XXII, n° spécial « La lutte biologique en forêt », pp. 220-234.
121. HYLDGAARD M., MYGIND T., MEYER, R. L., 2012. Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. *Frontiers in Microbiology*, 3 : 1-24.
122. IMBERT C. E., 2012. Expansion d'un ravageur forestier sous l'effet du réchauffement climatique : la processionnaire du pin affecte-t-elle la biodiversité entomologique dans les zones nouvellement colonisées ? Thèse de Doctorat, Univ. Orleans 192 p.
123. IMELOUANE B., AMHAMDI H., WATHELET J.P., ANKIT M., KHEDID K., EL BACHIRI A., 2009. Chemical composition of the essential oil of thyme (*Thymus vulgaris*) from Eastern Morocco. *International Journal of Agriculture and Biology*, 11: 205-208.
124. JACQUET J. S., ORAZIO C. and JACTEL H., 2012. Defoliation by processionary moth significantly reduces tree growth: a quantitative review. *Annals of Forest Science*, 69: 857-866.
125. JACTEL H., BROCKERHOFF E. G., 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters* 10: 835-848.
126. JACTEL H.P., MENASSIEU B., BARTHELEMY D., PIOU B., FREROT J., ROUSSELET F., GOUSSARD B., BRANCO A., BATTISTI, 2006. Population monitoring of the pine processionary moth (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) with pheromone-baited traps. *Forest Ecology and Management* 235: 96-106.
127. JAMZAD Z., 2010. *Thymus* and *Satureja* spp. of Iran, Research instituted of Forests and rangelands Press, 172 p.
128. JIANU C., POP G., GRUIA A.T., HORHAT F.G., 2013. Chemical composition and antimicrobial activity of essential oils of lavender (*Lavandula angustifolia*) and lavandin (*Lavandula x intermedia*) grown in Western Romania. *Int. J. Agric. Biol.* 15 (4): 772-776.
129. JOLY R., 1952. Processionnaires. *Rev. For. Fr.* n° 5, 355-360.
130. JOUNG K. B., COTE J. C., 2000. Une analyse des incidences environnementales de l'insecticide microbien *Bacillus thuringiensis*. Centre de recherche et de Développement en Horticulture du Canada. *Bull. technique.* n° 29, 17 p.

131. KABOUCHE A., 2005. Etude phytochimique de plantes médicinales appartenant à la famille des Lamiaceae. Thèse de doctorat d'état en chimie. Université Mentouri-Constantine. Faculté des sciences exactes, 310 p.
132. KADIK B., 1983. Contribution à l'étude du pin d'Alep en Algérie : Ecologie, dendrométrie, morphologie. Thèse Doct. Etat, Aix-Marseille III, 313 p.
133. KADIK B., 1987. Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Algérie. Ecologie, dendrométrie, Morphologie. Ed. O.P.U. Alger, 145 p.
134. KADIK L., 2006 : Phytosociologie et Phytoécologie des forêts à Pin d'Alep, Edition Universitaire Européenne, 439 p.
135. KALOUSTIAN J., CHEVALIER J., MIKAIL C., MARTINO M., ABOU L., VERGNE M. F., 2008. Etude de six huiles essentielles : composition chimique et activité antibactérienne. *Phytothérapie*. 6(3) : 160-164.
136. KANAT M. and ALMA M. H., 2004. Insecticidal effects of essential oils from various plants against larvae of pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff.) (Lepidoptera: Thaumetopoeidae). *Pest Management Science* 60 (2): 173-177.
137. KANOUCHE R., ZEROUKI M., 2014. Contribution à l'étude de quelques espèces de graminées, Thèse, Master, uni, Khemis Miliana, 65 p.
138. KESDEK M., KORDALI S., COBAN K., USANMAZ A., ERCISLI S., 2014. Larvicidal effect of some plant extracts on the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermuller) in laboratory conditions. *Acta Sci. Pol. Hort. Cult.*, 13 (5): 145-162.
139. KHEMICI M., ZAMOUM M., DEMOLIN G., 1988. Ecologie de *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. (Lépidoptère, Thaumetopoeidea) en Algérie. Incidence du climat sur le comportement de l'insecte. *Ann. Rech. For., Algérie*, 3 (3) : 67-77.
140. KHOSRAVI R. and SENDI J.J., 2013. Toxicity, development and physiological effect of *Thymus vulgaris* and *Lavandula angustifolia* essential oils on *Xanthogaleru caluteola* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Journal of King Saud University - Science*, 25 (4): 349-355.
141. KIRIAKOF F., 1970. Lepidoptera familia Thaumetopoeidae. In *Genera Insectarium de P. Wytzman. Ed. Mercurius*. Belgique, Fasc. 219 Lepidoptera, 55 p.
142. KOZIOL N., 2015. Huiles essentielles d'*Eucalyptus globulus*, d'*Eucalyptus radiata* et de *Corymbia citriodora* : qualité, efficacité et toxicité. Thèse de Doctorat, Nancy, 117 p.
143. KUMAR P., MISHRA S., MALIK A. and SATYA S., 2011. Insecticidal Evaluation of essential oils of *Citrus sinensis* L. (Myrtales: Myrtaceae) against housefly, *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae). *Parasitol. Res.* 110: 1929-1936.

- 144.** LEBLOND A., MARTIN J.C., PROVENDIER D., GUTLEBEN C., ROBINET C., NAPOLEONE C., 2010. Inventaire et évaluation des méthodes de lutte contre la processionnaire du pin. *Enquête nationale - guide technique*. Plante et Cité, 25 p.
- 145.** LE-HOUEROU N., 1995. Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l’Afrique : Diversité biologique, développement durable et désertisation. *Options Méditerranéennes, série B*, n° 10 : 1-396.
- 146.** LE MASNE G., 1952. Classification et caractéristiques des principaux types de groupements sociaux réalisés chez les Invertébrés. *Coll. Int. C.N.R.S, structure et Physiologie des Sociétés animales*, Paris, n° 34, 19-70.
- 147.** LESAGE-MEESSEN L., BOU M., SIGOILLOT J. C., FAULDS C. B., LOMASCOLO A., 2015. Essential oils and distilled straws of lavender and lavandin: a review of current use and potential application in white biotechnology. *Applied Microbiology and Biotechnology* 99: 3375–3385.
- 148.** LOUDHAIEF R., 2018. Effets des bio-insecticides à base de *Bacillus thuringiensis* sur la physiologie intestinale de la Drosophile, Thèse de doctorat, de l’Université Nice Sophia Antipolis, France, 209 p.
- 149.** ŁYCZKO J., JALOSZYNSKI K., SURMA M., GARCIA-GARVI J. M., CARBONELL-BARRACHINA Á., SZUMNY A., 2019. Determination of Various Drying Methods’ Impact on Odour Quality of True Lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) Flowers. *Molecules* 24 (16) : 2900.
- 150.** MAHIEU N., 1970. La destruction de la processionnaire du pin par tir au fusil. *Phytoma* 220, 63.
- 151.** MALAZGIRT O., 1965. Çam keseböcegi (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) nintirtil paraziti *Phryxe caudata* Rond. (Dip., Lar.) nin biyolojisi. çeviri, *Orman Mühendisligi Dergisi* 4 (6): 37-44.
- 152.** MARIEN J. N., 2008. Forêts périurbaines et bois énergie : quels enjeux pour l’Afrique centrale ? état des forêts, 13 p.
- 153.** MARKALAS S., 1989. Influence of soil moisture on the mortality, fecundity and diapause of the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff.). *J. Appl. Ent.* 107: 211- 215.
- 154.** MARTIN J.C., 2005. La processionnaire du pin : *Thaumetopoea pityocampa* (Denis et Schiffermüller). Biologie et protection des forêts. Synthèse des recherches bibliographiques et des connaissances, INRA Avignon, 61 p.

- 155.** MARTIN J.C., 2007. La chenille processionnaire du pin. *In : Dossier : la chenille processionnaire du pin -1/d/la-chenille-processionnaire-du-pin_700/c3/221/p3/*
- 156.** MARTIN, J.C., BONNEAU, X., 2006. *Bacillus thuringiensis*, 30 years of control of cluster caterpillars. *Phytoma*, 590 : 4-7.
- 157.** MARTIN J.C., FREROT B., 2005. Evolution de la lutte contre la processionnaire du pin : vers l'utilisation de la phéromone de synthèse. *Bilan de la Santé des forêts* 1: 29-31.
- 158.** MARTIN J.C., BONNET C., MAZET R., 2009. La processionnaire du pin : vers un contrôle écologique et raisonné. *In : conférence sur l'entretien des espaces verts, jardins, gazons, forêts, zones aquatiques et autres Zones Non Agricoles. Angers (France) : AFPP, Association Française de Protection des Plantes, 28-29 Octobre 2009, 9 p.*
- 159.** MARTIN J.C., BRINQUIN A.S., CHAMBRAS M., JEAN F., MAZET R., CORREARD M., PRINGARBE M., THEVENET J., MOREL E., 2013. La processionnaire du pin : des exemples de gestion utilisant les techniques alternatives. AFPP – 3^{ème} Conférence sur l'entretien des espaces verts, JARDINS, gazons, forêts, zones aquatiques et autres zones non agricoles TOULOUSE – 15, 16 et 17 octobre 2013, p 11.
- 160.** MASUTTI DRS L., BATTISTI A., 1990. *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) in Italy Bionomics and perspectives of integrated control. *Journal of Applied Entomology*, 110: 229-234.
- 161.** MATTHIOLI P.A., 1568. I discorsi di M. Matthioli, medico cesareo nelli sei libri di Pedacio Dioscoride Anazarbero. Valgrisi Venezia.
- 162.** MECHERI H., KOUIDRI M., BOUKHEROUFA-SAKRAOU F., 2018. Variation du taux d'infestation par *Thaumetopoea pityocampa* du pin d'Alep : effet sur les paramètres dendrométriques dans les forêts de la région de Djelfa (Atlas saharien, Algérie). *C. R. Biologies*, 341 : 380-386.
- 163.** MEM M., 2011. Lettre de politique énergétique. Bujumbura, Burundi, DGEE, 35 p.
- 164.** MESSAOUDI K. C., 2016. Dégât, lutte sur la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocompa* dans la forêt de HARHARA région SOUR EL GHOZELEN. Mém. Master, 54 p.
- 165.** MESSAOUDI M. I., FILALI H., AIT HAJ S. A., NAYME K., TIMINOUNI M., RAHMOUNE I., HAKKOU F., 2017. Phytochemical composition and antibacterial activity of Moroccan *Lavandula angustifolia* Mill. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 20 (4) : 1074-1082.

166. MEZALI M., 2003. Rapport sur le secteur forestier en Algérie. 3^{ème} session du forum des Nations Unis sur les forêts. 9 p.
167. MIRCHEV P., GEORGIEV G., 2013. Dispersal of male butterflies of pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*). *Silva Balcanica* 14 (1) : 102-108.
168. MIRCHEV P., SCHMIDT G. H., TSANKOV G., et PLLANA S., 1999. Egg parasitoids of the processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Den. and Schiff.) collected in Albania. *Bollettino di Zoologia Agraria e di Bachicoltura* 31 : 152-165.
169. MODER K., 2010. Alternatives to F-Test in One Way ANOVA in case of heterogeneity of variances (a simulation study). *J. Psychological Test and Assessment Modeling*, 52: (4), 343-353.
170. MONTOYA R., 1981. *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. Plagas de insectos en las masas forestales espanolas. Ed. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion, Madrid, 51-64.
171. MOON T., CAVANAGH M. A., WILKINSON J. M., 2006. Antiparasitic activity of two Lavandula essential oils against *Giardia duodenalis*, *Trichomonas vaginalis* and *Hexamita inflata*. *Parasitol. Res.* 99(6) : 722-728.
172. MORALES R., 2002. The history, botany and taxonomy of the genus *Thymus*. In: Stahl-Biskup., Saez, F. (Eds), *Thyme: The Genus Thymus*. Taylor & Francis, London. pp: 1-43.
173. MOREL, E., 2008. La chenille processionnaire du pin et ses parasites oophages : vers un moyen de lutte biologique ? In : *Collaborations scientifiques, un stage : Les parasites oophages de la processionnaire*. Master Ingénierie en Ecologie et Gestion de la Biodiversité, Montpellier, 66 p.
174. MUTIN G., 1977. La Mitidja, décolonisation et espace géographique. Ed. Office Publ. Univ., Alger, 606 p.
175. NAHAL I., 1962. Le pin d'Alep. Ann. Sc. Eaux et forêts, Nancy, XIX, 4 p.
176. NAHAL I., 1964. Le Pin d'Alep. Étude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole. *Annales de l'école nationale des eaux et forêts* 19 (4) : 533- 627.
177. NEZHADALI A., NABAVI M., RAJABIAN M., AKBARPOUR M., POURALI P., AMINI F., 2014. Chemical variation of leaf essential oil at different stages of plant growth and *in vitro* antibacterial activity of *Thymus vulgaris* Lamiaceae, from Iran Beni-Suef Univ. *J. Basic Appl. Sci.* 3: 87-92.
178. NORBETRO M., 1990. The temperature of egg masses of *Thaumetopoea pityocampa* (Den & Schiff) (Lep, Thaumetopoeidae). *Redia LXXIII*, (1) : 149-161.

- 179.** NOVAK F., LAMY L., 1987. Etude ultra-structurale de la glande urticante de la chenille processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* schiff. (Lepidoptere: Thaumetopoeidae). *International Journal of Insect Morphology and Embryology* 16 (3-4): 263-270.
- 180.** ODEM., 2008. Lutte contre les chenilles processionnaires du pin et du chêne Janvier 2008, 14 p.
- 181.** ONS., 2015. Statistiques sur l'environnement. Rapport. Office national des statistiques, 82 p.
- 182.** OULEBSIR-MOHANDKACI H., AIT KAKI S. and DOUMANDJI-MITICHE B., 2015. Essential Oils of two Algerian aromatic plants *Thymus vulgaris* and *Eucalyptus globulus* as Bio-insecticides against aphid *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). *Wulfenia Journal, Klagenfurt, Austria* 22 (2): 185-197.
- 183.** OZCAN M., CHALCHAT J. C., 2004. Aroma profile of *Thymus vulgaris* L. growing wild in Turkey. *Bulgarian Journal of Plant Physiology* 30(3-4): 68-73.
- 184.** PANAYOTOU T., ASHTON P.S., 1992. Not by timber alone: economics and ecology for sustaining tropical forests. Washington, DC et Covelo, CA, Island Press, 282 p.
- 185.** PAPARATTI B., FABOZZI R., 1988. A new pathogen of the pine processionary caterpillar (*Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schif.), Lepidoptera: Thaumetopoeidae. *Inf Fitopatol* 38: 45-48.
- 186.** PARDÉ J., 1957. La productivité des forêts de Pin d'Alep en France. *Annales de l'école nationale des eaux et forêts*, T. XV, Fasc. 2 : 365-414.
- 187.** PAVELA R., 2008. Larvicidal effects of various Euro-Asiatic plants against *Culex quinquefasciatus* Say larvae (Diptera: Culicidae). *J. Parasitol. Res.* 102 (3): 555-559.
- 188.** PAVELA R., VRCHOTOVA N., TRISKA J., 2009. Mosquitocidal activities of thyme oils (*Thymus vulgaris* L.) against *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae). *J Parasitol. Res.* 105 (5): 1365-1370.
- 189.** PESTAÑA M., SANTOLAMAZZA-CARBONE S., 2010. Defoliation negatively affects plant growth and the ectomycorrhizal community of *Pinus pinaster* in Spain. *Oecologia* 165 (3): 723-733.
- 190.** PIMENTEL C., FERREIRA C., NILSSON, J.A., 2010. Latitudinal gradients and the shaping of life history traits in a gregarious caterpillar. *Biol. J. Linnean Soc.* 100 (1) : 224-236.
- 191.** POLGE H., 1992. Le bois de pin d'Alep, *Forêt méditerranéenne*, T. XW, n° 3 : 234-237.

- 192.** PORTE A., HUARD F., DREYFUS P., 2004. Microclimate beneath pine plantation, semimature pine plantation and mixed broadleaved-pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 126, 175-182.
- 193.** PRUSINOWSKA R., SMIGIELSKI K., 2014. Composition, biological properties and therapeutic effects of lavender (*Lavandula angustifolia* L). *Herba Polonica*, 60 (2) : 12.
- 194.** QUÉZEL P., 1980. Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen. Actualités d'écologie forestière. *Edition Gautier-Villars. Paris* : 205-255.
- 195.** QUÉZEL P., 1986. Les Pins du groupe « halepensis »: Écologie, Végétation, Écophysologie. Options Méditerranéennes. Série Étude CIHEAM 86/1 : 11-24.
- 196.** RAMADE F., 1984. *Eléments d'écologie. Ecologie fondamentale*, Mac-Graw-Hill, Paris, 397 p.
- 197.** RATHGEBER C., 2002. Impact des changements climatiques et de l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique sur la productivité des écosystèmes forestiers : exemple du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Provence calcaire (France). Thèse Doct. Université de Droit, d'Économie et des Sciences d'Aix-Marseille. 311 p.
- 198.** REGNAULT-ROGER C. and HAMRAOUI A., 1993. Influence d'huiles essentielles sur *Acanthoscelides obtectus* Say., bruche du haricot. *Acta Botanica. Gallica* 140 (2) : 217-222.
- 199.** RIBRIOUX Y., DOLBEAU C., 1975. Essai de lutte contre la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) à l'aide du diflubenzuron. *Phytiatrie-Phytopharmacie*, 24 : 193-204.
- 200.** RIVIERE J., 2011. Les chenilles processionnaires du pin : évaluation des enjeux de santé animale, Thèse de doctorat, école nationale de vétérinaires d'Alfort, France, 197 p.
- 201.** 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. *Global Ecology and Biogeography*, 16 (4): 460-471.
- 202.** RONDEUX J., 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Presses agronomiques, Gembloux, Belgique. 521 p.
- 203.** RONNÅS C., LARSSON S., PITACCO A., BATTISTI A., 2010. Effects of colony size on larval performance in a processionary moth. *Ecol. Entomol.* 35: 436-445.

- 204.** ROUSSELET J., 2008. La chenille processionnaire du pin et le réchauffement climatique. Vers de nouvelles méthodes de lutte contre un insecte forestier urticant qui s'invite en ville. *In: Colloque Insectes et changement climatique* Micropolis, Aveyron (France), 15 novembre 2008.
- 205.** RUIZ L.M., SEGURA C., TRUJILLO J., ORDUZ S., 2004. In vivo binding of the Cry11Bb toxin of *Bacillus thuringiensis* subsp. Medellin to the midgut of mosquito larvae (Diptera: Culicidae). *Mem. Inst. Oswaldo Cruz*, 99 (1): 73-79.
- 206.** RUSSELL E.P., 1989. Enemies hypothesis - A review of the effect of vegetational diversity on predatory insects and parasitoids. *Environmental Entomology*, 18, 590-599.
- 207.** SAADI A., BRADA M., KOUIDRI M., DEKKICHE H., ATTAR F., 2016. Chemical composition and content of essential oil of *Lavandula multifida* from Algeria. *Chemistry of natural compounds* 52(1): 162-164.
- 208.** SADFI H., 2018. La relation entre le couvert végétal et les conditions édaphiques cas : de la région d'Ain Defla. Mém. Master, Université Khemis Miliana, 75 p.
- 209.** SAFAR W., 1994. Contribution à l'étude dendroécologique du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) dans une région semi-aride d'Algérie : l'Atlas Saharien (Ouled Naïl, Aurès, Hodna). Thèse de doctorat en Écologie, Algérie (Ouled Naïl, Aurès, Hodna), 215 p.
- 210.** SAHNOUNE F.S., CHIBANE M., 2018. La distribution des nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin d'Alep *Thaumetopoea pityocampa* dans la région de Sour El Ghozlane. Mém. Master, Univ. Bouira, 65 p.
- 211.** SCARASCIA-MUGNOZZA G., 1986. Recherches sur l'écophysiologie de *Pinus halepensis* Mill. (Research on the ecophysiology of *Pinus halepensis* Mill.). *Options Méditerranéennes*, 1: 89-97.
- 212.** SCHMIDT G.H., MIRCHEV P., et TSANKOV G., 1997. The egg parasitoids of *Thaumetopoea pityocampa* in the Atlas Mountains near Marrakech (Morocco). *Phytoparasitica* 25 (4): 275-281.
- 213.** SCOTT T.L., MILTON C.T., ERICKSON G.E., KLOPFENSTEIN T.J., STOCK R.A., 2003. Corn processing method in finishing diets containing wet corn gluten feed. *J. Anim. Sci.*, 81 (12): 3182-3190.
- 214.** SEBTI S., 2015. Recherche écologique et répartition spatio-temporelle de la processionnaire *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiffermüller dans la région de l'Atlas blidéen. Thèse de doctorat en sciences Agronomiques. Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 108 p.
- 215.** SELMI., 1976. Thème personnel E.I.C.F. Octobre 1976. E.N.G.R.E.F. Nancy.

- 216.** SHAWL A.S, KUMAR S.J., 2000. Med Potential of Lavender oil industry in Kashmir. *J. Med. Arom. Plant Sci.* 22: 319-321.
- 217.** SIDLE R.C., ZIEGLER A.D., NEGISHI J.N., NIK A.R., SIEW R. et TURKELBOOM F., 2006. Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia, *Forest Ecol. Manag.* 224:199-225.
- 218.** SIEMANN E., TILMAN D., HAARSTAD J., RITCHIE M., 1998. Experimental tests of the dependence of arthropod diversity on plant diversity. *American Naturalist* 152 : 738-750.
- 219.** SILVY C., 1992. Quantification le phytosanitaire. *Courrier de la cellule environnement de l'INRA*, France, 18 : 29-44.
- 220.** STEWART P., 1969. Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afri. Nord* 59 : 23-36.
- 221.** TCHOUMBOUGNANG F, JAZET DONGMO PM, LAMBERT SAMEZA M, NKOUAYA MBANJO EG, TIAKO FOTSO GB, AMVAM ZOLLO PH., 2009. Activité larvicide sur *Anopheles gambiae* giles et composition chimique des huiles essentielles extraites de quatre plantes cultivées au Cameroun. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 13: 77-84.
- 222.** TIBERI R., 1999. Egg parasitoids of the pine processionary caterpillar, *Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schiff. (Lep., Thaumetopoeidae), *Redia*, LXIII, 307-321.
- 223.** TRIGGIANI O., TARASCO E., 2001. Preliminary attempts to control overwintering populations of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. et Schiff.) (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) with *Steinernema feltiae* (Filipjev, 1934) (Nematoda: Steinernematidae). *Entomology* 35: 7-15.
- 224.** TRIGGIANI O., TARASCO E., 2002. Efficacy and persistence of entomopathogenic nematodes in controlling larval populations of *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera: Thaumetopoeidae). *Biocontrol Sci. Technol.* 12: 747-752.
- 225.** TRIGGIANI O., TARASCO E., 2003. Application of entomopathogenic nematodes in controlling overwintering larvae of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. et Schiff.) (Lepidoptera: Thaumetopoeidae). *B OILB/SROP* 26: 165-167.
- 226.** TSANKOV G., SCHMIDT G. H. et MIRCHEV P., 1996. Parasitism of egg-batches of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Thaumetopoeidae) in various regions of Bulgaria. *Journal of Applied Entomology-Zeitschrift Fur Angewandte Entomologie*, 120: 93-105.

- 227.** TSANKOV G., SCHMIDT G.H., MIRCHEV P., 1998. Studies on the egg parasitism in *Thaumetopoea pityocampa* over a period of four years (1991-1994) at Marikostino/Bulgaria. *Anzeiger Fur Schadlingskunde Pflanzenschutz Umweltschutz* 71, pp. 1-7.
- 228.** TURPIN M., 2006. Les chenilles urticantes : effets pathogènes chez l'homme et chez l'animal et données actuelles sur les venins et les moyens de lutte. Thèse. Méd. Vét., Nantes, n° 097, 182 p.
- 229.** UREMIS I., 2009. Herbicidal activity of essential oils on germination of some problem weeds. *Asian J. Chem.* 21 (4): 3199-3210.
- 230.** VAGO C., 1958. Virose intestinale chez la Processionnaire du Pin *Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schiff. (Lepidoptera). *Entomophaga*, T. III, n° 3, pp. 35-37.
- 231.** VAGO C., 1964. Emploi des virus contre les insectes nuisibles et possibilités d'adaptation de cette méthode de lutte contre les vecteurs de maladie. *Bull. O.M.S.* 31, 513-517.
- 232.** VEGA J.M., MONEO I., ARMENTIA A., FERNANDEZ A., VEGA J., DE LA FUENTES R., SANCHEZ P., SANCHIS M.E., 1999. Allergy to the pine processionary caterpillar (*Thaumetopoea pityocampa*). *Clin. Exp. Allergy*, 29: 1418-1423.
- 233.** VEGA J., VEGA J. M., MONEO I., ARMENTIA A., CABALLERO M. L., MIRANDA A., 2004. Occupation alimnologic contact urticarialfrom pine processionary caterpillar (*Thaumetopoea pityocampa*): experiencein 30 cases. *Contact Dermat.* 50 (2): 60-64.
- 234.** VERCHOT L.V., VAN NOORDWIJK M., KANDJI S., TOMICH T., ONG C., ALBRECHT A., MACKENSEN J., BANTILAN C., ANUPAMA K., PALM C., 2007. Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry, *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change.* 12: 901-918.
- 235.** VERMA R.S., RAHMAN L.U., CHANOTIYA C.S., VERMA R.K., CHAUHAN A., YADAV A., SINGH A., YADAV A.K., 2010. Essential oil composition of *Lavandula angustifolia* Mill. cultivated in the mid hills of Uttarakhand. *J. Serbian Chem. Soc.*, 75 (3): 343-348.
- 236.** VILES H.A., 1990. The agency of organic beings. : a selective review of recent work in biogeomorphology, in *Vegetation and erosion: processes and environments*, Ed. J.-B. Thornes, Chichester, John Wiley & Sons Ltd, pp. 5-24.
- 237.** VISSER J. H., 1986. Host odor perception in phytophagous insects. *Annual Review of Entomology* 31: 121-144.

- 238.** WATT A., 1992. Insect pest population dynamics: Effects of tree species diversity. *The ecology of mixed-species stands of trees* (ed. by Cannell, M.G.R., Malcolm, D.C. & Robertson, P.A.), *Blackwell, Oxford*, pp. 267-275.
- 239.** WERNO J., LESTHELLE S., DOERMANA F. VINCENDEAU F., 2002. Envenimations par les lépidoptères. *Revue Française des Laboratoires* 342 : 35-39.
- 240.** WESOŁOWSKA A., JADCZAK D., GRZESZCZUK M., 2010. Influence of distillation time on the content and composition of essential oil isolated from lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.). *Herba Pol.* 56 (3) : 24-36.
- 241.** WHO., 1999. Microbial pest control agent: *Bacillus thuringiensis*. Environmental Health Criteria 217. *World Health Organization Publication*: Genève, 125 p.
- 242.** WRI, 1988. *World resources 1988*. New York, Institut international pour l'environnement et le développement et Institut mondial pour les ressources. Basic Books, 388 p.
- 243.** YERGEAU E. et POIRIER M., 2013. SPSS [En ligne]. Consulté le 23 janvier 2017, <http://spss.espaceweb.usherbrooke.ca>
- 244.** YVES T., 2010. Résumé du Cours de Statistique Descriptive, 171 p.
- 245.** ZAHED K. et BRAHIMI S., 2013. Influence de la période de récolte sur le rendement des huiles essentielles de deux plantes de lamiacées *Thymus vulgaris* L et *Origanum vulgare* L., Mém. Master, Univ. DJILALI BOUANAMA, Khemis Meliana, 64 p.
- 246.** ZAMOUM M., 1986. Instruction technique, réseau d'avertissement contre la processionnaire du pin, juin 1986, INRF, 14 p.
- 247.** ZAMOUM M., 1987. Bio-écologie de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff et technique d'avertissement. Communication : Première journée scientifique du muséum national de la nature, Alger, 6 p.
- 248.** ZAMOUM M., 1992. Evaluation de quelques facteurs de mortalité agissant sur une population de *Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schiff. (Lep., Thaumetopoeidae) depuis le départ des chenilles en procession de nymphose jusqu'à l'émergence des adultes. Etude biologique particulière sur deux parasitoïdes : *Phryxe caudata* Rond. (Dipt., Tachinidae) et *Coelichneumon rudis* Fonsc. (Hym., Ichneumonidae). DEA, Univ. Sci. de Rennes I, 30 p.
- 249.** ZAMOUM M., 1998. Données sur la bio-écologie, les facteurs de mortalité et la dynamique des populations de *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiff. (Lep., Thaumetopoeidae) dans les pineraies subsahariennes de la région de Djelfa (Algérie). Thèse de Doct., Univ. Sci. Rennes I, France, 247 p.

- 250.** ZAMOUM M., DÉMOLIN G., 2000. Reduced natural enemies pressure at the end of larval cycle of *Thaumetopoea pityocampa* Denis and Schiff. (Lep., Thaumetopoeidae) in a subsaharian region (Djelfa - Algeria). Poster, IUFRO Cogress, 7-12/8/2000
- 251.** ZAMOUM M., DÉMOLIN G., 2003. Possibilités de renforcement de la lutte contre *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiffermüller (Lep., Thaumetopoeidae) dans les reboisements de *Pinus halepensis* du "barrage vert". *Ann. Sci. For. Algérie* 1: 18-26.
- 252.** 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 la Recherche Forestière, Tunisie* 6 : 155-173.
- 253.** ZAMOUM M., DÉMOLIN G., MARTIN J., 1997. Efficiency of a microbiological insecticide (Foray 48B) tests on the stages L3 and L4 of the pine processionary *Thaumetopoea pityocampa* (Den. and Schiff.) In the reforestations of Moudjebara (Djelfa, Algeria). *Annals of the Forest Research in Algeria*, 1: 3-41.
- 254.** ZAMOUM M., KHEMICI M., DÉMOLIN G., 1999. Eléments constitutifs de la stratégie de lutte intégrée contre *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiff. (Lep., Thaumetopoeidae) dans les reboisements du "Barrage Vert" - Cas de Moudjebara (Djelfa). Acte 1^{er} séminaire "Développement des zones arides et semi-aride", Djelfa, 7 p.
- 255.** ZAMOUM M., DÉMOLIN G., MARTIN J.C., 2005. Lutte contre la processionnaire du pin : que deviennent les chenilles survivantes après un traitement au Bt aux stades L3 et L4. *Phytoma- la défense des végétaux*, 585 : 38-41.
- 256.** ZAMOUM M., DÉMOLIN G. et SAI K., 2006. Données sur les envols d'adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiff. (Lep., Thaumetopoeidae) dans les pineraies semi arides. *Annales de la Recherche Forestière en Algérie* 12 : 30-42.
- 257.** ZAMOUM M., MARTIN J., BENSIDI A. and BAHMANE R. 2016. Immediate and delayed mortality of the pine processionary moth treated by *Bacillus thuringiensis* var. kurstaki 3a, 3b in the sub- Saharian pine reforestations. *Turkish J. Forest.* 17: 76-79.
- 258.** ZANKOV G., 1960. Untersuchungen über einige merkmale aus der Biologie und Oekologie Kiefern prozessions spinners (*Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schiff.) bei uns in Verbindung mit den Methoden zu seiner Bekämpfung. – Ministerium für Land und Forstwirtschaft, Forschungsinstitut für Forst und Forstwirtschaft, *Wissenschaftliche Arbeiten, Bd. VIII*, 231-262.

- 259.** ZHANG Q., LIU G.T., SCHLYTER F., BIRGERSSON G., ANDERSON P., VALEUR P., 2001. Olfactory response of *Ips duplicatus* to non-host leaf and bark beetles. Volatiles in inner Magnolia, China, *Journal of Chemical Ecology* 27: 955-1009.
- 260.** ZHANG Q.X., JIANG Y., ZHANG Z.Q., 2006. The study on development of essential oil from lavender. *Flavor Fragr. Cosm.* 6 : 21-24.
- 261.** ZIOUCHE S., BAALI F., MOUTASSEM D., DJAZOULI Z., 2017. Stratégies de choix de l'emplacement des nids d'hiver de *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermüller, 1775) au niveau de trois pinèdes dans la région de Bordj Bou Arreridj (Algérie). *Revue Agrobiologia*, 7 (2): 412-426.

Annexes

Annexe 1

Tableau 1. Températures mensuelles moyennes, des maximas et des minimas d'Ain Defla obtenues de 2014 jusqu'à 2017 exprimées en degrés Celsius

		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2014	M (°C.)	7,60	7,90	7,60	11,30	13,70	17,60	21,70	22,30	21,40	15,20	12,60	7,00
	m (°C.)	15,40	17,10	18,20	25,80	28,60	32,70	36,90	38,30	34,10	29,10	21,40	14,60
	Moy.	11,50	12,50	12,90	18,55	21,15	25,15	29,30	30,30	27,75	22,15	17,00	10,80
2015	M (°C.)	4,70	5,80	7,40	12,90	15,90	18,80	24,20	24,50	19,40	15,60	9,50	6,10
	m (°C.)	14,60	13,30	20,30	26,20	31,00	33,90	41,50	39,10	32,50	27,40	21,50	19,70
	Moy.	9,65	9,55	13,85	19,55	23,45	26,35	32,85	31,80	25,95	21,50	15,50	12,90
2016	M (°C.)	7,30	9,10	7,50	11,00	14,00	19,10	23,10	21,90	19,00	16,80	10,70	7,90
	m (°C.)	18,10	18,10	18,10	24,00	28,70	35,60	39,90	38,00	33,80	30,90	20,50	17,10
	Moy.	12,70	13,60	12,80	17,50	21,35	27,35	31,50	29,95	26,40	23,85	15,60	12,50
2017	M (°C.)	4,70	8,70	8,50	11,10	16,50	21,40	23,30	25,20	18,66	13,70	8,02	6,12
	m (°C.)	13,96	19,80	22,10	25,50	32,30	37,90	40,90	41,21	33,01	28,30	19,92	14,42
	Moy.	9,33	14,25	15,30	18,30	24,40	29,65	32,10	33,21	25,84	21,00	13,97	10,27

(O.N.M., 2014 à 2017)

M : la moyenne mensuelle des températures maxima.

m : la moyenne mensuelle des températures minima.

Moy. : la moyenne mensuelle des températures.

Tableau 2. Précipitations mensuelles enregistrées dans la station météorologique d'Ain Defla année par année durant la période allant de 2014 à 2017

		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Cumule
2014	P (mm)	0,00	25,00	72,50	8,00	28,00	27,00	0,00	4,50	8,80	32,00	58,00	110,00	373,80
2015	P (mm)	97,20	122,90	58,90	0,00	11,20	2,70	0,00	1,70	18,00	21,20	34,90	0,00	368,70
2016	P (mm)	45,60	91,00	178,90	27,20	28,20	0,30	3,70	0,00	13,10	8,50	78,40	82,80	557,70
2017	P (mm)	239,80	5,40	33,40	2,00	4,10	4,10	0,00	2,90	5,00	38,20	61,00	105,90	501,80

(O.N.M., 2014 à 2017)

P : Précipitation en mm.

Tableau 3. Humidité relative mensuelle enregistrée dans la station météorologique d'Ain Defla année par année durant la période allant de 2014 à 2017

		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2014	Hr (%)	77	74	72	60	56	54	43	41	46	54	68	82
2015	Hr (%)	80	83	69	59	52	47	37	46	55	66	60,8	66
2016	Hr (%)	78,2	74	74,03	67	59	48	40	45,7	53	60,8	75,9	89
2017	Hr (%)	76	66	67,4	64	58,73	44,3	39	44,38	51,7	56	68,4	85

(O.N.M., 2014 à 2017)

Hr : Humidité relative en %.

Tableau 4. Vitesse du vent mensuelles enregistrée dans la station météorologique d'Ain
Defla année par année durant la période allant de 2014 à 2017

		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2014	V (m/s)	3,1	4	11,3	4	3,5	3,4	3,4	3	3,3	3,4	3,7	3,1
2015	V (m/s)	2,8	3,7	7,5	3,7	3,6	3,8	3,5	3,76	3,63	3,3	3,04	2,9
2016	V (m/s)	3,8	6	4,4	3,5	4,3	4,9	4,3	4,1	3,9	3,51	3,5	3,09
2017	V (m/s)	3,2	5,6	4,9	4	3,7	3,7	2,86	3,1	3,5	3,1	3,22	3,5

(O.N.M., 2014 à 2017)

V : Vitesse du vent en m/s.

Annexe 2 : Températures minimales (T min.), maximales (T max.) et précipitations (P)
(2003-2017)

Années	Mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2003	T mini (°C)	6,06	5,48	8,55	10,32	13,32	21,56	24,17	23,81	19,16	15,77	10,29	6,38
2004	T mini (°C)	5,85	6,84	7,73	9,46	11,71	17,99	21,83	23,47	19,19	16,17	7,74	7,22
2005	T mini (°C)	2,86	2,85	8,60	9,75	14,98	19,38	22,75	20,33	16,68	14,93	8,39	6,32
2006	T mini (°C)	4,67	4,80	8,50	12,46	17,27	19,45	22,06	20,77	17,95	15,88	11,52	7,62
2007	T mini (°C)	5,06	8,98	6,73	11,36	13,35	18,14	21,59	22,11	18,96	14,10	7,87	6,06
2008	T mini (°C)	5,55	7,07	7,33	9,76	14,25	17,55	22,85	21,83	19,44	15,00	7,83	5,62
2009	T mini (°C)	6,54	4,92	7,60	8,23	14,46	19,39	22,10	21,20	17,82	13,50	9,50	7,86
2010	T mini (°C)	7,22	7,96	9,08	11,25	12,32	17,52	22,39	21,48	18,13	13,06	9,56	6,80
2011	T mini (°C)	5,30	7,10	8,30	11,34	14,69	17,89	21,75	22,67	18,90	14,80	9,50	7,10
2012	T mini (°C)	5,40	5,88	5,70	10,50	14,13	17,18	22,24	22,90	18,14	15,49	10,14	6,53
2013	T mini (°C)	6,10	6,40	9,11	10,77	14,17	18,40	23,13	21,13	18,33	15,53	9,83	6,64
2014	T mini (°C)	7,60	7,90	7,60	11,30	13,70	17,60	21,70	22,30	21,40	15,20	12,60	7,00
2015	T mini (°C)	4,70	5,80	7,40	12,90	15,90	18,80	24,20	24,50	19,40	15,60	9,50	6,10
2016	T mini (°C)	7,30	9,10	7,50	11,00	14,00	19,10	23,10	21,90	19,00	16,80	10,70	7,90
2017	T mini (°C)	4,70	8,70	8,50	11,10	16,50	21,40	23,30	25,20	18,66	13,70	8,02	6,12
Années	Mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2003	T max (°C)	13,47	14,75	21,26	23,51	28,34	38,33	41,05	40,21	33,80	27,28	20,72	15,99
2004	T max (°C)	16,16	19,67	20,22	22,93	23,76	34,96	38,64	40,06	35,24	30,48	20,24	15,45
2005	T max (°C)	19,50	13,30	20,30	23,48	31,72	35,58	39,31	37,39	32,33	28,60	19,29	15,07
2006	T max (°C)	13,61	14,79	21,86	26,77	31,58	34,73	39,85	37,11	33,05	31,82	24,08	16,04
2007	T max (°C)	17,72	18,39	18,36	21,38	28,58	33,33	39,25	38,03	33,26	25,59	18,57	15,81
2008	T max (°C)	17,08	19,37	20,22	25,05	26,66	33,16	39,35	39,53	32,35	26,10	18,31	14,15
2009	T max (°C)	13,95	16,94	20,81	20,50	30,42	36,96	39,20	38,70	30,61	29,37	23,02	18,07
2010	T max (°C)	15,72	17,54	20,45	24,34	26,59	33,28	40,35	38,00	33,19	26,77	18,39	16,00
2011	T max (°C)	14,90	16,65	20,20	26,59	28,13	33,49	38,00	40,04	32,60	27,10	20,70	16,80
2012	T max (°C)	15,5	16,25	20,21	26,55	30,41	34,66	39,33	40,18	32,12	27,37	20,17	15,42
2013	T max (°C)	17,6	16,73	19,55	24,3	30,44	35,1	40,1	39,5	33,17	29,31	20,43	16,36
2014	T max (°C)	15,4	17,1	18,2	25,8	28,6	32,7	36,9	38,3	34,1	29,1	21,4	14,6
2015	T max (°C)	14,6	13,3	20,3	26,2	31	33,9	41,5	39,1	32,5	27,4	21,5	19,7
2016	T max (°C)	18,1	18,1	18,1	24	28,7	35,6	39,9	38	33,8	30,9	20,5	17,1
2017	T max (°C)	13,96	19,8	22,1	25,5	32,3	37,9	40,9	41,21	33,01	28,3	19,92	14,42

Années	Mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2003	P (mm)	36,00	33,60	39,4	25,30	35,00	6,30	0	2,80	21,00	28,1	72,50	78,2
2004	P (mm)	70,00	86,20	23,5	11,70	0,50	0,00	0,20	0	11,10	20,6	55,80	102,3
2005	P (mm)	55,20	76,30	25,2	6,500	50,30	6,80	0	3,00	10,20	61,0	52,90	74
2006	P (mm)	16,50	47,60	123,6	70,70	4,60	0,40	7,50	2,00	21,50	1,40	12,20	71
2007	P (mm)	24,90	13,70	64,90	5,10	36,70	25,30	1,90	0,10	60,20	73,30	105,6	31,4
2008	P (mm)	89,40	31,80	73,50	74,90	19,10	0,40	3,10	1,70	23,60	113,2	77,20	105
2009	P (mm)	95,60	91,50	48,20	19,80	21,20	0,70	0	40,20	24,30	3,80	67,30	83,40
2010	P (mm)	64,90	72,60	31,0	59,50	56,70	14,40	3,20	0,80	1,50	88,3	86,00	37,90
2011	P (mm)	30,90	127,50	76,7	87,30	20,20	2,10	0	0	0,20	34,7	107,6	35,50
2012	P (mm)	85,4	69,8	60,2	51,8	44,2	0,1	2	22,3	1,4	33,4	69,5	7,1
2013	P (mm)	61,4	40,8	80,6	8,4	8,2	21	0	0,2	22,8	4,1	68,7	55,1
2014	P (mm)	0	25	72,5	8	28	27	0	4,5	8,8	32	58	110
2015	P (mm)	97,2	122,9	58,9	0	11,2	2,7	0	1,7	18	21,2	34,9	0
2016	P (mm)	45,6	91	178,9	27,2	28,2	0,3	3,7	0	13,1	8,5	78,4	82,8
2017	P (mm)	239,8	5,4	33,4	2	4,1	4,1	0	2,9	5	38,2	61	105,9

Résumés

دراسة بيولوجية حيوية لحشرة الدودة الجرارة التي تصيب الصنوبر الحلبي وكيفية تكاثرها في عدة مناطق غابية بولاية عين الدفلى مع إيجاد حلول لمكافحتها.

الملخص

الدودة الجرارة هي واحدة من أكبر الآفات البيولوجية التي تدمر الغابات الصنوبرية في الجزائر خاصة في حوض البحر الأبيض المتوسط ووسط أوروبا عامة اسمها العلمي *Thaumetopoea pityocampa* للتعرف على سلوكها وكيفية تكاثرها في الطبيعة قمنا بدراسة عدة جوانب من مراحل حياتها. قمنا أولاً بدراسة ميدانية مباشرة في الطبيعة وأكملناها بأخرى في المخابر.

في المخابر كان كل اهتمامنا منصب على قياس الأوزان والأطوال لكل مراحل الحشرة من بيضة إلى يرقة إلى شرنقة حتى تصبح فراشة بالغة كما أتبعنا هذه الدراسة بأخرى تعنى بالتعرف على جنس الفراشة البالغة وبكل الطفيليات التي تعيش معها منذ أن تكون بيضة إلى يرقة ثم شرنقة حتى تصبح بالغة.

تم إجراء كل هاته التجارب في أربعة مواقع مختلفة لولاية عين الدفلى. تم اختيار جبل دوي في قلب بلدية عين الدفلى كأول موقع للتجارب وهو غابة طبيعية مثله مثل جبل تمولقا وهو الآخر غابة طبيعية اختير هذان الموقعان للدراسة على أساس أنهما غابتان طبيعيتان أما الموقعان الباقيان فهما عبارة عن تشجير قامت به مصالح الغابات للولاية وكانا في غابة بابور وتمولقا على الترتيب.

قياسات الأطوال لأعشاش الحشرة والمبيض تتغير على حسب عدد اليرقات. تبني اليرقات أعشاشها في عدة أماكن مختلفة من الشجرة كما تضع الفراشات البالغة بيوضها في أماكن مختلفة وفي كل الاتجاهات تكون اليرقات والفراشات الإناث أكبر حجماً من الذكور كما تعتبر هاتان الطفيليتان أكثر تواجداً في مراحل الشرنقة واليرقة والبيضة ; *Phryxe caudata*

Ooencyrtus pityocampae

في الجزء الثاني من الرسالة، جربنا المكافحة البيولوجية من خلال استخدام مستخلصات نباتية عطرية (زيوت عطرية) وفي نفس الوقت قمنا بتركيب مصائد فرمون للتحكم في عدد الذكور

أظهرت الاختبارات الحيوية التلامسية لليرقات باستعمال زيت الزعتر نتائج إيجابية أدت لقتل كل اليرقات في المخبر. أما بالنسبة للتجارب في الطبيعة فإن زيت الزعتر احتفظ بنفس فعاليته ضد اليرقات في المرحلة "3L" و"5L".

نفس النتائج وجدناها باستعمال زيت الخزامة في المرحلة "3L" من حياة اليرقة في المخبر مع نفس الفعالية قليلاً في الطبيعة. بالنسبة للمرحلة "5L" فإن زيت الخزامة فقد الكثير من فعاليته ضد اليرقات في المخبر وفي الطبيعة.

من الناحية النسيجية، تسببت الزيوت الأساسية في حدوث نخر تلاح تنكس واضمحلال في الخلايا المعوية لليرقات، بالإضافة إلى تدمير عام للشعر وغطاء جلد اليرقات.

يسمح لنا تركيب مصائد الفرمون بمراقبة هذه الآفة مبكراً والتحكم في الفراشات الناضجة. بدأ ظهور ذكور الفراشات خلال شهر أوت، حيث كان متوسط فترات الطيران من 49 إلى 55 يوماً.

سمحت لنا التحليلات الكيميائية التي تم الحصول عليها بواسطة جهاز كروماتوغرافيا بالتعرف على عدد وكمية المركبات للزيوت الطبيعية المستعملة في هاته الدراسة. يحتوي الزعتر على خمسة وثلاثين مركباً أكبرها الكرفاكول ب"71%" أما الخزامة فتحتوي على ستة وثلاثين مركباً أكثر مركب كميائي في الخزامة هو اللينالول ب"37%".

الكلمات المفتاحية: البيئة الحيوية، الدودة الجرارة، الوسط الغابي، ولاية عين الدفلى والمكافحة البيولوجية،

Thaumetopoea pityocampa

Étude de la bio-écologie de la chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* dans différents milieux forestiers à Ain Defla et essai de lutte.

Résumé

Le présent travail traite plusieurs aspects, nous avons opté en premier lieu pour la réalisation d'une étude *in vivo* de quelques paramètres bioécologiques de la chenille processionnaire dans son environnement. Dans l'étude *in vitro*, nous sommes intéressés, dans l'ordre, à la morphométrie des manchons, des chrysalides et des imagos avec identification des sexes des adultes papillons de la chenille. De même nous avons procédé à l'identification des parasites lors des stades chrysalide, imago et ponte. Cette étude a eu lieu dans quatre stations différentes, deux forêts naturelles et deux reboisements.

La biométrie des nids des chenilles et des manchons varie selon le nombre de chenilles coexistantes. Les chenilles ainsi que les imagos, positionnent leurs nids et leurs manchons dans toutes les directions avec des hauteurs variables selon la biomasse et l'ensoleillement de l'habitat. La biométrie des chenilles, des chrysalides et des adultes, montre que les chenilles femelles sont plus lourdes et plus longues que les mâles. Le parasite le plus identifié aux stades chenille et chrysalide est *Phryxe caudata*, quant à *Ooencyrtus pityocampae* il parasite les manchons.

Dans le deuxième volet de la thèse, nous avons expérimenté la lutte biologique par l'utilisation d'extraits de plantes aromatiques (huiles essentielles). Les essais biologiques par contact de *T. vulgaris* contre les larves de *Thaumetopoea pityocampa* ont montré une corrélation positive *in vitro* entre les doses utilisées (0,005 à 0,04 ml) et les taux de mortalité enregistrés (40,97 à 100%), ainsi qu'*in vivo* entre les doses appliquées (0,1 à 0,5 ml) et les taux de mortalité oscillant entre 53,85 et 100% au stade L3. En outre, cet effet biocide est maintenu à un stade larvaire plus avancé (L5) avec des pourcentages de mortalité variant de 36,11 à 100% à des doses de 0,02 à 0,1 ml *in vitro* et entre 33,96 et 100% de mortalité avec des doses de 0,3 à 1,2 ml *in vivo*. Cette efficacité est aussi intéressante pour *L. angustifolia* au stade L3 *in vitro*, avec une moyenne de mortalité qui varie entre 29,86 et 100%, mais avec des doses plus élevées de 0,01 et 0,05 ml comparativement à *T. vulgaris*. *In vivo*, la mortalité enregistrée est de 73,35% à la dose 1 ml. Au stade L5, *L. angustifolia* perd significativement son incidence biocide, notamment *in vivo*, où le meilleur taux létal enregistré est de 37,08% avec une dose de 1,5 ml, et *in vitro* avec 65,97% de mortalité à une dose de 0,12 ml.

Histologiquement, les huiles essentielles ont entraîné une nécrose suivie d'une dégénération des cellules intestinales des chenilles, ainsi qu'une destruction générale des poils et du revêtement cutané des larves.

Nous sommes intéressés à l'identification des composés des huiles essentielles des plantes utilisées par le biais de la technique CG-MS. Les analyses chimiques obtenus par CG-MS des huiles essentielles de *T. vulgaris* nous ont permis d'identifier 35 composés chimiques, le carvacrol (71%) étant le composé le plus dominant, alors que pour *L. angustifolia*, 36 composés sont identifiés avec deux chémotypes le linalol (37%) et linalol acétate (25%).

Mots clés : bio-écologie, chenille processionnaire, pin d'Alep, *Thaumetopoea pityocampa*, milieux forestiers, Ain Defla, lutte.

Study of the bio-ecology of pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* in different forest environments in Ain Defla and biological control tests.

Abstract

Our present work addresses several aspects, first we opted for the realisation of an in vivo study of some bio-ecological parameters of the processionary caterpillar in its environment. At the same time, in the in vitro study, we are interested, in order, in the morphometry of the sleeves, chrysalises and imagos with gender identification of adult caterpillar moths. Similarly, we proceeded to the identification of parasites during the chrysalis, imago and egg-laying stages. This study was conducted in four different stations, two natural forest and two reforestations.

The biometrics of caterpillar nests and sleeves vary according to the number of coexisting caterpillars. The caterpillars, as well as the imagos, position their nests and their sleeves in all directions with variable heights according to the biomass and the sunshine of the habitat. The Biometrics of caterpillars, chrysalises and adults show that female caterpillars are heavier and longer than males. The most identified parasite at the caterpillar and chrysalis stages is *Phryxe caudata*, while *Ooencyrtus pityocampae* parasitizes the sleeves.

In the second part of the thesis, we experimented with biological control by using extracts from aromatic plants (essential oils). The biological tests by contact of *T. vulgaris* against the larvae of *Thaumetopoea pityocampa* showed a positive correlation in vitro between the doses used (0.005 to 0.04 ml) and the mortality rates recorded (40.97 to 100%) as well as in vivo between the doses applied (0.1 to 0.5 ml) and mortality rates oscillating between 53.85 and 100% at stage L3. In addition, this biocide effect is maintained at a more advanced larval stage (L5) with mortality rates ranging from 36.11 to 100% at doses of 0.02 to 0.1 ml in vitro, and between 33.96 and 100% mortality with doses of 0.3 to 1.2 ml in vivo. This efficiency is important to that of *L. angustifolia* at the L3 stage in vitro, with an average mortality that varies between 29.86 and 100%, but with higher doses of 0.01 and 0.05 ml compared to *T. vulgaris*. Moreover, the mortality recorded in vivo is 73.35% at a dose of 1 ml. At stage L5, *L. angustifolia* significantly loses its biocidal impact, particularly in vivo, where the best lethal rate recorded is 37.08% with a dose of 1.5 ml, and in vitro with 65.97% mortality at a dose of 0.12 ml.

Histologically, essential oils have resulted in a necrosis followed by a degeneration of the intestinal cells of the caterpillars, as well as a general destruction of the hairs and the larvae skin coating.

We are interested in identifying plant essential oil compounds used through the CG-MS technique. The chemical analysis obtained by CG-MS of the essential oils of *T. vulgaris* allowed us to identify 35 chemical compounds, carvacrol (71%) being the most dominant compound, while for *L. angustifolia*, 36 compounds are identified with two chemotypes linalol (37%) and linalool acetate (25%).

Key words: bio-ecology, Processionary Caterpillar, Aleppo pine, *Thaumetopoea pityocampa*, forest backgrounds, Ain Defla, biological control.



Chemical composition and larvicidal activities in vitro and in vivo of essential oils of *Thymus vulgaris* (L) and *Lavandula angustifolia* (Mill) against pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schiff. in Ain Defla (Algeria)

Khalid Zahed^{1,2} · Karim Souttou^{1,2} · Feroudja Hamza³ · Mouhamed Zamoum⁴

Received: 24 December 2019 / Accepted: 24 September 2020
© Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft 2020

Abstract

Biological tests with *Thymus vulgaris* against both third and fifth instar larvae of *Thaumetopoea pityocampa* showed positive correlation between the used doses and mortality after 24 h of application. Treatment against third instars larvae with doses 0.005–0.04 ml L⁻¹ gave 40.97–100% mortalities in vitro condition, and treatment with doses 0.1–0.5 ml L⁻¹ gave 53.85 and 100% mortalities in vivo condition. In addition, similar effect of this natural insecticide is observed against fifth instars larvae with mortality rate varying between 36.11 and 100% at doses of 0.02–0.1 ml in vitro and between 33.96 and 100% mortality with doses of 0.3–1.2 ml in vivo. Bioassay with *Lavandula angustifolia* against third instar larvae in vitro condition showed between 29.86 and 100% mortality rate, but with high doses between 0.01 and 0.05 ml L⁻¹ compared to *T. vulgaris*. Furthermore, the mortality recorded in vivo is 73.35% with dose of 1 ml L⁻¹. Whereas the essential oil of *L. angustifolia* is the least toxic against fifth instar larvae of *Thaumetopoea pityocampa* with 37.08% at a dose of 1.5 ml L⁻¹ in vivo and 65.97% mortality at a dose of 0.12 ml L⁻¹ in vitro. Histologically, the effect of these essential oils has resulted in a necrosis and degeneration of the intestinal cells, as well as a general destruction of the hair and skin of treated larvae compared to untreated caterpillars. In accordance with these results, it would be possible to use essential oil of *T. vulgaris* as an effective biological alternative against the larvae of *T. pityocampa*. The chemical analyses obtained by GC–MS of *T. vulgaris* essential oil enabled us to identify 35 chemical compounds of which Carvacrol (71%) is the most dominant, whereas for *L. angustifolia* there are 36 chemical compounds of which we have identified two dominant chemical compounds, Linalol (37%) and Linalool acetate (25%).

Keywords Insecticidal activity · *Thaumetopoea pityocampa* · *Lavandula angustifolia* · *Thymus vulgaris* · Histological effect · Essential oils

✉ Karim Souttou
kasouttou@yahoo.fr

¹ Faculty of Natural Science and Life, University of Djelfa, Moudjbara Road, BP 3117, 17000 Djelfa, Algeria

² Exploration and Valorization of Steppe Ecosystems Research Laboratory (EVES), Djelfa, Algeria

³ Laboratory of Histological Analysis, Department of Pathological Anatomy, Parnet Hospital, Hussein Dey, Algeria

⁴ National Forest Research Institute, Forest Entomology Laboratory, BP 37, 16000 Chéraga, Algeria

Introduction

In Algeria, the forests plants are extremely important in the life of people and other animals as they provide basic needs such as hunting, food, reproducing, clothing, shelter and health care. Among them *Pinus halepensis* is one of the economically important plants. Forests represent an area of 1.604.466 ha, the predominant species being Aleppo Pine, nearly 63% (ONS 2015). The forest area of Ain Defla is estimated at 132.709.40 ha. The distribution by species indicates a predominance of Aleppo Pine, i.e., 48.020 ha (36.19%).

In Mediterranean regions, the pine processionary caterpillar, *T. pityocampa* (Denis & Schiffermüller, 1775),

causes severe damage to Aleppo Pine (Démolin and Delmas 1967; Zamoum 1998). Global warming has extended its range to higher latitudes and altitudes (Battisti et al. 2005; Robinet et al. 2007; Toffolo 2008). The southern limit of its extension in Algeria is the green dam (Zamoum et al. 1998). The invasion of the caterpillar can cause 20–80% of defoliation rate (Markalas 1998; Barrento et al. 2008; Pestaña and Santolamazza-Carbone 2010).

In Algeria, several studies have focused on the processionary caterpillar which is ranked as the first natural depredator of Algerian forests. Among these studies, we mention those of Khemici et al. (1988), Zamoum (1998), Zamoum et al. (2005, 2006) and Chenchouni et al. (2010) who worked on bio-ecological factors and the life cycle of the processionary caterpillar. Other studies realized by Zamoum et al. (1997, 1999, 2016) and Zamoum and Démolin (2003, 2004) are focused on the mechanisms of regulating populations of the processionary caterpillar and the methods of control to be implemented against this pest of Aleppo Pine. The same authors have worked on other approaches that were made to some parasitoids and natural enemies of the processionary caterpillar of Aleppo Pine (Zamoum 1992).

Several methods can be integrated for better operational efficiency of the ecological fights against the caterpillar; the use of bio-insecticides corresponds to an environmental necessity (Hernandez-Ochoa 2005). It is fundamental to find other natural molecules to counter the development of bio-resistance to natural pesticide; the most commonly used being made of *Bacillus thuringiensis*. It should be remembered that at least 504 species have developed resistance against one or more chemical components (Georghiou 1990; Georghiou and Lagunes-Tejeda 1991).

Among the plants used to control various insect pests, we mention the family of lamiaceae; it reveals good insecticidal activity (Regnault-Roger and Hamraoui 1993, Peterson et al. 2002; Clemente et al. 2003; Ebadollahi et al. 2010).

Essential oil of the *Thymus* species have shown their antimicrobial and anti-inflammatory activities (Miura et al. 2002; Guillen and Manzanos 1998), and strong insecticidal activity against various insects, such as *Aedes albopictus* (Park et al. 2012), *Aedes aegypti* (De La Torre Rodriguez et al. 2013), *Tribolium castaneum* and *Callosobruchus maculatus* (Moharrampour et al. 2008), *Sitophilus oryzae* (Saroukolai et al. 2009) and *Culex pipiens* (El Akhal et al. 2015). Bachir et al. (2017) tested the efficacy of *Melia*

azedarach, *Juniperus oxycedrus* and *Juniperus phoenicea* extracts against the processionary caterpillar in Algeria.

This study aims to evaluate toxic activities of essential oils obtained from two plants belonging to the family of Lamiaceae *Thymus vulgaris* (Linné, 1753) and *Lavandula angustifolia* (Miller, 1768) against third and fifth larval stage of processionary caterpillar of Aleppo Pine in vivo and in vitro conditions.

Materials and methods

Description of the studied area

The study was conducted in the Rouina area (36° 14' N, 1° 48' E), in the forest of Babor. The study area was 256 m a.s.l., with a relatively flat and featureless soil. It covers a reforested area of 1.217 ha and consists mainly of Thuja (500 ha) and Aleppo Pine (100 ha). The latter is a former reforestation dating back to the eighties. It is limited to the North, East and South by agricultural land, to the West by Oulad Mellouk (36° 12' N, 1° 50' E) and agricultural land, benefiting from very high humidity, because of its immediate vicinity to the green dam and is characterized by fertile agricultural soils. The height of its trees varies between 5 and 10 m, with a density of 200 trees/ha.

The study area has a semi-arid Mediterranean climate with a strong continental feature and a temperature difference of 20 °C between the temperatures of January and August. The summer lasts about 5–6 months with hot air masses starting from May.

Choice of plant material

The leaves and flowers of *T. vulgaris* and *L. angustifolia*, used in this study, were collected in the region of Arib (36° 19', 2° 03' E) and Mekhatria (36° 20', 1° 57' E) in Algeria (Table 1). They are plants that grow spontaneously and very abundant in the surrounding countryside. These two plants were identified in the Botany Department at El Harrach National School of Agronomy.

Entomological material

The third and fifth instar larvae of *T. pityocampa* were collected between November and March 2018 from infected *P.*

Table 1 Presentation of the aromatic plants tested

Plant species	Botanical family	Harvest location	GPS coordinates (location)	Harvest date	Extraction output(%)
<i>T. vulgaris</i>	Lamiaceae	Mekhatria	36° 20' N, 1° 57' E	July 2018	2.64
<i>L. angustifolia</i>	Lamiaceae	Arib	36° 19' N, 2° 03' E	July 2018	1.50

halepensis in the forest area (Ghabat Babour) in Ain Defla region of Algeria. The difference between both instar larvae can be differed by their size and their cephalic capsule.

Method of extraction of the essential oils

Leaves and flowers of *T. vulgaris* and *L. angustifolia* were collected from Ain Defla. The extraction is carried out with a Clevenger-type apparatus (Clevenger 1928). Hydro-distillation consists in immersing 50 g of the leaves and flowers dried in the shade, in 500 ml of distilled water for 2 h. Following the essential oil being obtained, the oil was decanted from the water layer, dried through Na_2SO_4 application, and stored in sealed vials at 4 °C before the tests being done.

Bioassays to control *T. pityocampa*

The organic solvent used in this study is ethanol. Ethanol (control) went through a series of dilutions until it reached a dose that has no influence on caterpillars. The percentage of ethanol selected for the field test (in vivo) is 15% against third instar larvae and 25% against fifth instar larvae; for the laboratory test (in vitro), 10% was selected against both instar larvae.

In vitro test In the laboratory, we tested two essential oils on the larvae of third and fifth instar larvae. We followed the treatment protocol adopted by Kanat and Alma (2003). The collected caterpillars are exposed to two essential oils at different concentrations. We put 50 caterpillars in a Petri dish with 20 cm in diameter. After that, we sprayed the prepared solution directly on the third and fifth instar larvae of the *T. pityocampa*. We put 40 needles (leaves) of Aleppo pine after treatments in the Petri dishes in order to feed the surviving caterpillars (Kesdek et al. 2014). The monitoring of caterpillar mortality was conducted after five consecutive days of treatment. Three replicates were used for each dose and exposure time combination and larvicidal activity of the plant extracts were expressed as % mean mortality of the larvae.

The essential oil of *T. vulgaris* was serially diluted with ethanol (96%) to prepare test solutions of 0.005 ml L⁻¹, 0.01 ml L⁻¹, 0.02 ml L⁻¹, 0.03 ml L⁻¹ and 0.04 ml L⁻¹ against third instar larvae. The five following doses, 0.02 ml L⁻¹, 0.04 ml L⁻¹, 0.06 ml L⁻¹, 0.08 ml L⁻¹ and 0.1 ml L⁻¹ were used against fifth instar larvae. The essential oil of *L. angustifolia* was dissolved in 96% ethanol and used at six concentrations, 0.01 ml L⁻¹, 0.02 ml L⁻¹, 0.03 ml L⁻¹, 0.04 ml L⁻¹, 0.05 ml L⁻¹ and 0.06 ml L⁻¹ against third instar larvae. The five following doses, 0.04 ml L⁻¹, 0.06 ml L⁻¹, 0.08 ml L⁻¹, 0.1 ml L⁻¹ and 0.12 ml L⁻¹, were used against fifth instar larvae.

In vivo test Field trials in a pine forest were undertaken. We applied these treatments directly on winter nests of *T.*

pityocampa. We prepared five different concentrations of essential oils, selected after a preliminary test. For that purpose, we selected the following doses of 0.1 ml L⁻¹, 0.2 ml L⁻¹, 0.3 ml L⁻¹, 0.4 ml L⁻¹ and 0.5 ml L⁻¹ of essential oils extracted from *T. vulgaris* against third instar larvae. However, we used the following doses of 0.3 ml, 0.6 ml, 0.9 ml, 1.2 ml and 1.5 ml against fifth instar larvae. Otherwise, we used the different doses (0.2 ml L⁻¹, 0.4 ml L⁻¹, 0.6 ml L⁻¹, 0.8 ml L⁻¹, 1.0 ml L⁻¹) of essential oils extracted from *L. angustifolia* against third instar larvae. Then, against fifth instar larvae, we applied the, respectively, doses 0.3 ml L⁻¹, 0.6 ml L⁻¹, 0.9 ml L⁻¹, 1.2 ml L⁻¹ and 1.5 ml L⁻¹.

The previous oil concentrations were diluted with ethanol to reach a volume of 10 ml, which was put in a sprayer with a capacity of 20 ml. On each treated tree, we chose a single nest, randomly oriented, to apply the spray while making sure to isolate it. Direct spraying was applied to the nests with care to make sure they were well treated. The spraying was done in the morning. The height of the treated nests varied between 1.5 and 2 m. After 7 days, all the nests were opened and the number of animals dead, lethargic, still active were noted. These results will be analyzed comparing with those observed before spraying.

Effect of oils on the histology of the insect

The histological study was performed according to the method adopted by Ruiz et al. (2004) and Ben Khedher et al. (2017). The larvae treated with essential oil were fixed in formalin 10% and stored at 4 °C, these samples are then dehydrated with ethanol, washed in 100% toluene before being coated with paraffin to obtain fine sections using a microtome; the sections are deparaffinized using toluene 100% with hematoxylineosin.

The histological sections of the treated caterpillars are compared with those of healthy controls. The cuts thus obtained are observed and photographed using a microscope (Leica) with integrated camera.

Chemical analysis of essential oils

The components of the essential oil extracted from *T. vulgaris* and *L. angustifolia* were quantified by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) using the GC-type of Hewlett-Packard Agilent (series HP6890), equipped with a MS (HP 5973). A HP-5MS capillary column (30 m × internal diameter of 0.25 mm coated with 5% phenyl methyl silicone and 95% dimethyl polysiloxane, 0.25 mm film thickness).

The conditions of the column are as follows: Helium at 0.5 ml/min. The oven temperature was programmed from 60 °C for 8 min and then increased to 250 °C/min at rate of 2 °C/min, then held isothermal for 10 min; duration of

analysis (113 min), injector temperature (250 °C), split ratio (50:1), with injection of 0.2 µl of oil, ion source temperature (230 °C). The GC/mass spectrometry (MS) analysis was performed with a Quadrupole mass spectrometer, ionization potential (70e V), and total ion current (30–550 amu). The components of *T. vulgaris* and *L. angustifolia* oils were evaluated by linear Kovats indices (KI), their retention times, and mass spectra and were identified by comparison with a spectrum library—NIST2 a WILEY7 and with mass spectral literature (Adams 2001).

Data analysis

The results of larval susceptibility tests were expressed as a percentage of mortality depending on the concentrations of essential oil used. If the percentage of mortality in controls is greater than 5%, then the percentage of mortality in larvae exposed to the essential oil should be corrected using Abbot's formula (Abbott 1925):

$$CM = \frac{OM - MT}{100 - MT} \times 100$$

CM: corrected mortality rate, MT: mortality rate observed in controls, OM: observed mortality.

If the mortality in the controls exceeds 20%, then the test is invalid and must be repeated. For data entry and statistical processing, we used SPSS 17.0 analysis software. Differences in contact toxicity of oil extracts of two plants were determined according to the analysis of variance test (Anova). The results were reported as significant for $p < 0.01$.

To evaluate the effectiveness of the toxicity of essential oils, the lethal concentration (LC) for each plant species was calculated. The LC10, LC50 and LC90 values were obtained through probit analysis. The doses and mortality rates were

converted to logarithms and probit using the probit table (Finney 1971).

Results

Larvicidal activity of two essential oils on larvae (L3 and L5) of pine processionary moth in vitro (in laboratory)

Essential oils extracted from the two plants *T. vulgaris* and *L. angustifolia* showed insecticidal activity at all concentrations applied against the third instar larvae (L3) and fifth instar larvae (L5). Different doses were used, with differences highly significant between doses of the essential oils of both plants (Table 2).

As shown in Tables 3 and 4, the effect of plant essential oils on the caterpillars is dose-related. For example, the essential oil of *T. vulgaris* at, 0.02, 0.03 and 0.04 ml L⁻¹ produced 78.91, 91.67 and 100% mortality, respectively, against L3 caterpillars (Table 3, Fig. 1). Here again, the essential oil of *T. vulgaris* at, 0.06, 0.08 and 0.1 ml L⁻¹ caused 70.84, 84.03 and 100% mortality, respectively, against fifth instar larvae (Table 4, Fig. 2). However, the essential oil of *L. angustifolia* at, 0.04, 0.05 and 0.06 ml L⁻¹ caused, respectively, 81%, 92% and 100% mortality against third instar larvae (Table 3, Fig. 3). On the other hand, in larvae of stage L5, the essential oil of *L. angustifolia* caused maximum mortality of 66% for a maximum dose of 0.12 ml L⁻¹ (Table 4, Fig. 4).

The most potent of the two plants tested against third instar larvae was *T. vulgaris* with an LC50 of 0.01 ml L⁻¹, while the least potent of the two plants tested was *L. angustifolia* with an LC50 of 0.03 ml L⁻¹. Similarly, in larvae of stage L5, *T. vulgaris* remains the most potent plant with a LC50 of 0.05 ml L⁻¹, whereas the least potent was

Table 2 Analysis of variance on the effect of the essential oils of two plants *T. vulgaris* and *L. angustifolia* against larvae of the pine processionary caterpillar in the laboratory

Larval stage	Essential oil	Source	ddl	Average squares	F	
Larva 3	<i>Thymus vulgaris</i>	Dose	4	369.90	118.05***	
		Error	10	3.13		
		Total	14			
	<i>Lavandula angustifolia</i>	Dose	5	531.52		298.98***
		Error	12	1.77		
		Total	17			
Larva 5	<i>Thymus vulgaris</i>	Dose	4	420.50	143.35***	
		Error	10	2.93		
		Total	14			
	<i>Lavandula angustifolia</i>	Dose	4	283.83		67.57***
		Error	10	4.20		
		Total	14			

***: Very highly significant ($p < 0.0001$)

Table 3 Effect of different concentrations of essential oils of two plants Thyme and Lavender against third instar larvae of the pine processionary caterpillar in the Laboratory

Dose (ml L ⁻¹)	Average Mortality (%)	
	<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Lavandula angustifolia</i>
	Larvae 3	Larvae 3
0.005	40.97	–
0.01	66.67	29.86
0.02	78.47	43.75
0.03	91.67	64.58
0.04	100	81.25
0.05	–	92.36
0.06	–	100
LC10	0.005	0.01
LC50	0.013	0.031
LC90	0.031	0.049
Equation	$Y=4.3+2x$	$Y=5.21+2.86x$
ddl	2	3
χ^2	3.71	1.92

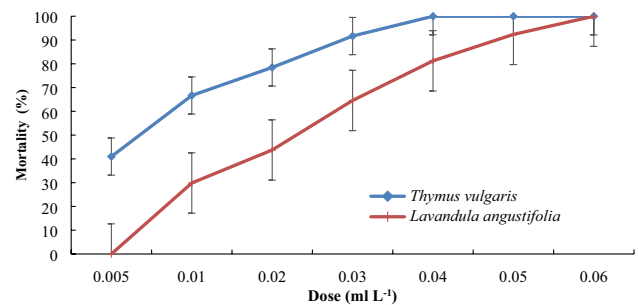
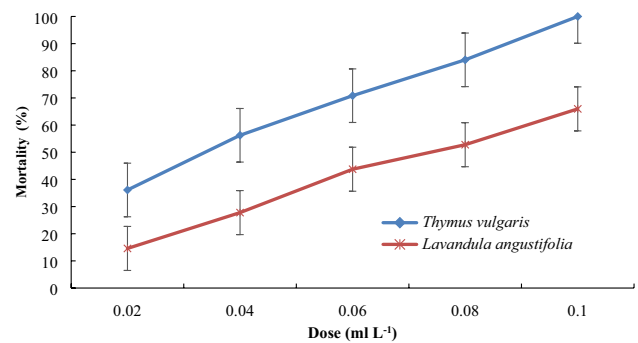
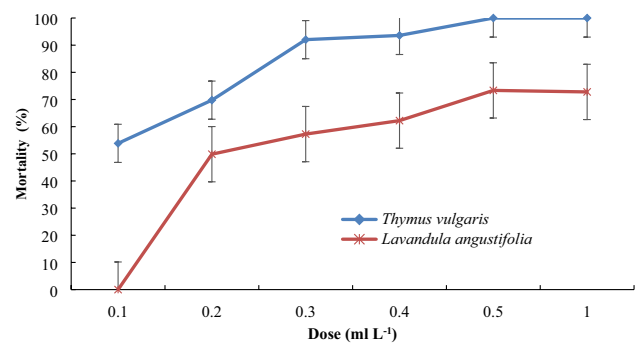
The estimated lethal concentration values (ml L⁻¹) for each essential oil were given using probit analysis

Table 4 Effect of different concentrations of essential oils of two plants Thyme and Lavender against fifth instar larvae of the pine processionary caterpillar in the Laboratory

Dose (ml L ⁻¹)	Average mortality (%)	
	<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Lavandula angustifolia</i>
	Larvae 5	Larvae 5
0.02	36.11	–
0.04	56.25	14.58
0.06	70.83	27.78
0.08	84.03	43.75
0.1	100	52.78
0.12	–	65.97
LC10	0.035	0.042
LC50	0.056	0.097
LC90	0.091	0.225
Equation	$Y=3.34+2.14x$	$Y=3.2+3x$
ddl	2	2
χ^2	4.39	0.14

The estimated lethal concentration values (ml L⁻¹) for each essential oil were given using probit analysis

L. angustifolia with an LC50 of 0.09 ml L⁻¹. The data for LC10, LC50 and LC90 of the two plants tested against caterpillars of *T. pityocampa* are presented in Tables 3 and 4.

**Fig. 1** Mortality percentage of L3 pine processionary moth after exposure to the essential oils of two plants in the laboratory**Fig. 2** Mortality percentage of L5 pine processionary moth after exposure to the essential oils of two plants in the laboratory**Fig. 3** Mortality percentage of L3 pine processionary moth after exposure to the essential oils of two plants in the field

Larvicidal activity of two essential oils on larvae (L3 and L5) of pine processionary moth in vivo (in the field)

In vivo tests show that essential oils extracted from the two plants *T. vulgaris* and *L. angustifolia* were toxic to third (L3) and fifth (L5) instar larvae. Different doses were used with differences highly significant between doses of the essential oils of both plants (Table 5).

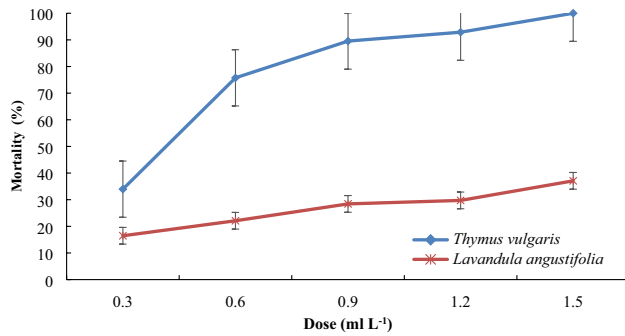


Fig. 4 Mortality percentage of L5 pine processionary moth after exposure to the essential oils of two plants in the field

As shown in Tables 6 and 7, the effect of essential oils of plants on caterpillars is dose-related. For example, the essential oil of *T. vulgaris* at 0.2, 0.4 and 0.5 ml L⁻¹ conducted 69%, 93% and 100% mortality, respectively, against third instar larvae (Table 6). Here again, the essential oil of *T. vulgaris* at 0.9, 1.2 and 1.5 ml L⁻¹ caused, respectively, 89%, 92% and 100% mortality against fifth instar larvae (Table 7). However, the essential oil of *L. angustifolia* at 0.6, 0.8 and 0.1 caused 62%, 73% and 79% mortality, respectively, against third instar larvae (Table 6). On the other hand, in larvae of stage L5, the essential oil of this plant caused a maximum mortality of 37% for a maximum dose of 1.5 ml L⁻¹ (Table 7).

The most potent of the two tested plants against L3 caterpillars was *T. vulgaris* with an LC50 of 0.22 ml L⁻¹, whilst the least potent of the two tested plants was *L. angustifolia* with an LC50 of 0.92 ml L⁻¹. Similarly, in larvae of stage L5, *T. vulgaris* was the most potent plant with an LC50 of 0.43 ml L⁻¹, however the least potent was *L. angustifolia* with an LC50 of 3.77 ml L⁻¹. Data

regarding LC10, LC50 and LC90 of all two tested plants against *T. pityocampa* are presented in Tables 6 and 7.

Effect of essential oils on the tissues of the pine processionary

Histological sections of the intestinal tract and skin covering of treated L5 larvae show that the essential oils of *T. vulgaris* and *L. angustifolia* caused substantial histological abnormalities. Microscopic examination in our study shows cellular alterations like degenerative lesions and foci of cell necrosis in the intestinal tract (Figs. 6 and 7) and skin covering (Fig. 5).

The structures of the control larvae show a regular and normal intestinal tract (Figs. 6 and 7) and skin covering (Fig. 5); the cytoplasm is clear and surrounded by a normal basal adhesive membrane.

Chemical composition of essential oils

The average yield of *T. vulgaris* essential oil is 2.64% and 1.5% for *L. angustifolia*. Chromatographic analyses of the oils made it possible to identify 35 compounds representing about 98.84% for *T. vulgaris* (Table 8, Fig. 8) and 36 compounds of *L. angustifolia* representing 98.39% (Table 9, Fig. 9).

The GC–MS analysis of the *T. vulgaris* species from Ain Defla region (Northern Algeria) allowed us to determine 35 compounds. The *T. vulgaris* essential oil profile is characterized by Carvacrol (71.35%) as major compound, followed by other constituents with much lower contents: *p*-Cymene (8.17%), γ -Terpinene (5.48%), Thymol (3.46%), Linalool (1.89%), α -Pinene (1.25%) and α -Terpinene (1.22%). As for the remaining constituents, there were only traces.

The GC–MS analysis of *L. angustifolia* species from Ain Defla region (Northern Algeria) allowed us to identify

Table 5 Analysis of variance on the effect of the essential oils of two plants *T. vulgaris* and *L. angustifolia* against larvae of the pine processionary caterpillar in the field

Larval stage	Essential oil	Source	ddl	Average squares	F
Larva 3	<i>Thymus vulgaris</i>	Dose	4	523.76	15.80***
		Error	10	33.13	
		Total	14		
	<i>Lavandula angustifolia</i>	Dose	5	400.90	8.92**
		Error	12	44.93	
		Total	17		
Larva 5	<i>Thymus vulgaris</i>	Dose	4	1454.90	4.58*
		Error	10	317.33	
		Total	14		
	<i>Lavandula angustifolia</i>	Dose	4	98.50	6.26**
		Error	10	15.73	
		Total	14		

*Significant ($p < 0.01$); **highly significant ($p < 0.001$); ***very highly significant ($p < 0.0001$)

Table 6 Effect of different concentrations of essential oils of two plants Thyme and Lavender against third instar larvae of the pine processionary caterpillar in the field

Dose (ml L ⁻¹)	Average mortality (%)	
	<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Lavandula angustifolia</i>
	Larvae 3	Larvae 3
0.1	53.85	–
0.2	69.76	49.86
0.3	92.04	–
0.4	93.59	57.26
0.5	100.00	–
0.6	–	62.22
0.8	–	73.35
1.0	–	79.31
LC10	0.13	0.22
LC50	0.22	0.92
LC90	0.37	3.72
Equation	$Y=2.28+2.28x$	$Y=0.7+1x$
ddl	2	2
χ^2	3.58	0.59

The estimated lethal concentration values (ml L⁻¹) for each essential oil were given using probit analysis

Table 7 Effect of different concentrations of essential oils of two plants Thyme and Lavender against fifth instar larvae of the pine processionary caterpillar in the field

Dose (ml L ⁻¹)	Average mortality (%)	
	<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Lavandula angustifolia</i>
	Larvae 5	Larvae 5
0.3	33.96	16.46
0.6	75.75	22.09
0.9	89.55	28.42
1.2	92.88	29.73
1.5	100	37.08
LC10	0.20	0.54
LC50	0.43	3.77
LC90	0.93	25.90
Equation	$Y=2.86x+1.21$	$Y=0.87x-0.47$
ddl	2	2
χ^2	3.32	0.26

The estimated lethal concentration values (ml L⁻¹) for each essential oil were given using probit analysis

36 compounds. The *L. angustifolia* essential oil profile is characterized by Linalool (37.92%) and Linalyl acetate (25.94%) as major compounds, accompanied by other constituents with much lower contents: Camphor (6.77%), Eucalyptol (3.93%), Borneol (3.68%), α -Terpineol

(2.43%), Fenchone (1, 81%), Lavandulyl acetate (1.17%). As for the remaining constituents, there were only traces.

Discussion

Larvicidal activity of two essential oils against the third and fifth instar larvae (L3 and L5) of pine processionary moth in vitro and in vivo

It was reported in scientific research that compounds obtained from plants have an insecticidal effect (Pavela 2008; Pavela et al. 2009). It was determined that the extract of *T. vulgaris* has an important larvicidal effect against various insects such as *Anopheles labranchiae*, *Culex quinquefasciatus* and *Acanthoscelides obtectus* (Bouchikhi et al. 2008; Pavela et al. 2009; El Akhal et al. 2016).

In the present study, the treatments carried out on the L3 and L5 larvae revealed that *T. vulgaris* oil caused caterpillar mortality, which reached up to 100% in vitro and in vivo. However, treatments with *L. angustifolia* oil revealed 100% mortality only in the laboratory, while in the field, the maximum mortality rate was 79% against third instar larvae and only 37% against fifth instar larvae.

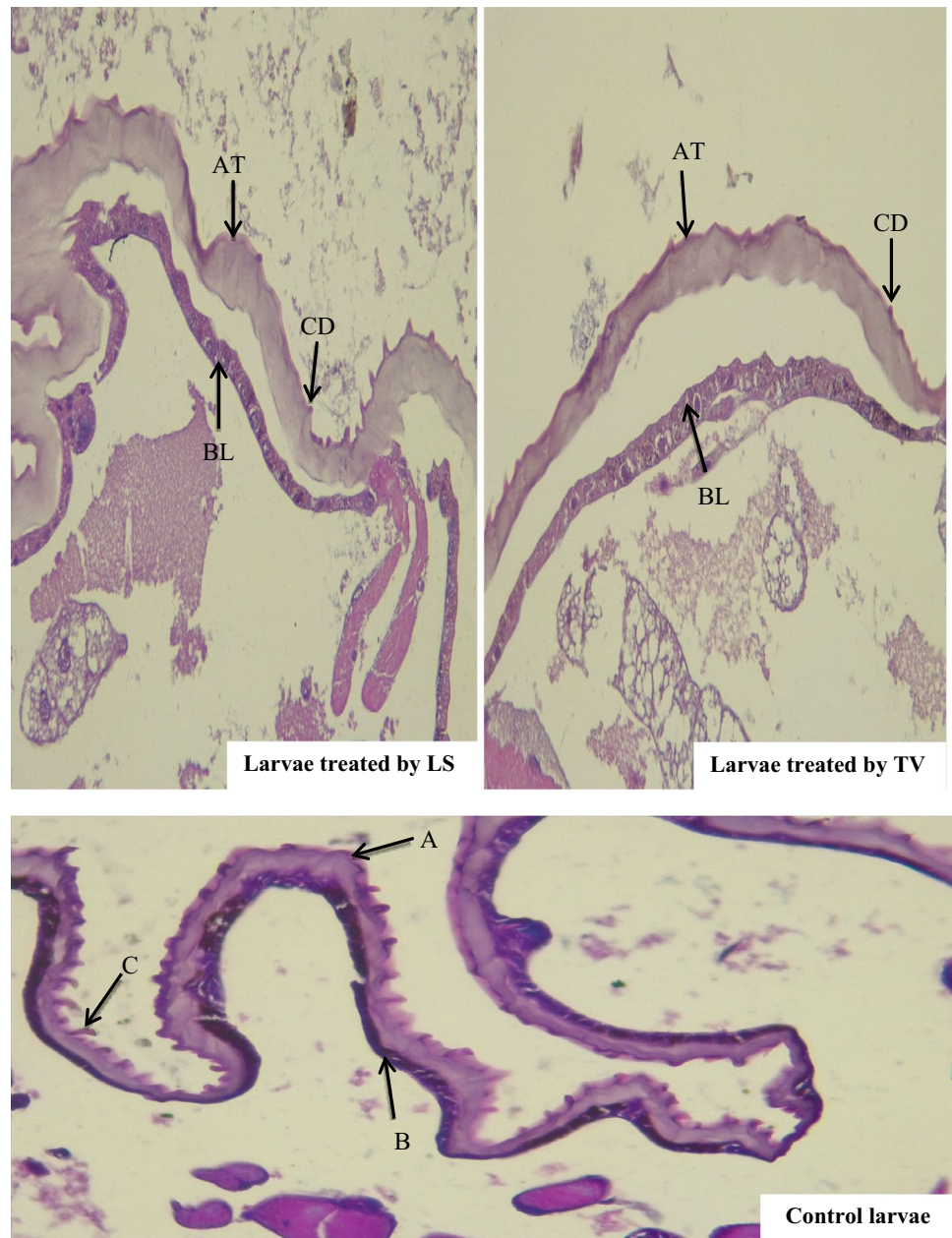
The significant larvicidal activity observed in *T. vulgaris* could be explained by the effect of the main components. The effects of essential oils are due to the combined actions of the main substances that compose them; however, the synergy of several substances may actually be much greater in terms of biological activity (El Akhal et al. 2016).

The LC50 and LC90 (ml) of the essential oil of *T. vulgaris* obtained in our study on *T. pityocampa* larvae (L3 and L5) are highly significant compared to those found in *L. angustifolia*. The high mortality rate (100%) observed against third and fifth instar larvae when using *T. vulgaris* essential oil (in vitro and in vivo) is similar to that reported by Kanat and Alma (2003). These authors have tested the insecticidal activity of nine plants against L4 and L5, with a mortality rate of 100% under different doses of these oils. They found a predominant efficacy of *T. vulgaris* compared to *L. angustifolia*.

These caterpillar mortality rates are similar to those found by Breuer and Devkota (1990), who recorded a mortality rate of 100% using *Melia azedarach*, as a bio-pesticide. Kesdek et al. (2014) noted a mortality rate that fluctuates between 80 and 90% in L2 and L4 of pine processionary caterpillar using extracts of *Achillea wilhelmsii* and *Nepeta meyeri*. Furthermore, Bachir et al. (2017) obtained larval mortality rates from 54.4 to 56.2% using the extracts of *J. phoenicea* and *J. oxycedrus*. These rates are relatively low compared to our results.

Several authors confirmed the effect of essential oil of *Thymus vulgaris* on other insect pests. Ait Taadaouit et al.

Fig. 5 Histological effect of the essential oil of *T. vulgaris* and *L. angustifolia* on the skin of *T. pityocampa*



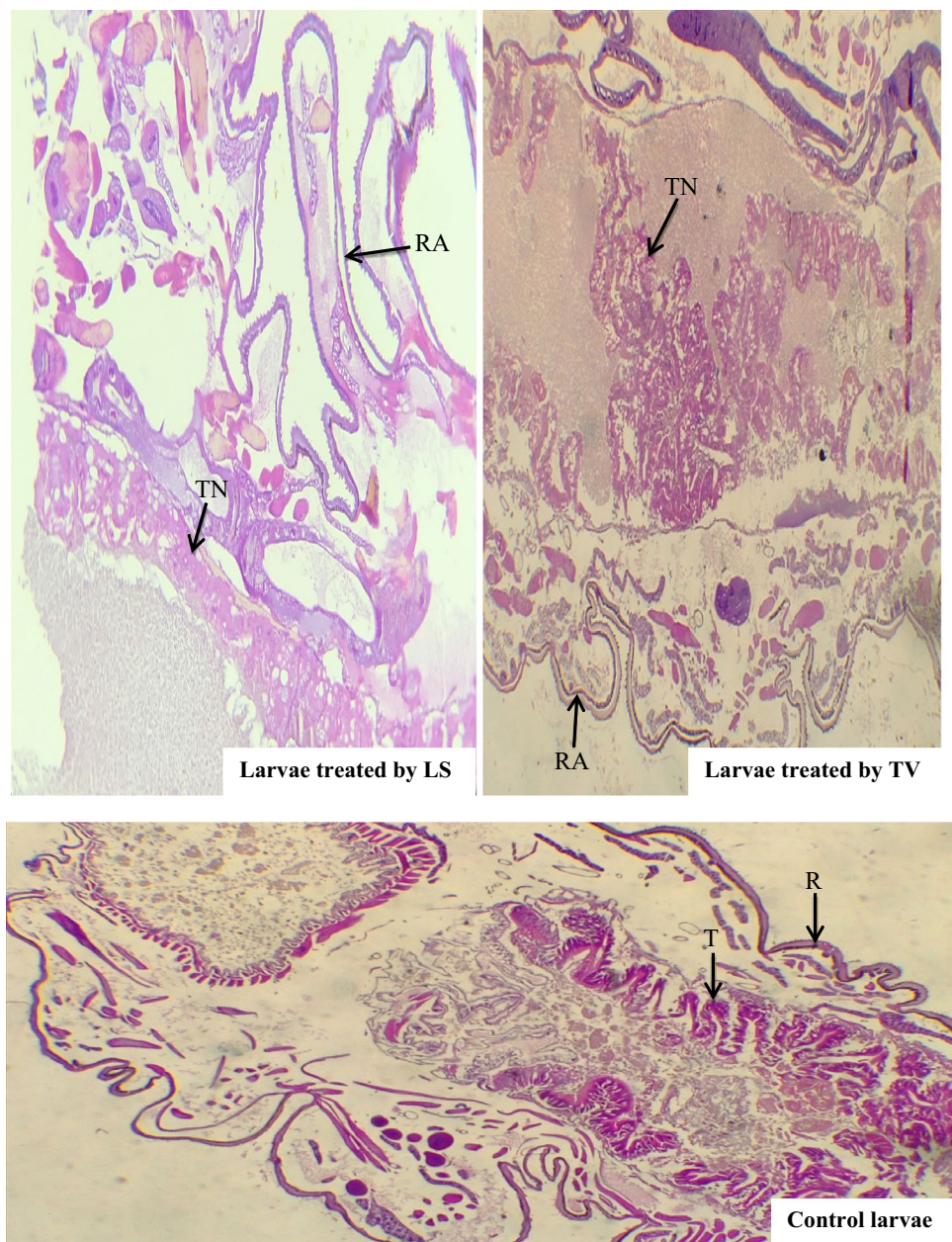
AT: Thickened epicuticle, BL: Epidermal cells lacking blackish granulation (venom)
CD: Destroyed hair, A: Epicuticle, B: Epidermal cells, C: Hair

(2012) recorded a mortality rate between 90 and 97% against *Tuta absoluta* (Lepidoptera), after treatment with *Thymus vulgaris* essential oil. Khosravi and Sendi (2013) recorded a remarkable effect of *T. vulgaris*, characterized by a decrease in pupation. Moreover, Oulebsir-Mohandkaci et al. (2015) report a repellent effect, causing a mortality of *Myzus persicae* (Homoptera) between 63 and 58%.

All these results confirm the effectiveness of the essential oil of *T. vulgaris* as an anti-appetizing and repellent bio-pesticide on several pest species, especially the pine processionary moth.

As for the essential oil of *L. angustifolia*, it is native to Southern Europe and the Mediterranean region (Shaw and Kumar 2000). This plant was tested as a bio-pesticide against *Acanthoscelides obtectus* (Regnault-Roger and Hamraoui 1993), the *Musca domestica* larvae (Bosly 2013), the protozoa *Giardia duodenalis*, *Trichomas vaginalis* and *Hexamita inflata* (Moon et al. 2006). It was also tested as herbicide against *Xanthium strumarium*, *Avena sterilis* and *Phalaris brachystachys* (Uremis 2009) and antibacterial against seven pathogenic microbial strains (*Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Enterobacter cloacae*, *Proteus rettgeri*,

Fig. 6 The histological effect of the essential oil of *T. vulgaris* and *L. angustifolia* on the intestinal tract of *T. pityocampa*



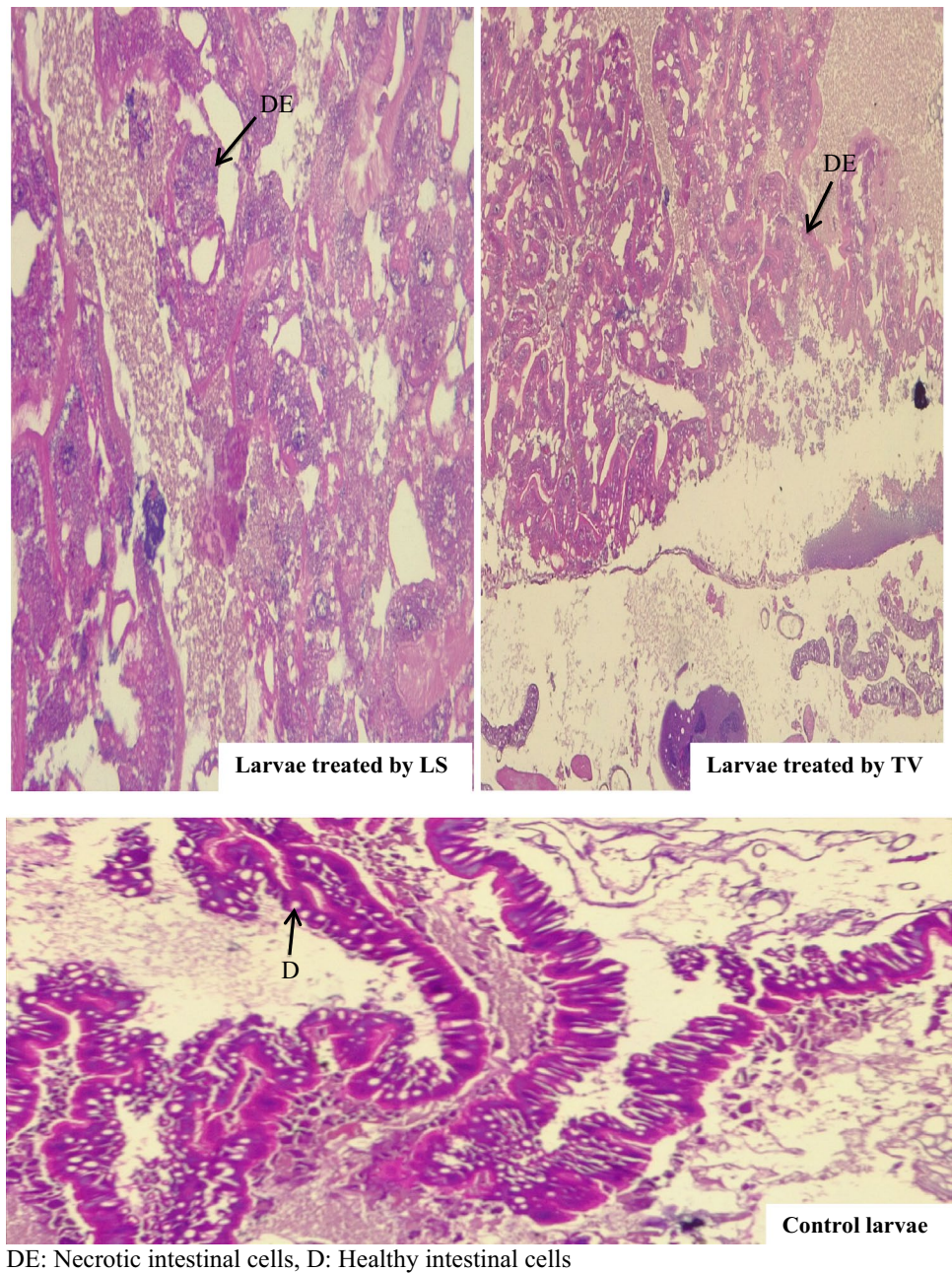
TN: Necrotic Intestinal Tract: necrosis of intestinal cells
 RA: Altered skin: Impaired Epidermal Cells
 T: Intestinal tract, R: skin

Pseudomonas aeruginosa "Gram -" and a bacterial strain "Gram +" *Staphylococcus aureus*) (Chebaibi et al. 2016).

We did not find any other work concerning the larvicidal activity of *L. angustifolia* against *T. pityocampa*, except that of Kanat and Alma (2003). However, the insecticidal activity of *L. angustifolia* oil obtained in vitro against third instar larvae in our study is very significant if we consider that 100% of *T. pityocampa* larvae died due to exposure to 0.06 ml L^{-1} essential oil with $\text{LC}_{50} = 0.03 \text{ ml L}^{-1}$. In vivo, we recorded a mortality rate of 73% at a dose

of 0.12 ml ($\text{LC}_{50} = 0.92 \text{ ml L}^{-1}$), this insecticidal efficacy significantly decreases in stage L5, with a mortality rate of 65% at a dose of 0.12 ml ($\text{LC}_{50} = 0.097 \text{ ml L}^{-1}$) under in vitro conditions. In vivo, the mortality rate continues to drop, it reaches 37% at a dose of 1.5 ml , ($\text{LC}_{50} = 3.77 \text{ ml L}^{-1}$). Compared to the results obtained by Kanat and Alma (2004), in stage L5, our results in vitro are much lower. This is probably due to the low dosages we used, knowing that our highest dose was 1.5 ml (15%) while the lowest

Fig. 7 The histological effect of the essential oil of *T. vulgaris* and *L. angustifolia* on the intestine of *T. pityocampa*



dose applied by Kanat and Alma (2004) is 25%, much higher than that used in this study.

However, our *in vivo* results at stage L3 are relatively similar to those of Kesdek et al. (2014). By testing the extracts of *Achillea wilhelmsii* and *Satureja hortensis*, they obtained 80% mortality with the dose of 0.5 mg ml^{-1} . The applications of extracts of *Origanum rotundifolium* and *Tanacetum argyrophyllum* gave 80% and 76.6% mortality, respectively, using the dose of 1 mg ml^{-1} against second instar larvae. Mortality was also considerable after the use of *Origanum onites* (86.6%) and *Origanum rotundifolium* (83.3%) at a dose of 1 mg ml^{-1} and *Tanacetum argyrophyllum* (73.3%) at

a dose of 0.25 mg ml^{-1} against fourth instar larvae (Kesdek et al. 2014).

Under *in vivo* conditions, *T. vulgaris* ($\text{LC}_{90} = 0.37 \text{ ml}$) has a very high toxic effect compared to *L. Angustifolia* ($\text{LC}_{90} = 3.72 \text{ ml}$) on the third instar larvae. In the same, on the fifth instar larvae, *T. vulgaris* shows a very high toxic effect ($\text{LC}_{90} = 3.93 \text{ ml}$) compared to *L. angustifolia* ($\text{LC}_{90} = 25.9 \text{ ml}$). This can be explained by the difference of the chemical compounds of both essential oils.

The isolation of caterpillars in the nest provides protection (Démolin 1967), but had a significant impact on their resistance by making them vulnerable to external factors

Table 8 Chemical composition of essential oil of *T. vulgaris* analyzed by GC–MS

No	RT	KI	Compounds	%
1	7.56	882	Heptanone 2	0.0091
2	9.41	921	Tricyclene	0.0032
3	9.67	925	α -Thujene	0.6013
4	10.06	932	α -Pinene	1.2482
5	10.88	945	Camphene	0.0806
6	11.23	951	Thuja-2.4(10)-diene	0.0031
7	12.46	976	Sabinene	0.0115
8	12.62	978	β -Pinene	0.4581
9	12.83	981	1-Octen-3-ol	0.0717
10	13.31	988	Octanone	0.036
11	13.63	992	Myrcene	0.9152
12	13.91	998	Octanol 3	0.0187
13	14.41	1005	α -Phellandrene	0.14
14	14.8	1010	δ -3-carene	0.0575
15	15.29	1017	α -Terpinene	1.2199
16	16	1027	<i>p</i> -Cymene	8.1727
17	16.17	1030	D-Limonene	0.5482
18	16.27	1031	Eucalyptol	0.0291
19	16.83	1039	(<i>Z</i>)- β -Ocimene	0.0083
20	17.55	1049	(<i>E</i>)- β -Ocimene	0.0202
21	18.4	1061	γ -Terpinene	5.4813
22	18.79	1066	<i>cis</i> -Sabinene hydrate	0.1571
23	19.19	1072	<i>cis</i> -Linalool oxide (furanoid)	0.0238
24	19.82	1080	(<i>2Z</i>)Hexenal diethyl acetal	0.0398
25	20.29	1087	α -Terpinolene	0.1204
26	20.77	1094	Methyl benzoate	0.0109
27	20.98	1097	<i>trans</i> -Sabinene hydrate	0.0435
28	21.37	1102	Linalool	1.8876
N°	21.6	1105	<i>trans</i> sabinene hydrate	0.0421
1	22.62	1120	<i>cis p</i> -Menth-2-en-1-ol	0.0197
2	22.98	1125	α -Campholenal	0.0096
3	23.8	1136	<i>trans</i> -Pinocarveol	0.0079
4	24.22	1142	Camphor	0.0022
5	25.75	1163	Borneol	0.2453
6	26.63	1175	Terpinen-4-ol	0.4943
7	27.57	1189	α -Terpineol	0.025
8	27.83	1192	Methyl salicylate	0.0266
9	29.14	1211	<i>trans</i> -Dihydrocarvone	0.1033
10	30.47	1230	<i>cis</i> -Carveol	0.0095
11	30.6	1232	Thymol methyl ether	0.0021
12	31.42	1244	Carvacrol methyl ether	0.7298
13	33.07	1268	Thymoquinone	0.013
14	34.21	1285	<i>p</i> -Cymen-7-ol	0.0114
15	34.93	1295	Thymol	3.455
16	36.77	1323	Carvacrol	71.3498
17	39.2	1360	Eugenol	0.0218
18	40.18	1375	α -Copaene	0.0256
19	40.75	1384	β -Bourbonene	0.0149
20	41.74	1399	(<i>Z</i>)-Jasmone	0.0092

Table 8 (continued)

No	RT	KI	Compounds	%
21	42.27	1407	α -Gurjunene	0.0758
22	42.87	1418	(<i>E</i>)-Caryophyllene	0.1082
23	43.47	1427	β -Copaene	0.0115
24	44.07	1437	Aromadendrene	0.088
25	45.41	1459	allo-Aromadendrene	0.0353
26	46.44	1476	γ -Muurolene	0.0342
27	46.67	1479	Germacrene D	0.0179
28	47.53	1493	<i>cis</i> - β -Guaiene	0.0789
29	47.88	1499	α -Muurolene	0.012
30	48.67	1513	γ -Cadinene	0.0451
31	49.25	1522	δ -Cadinene	0.0689
32	50.36	1542	α -Calacorene	0.0037
33	52.33	1575	Spathulenol	0.1499
34	52.62	1580	Caryophyllene oxide	0.0758
35	55.76	1636	ISO Spathulenol	0.0075

by weakening their mass effect, the latter being a factor of resistance and development of *T. pityocampa* (Huchon and Démolin 1970).

After a day of treatment, the living larvae started to leave the nest, and fell into the net stretched below, because after spraying the nest by essential oils, the nest became unlivable for caterpillars. The pungent smell of essential oils persisted for 2 days for *L. angustifolia* and 5 days for *T. vulgaris* depending on wind speed.

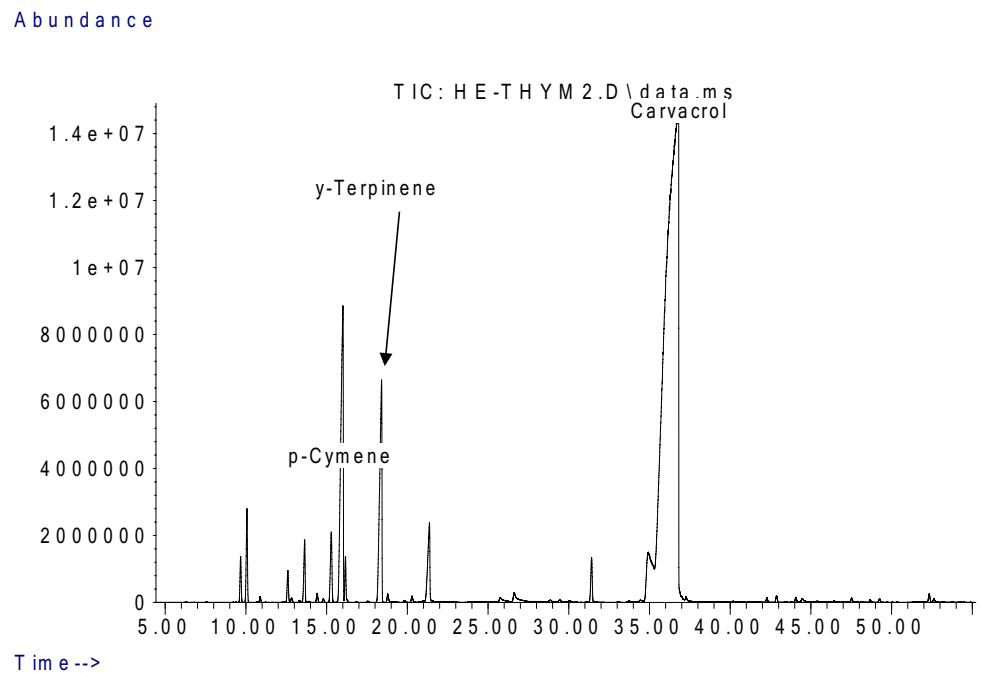
Though it seems practically impossible to spray a high amount of *T. vulgaris* and *L. angustifolia* extract over the vast surface of pine forests, it is still an alternative. Again, it could be more effective if such extracts are to be sprayed when the caterpillars are quite young because they are more sensitive than the mature ones (Breuer and Devkota 1990). *T. vulgaris* and *L. angustifolia* extracts were used with high success against the pests in the field.

Knowing that plant extracts lose their biological activity under solar radiation (Scott et al. 2003) and in light of these explanations and results recorded in vivo, it is important to conduct further studies, to find an optimal combination of compounds that will help keep oils in place longer.

The insecticidal mechanism of the essential oils is not clear, but it seems to be diversified, it is difficult to make exact comparisons with other studies due to the wide variation in the composition of essential oils and insect species (Kumar et al. 2011).

Natural insecticide with *Bacillus thuringiensis* is the only one used and most effective against the larvae of this lepidopteron (Démolin 1987; Sebti 2015). Our two treatments during the advanced stages (L3 and L5), when the insect became more resistant, showed an efficiency comparable to those of treatments with *Bacillus thuringiensis*.

Fig. 8 GC–MS chromatogram of *T. vulgaris* essential oil (abundance as function the retention time in min)



The essential oil of *T. vulgaris* causes immediate convulsions of type S in larvae after a treatment that persists for 5 min, the same observation was reported by Kanat and Hakki (2003) without specifying the duration.

Effect of essential oils on the tissues of the pine processionary

Histological sections of the intestinal tract and skin covering of treated fifth instar larvae show that the essential oils of *T. vulgaris* and *L. angustifolia* caused significant histological abnormalities. The present results corroborate the findings of Bachir et al. (2017) who also reported a similar effect on intestinal cells using the mixture of *Bacillus thuringiensis* and the *M. azedarach* methanolic. The same effect of methanolic extracts of *J. oxycedrus* and *J. phoenicea* is recorded for the digestive tract of caterpillars (Bachir et al. 2017). Essential oils have presented a double histological effect on the skin covering and digestive tract of the pine processionary caterpillar.

Chemical composition of the essential oils

The oil yield of *T. vulgaris* obtained (2.6%) is relatively higher than those obtained by Bouguerra et al. (2017) in Blida (Algeria) with 1.58%, by Nezhadali et al. (2014) in Iran with 1.39%, by Imelouane et al. (2009) in Morocco with 1% and by El-Nekeety et al. (2011) in Egypt with 0.6%. The oil of this species is slightly higher in yield, in comparison with other species of the same genus in Algeria such as *T.*

numidicus (2.1%) (Kabouche 2005) and *T. fontanesii* (2%) (Haddouchi et al. 2009).

This variability in yield is probably related to the period and the area of harvest as well as the age of the plant, then to the part and homogeneity between flower and leaf (Nezhadali et al. 2014). According to the same authors, plant oil yield varies at different stages of plant growth.

The essential oil of *T. vulgaris* collected at Ain Defla contains 35 compounds, Carvacrol being the majority compound (71.35%), followed by *p*-Cymene (8.17%), γ -Terpinene (5.48%). Our results are similar to those obtained in France by Kaloustian et al. (2008) concerning the chemical composition of *T. vulgaris*, with Carvacrol (73.7%), γ -Terpinene (13.5%) and *p*-Cymene (10.6%).

Comparing our results with those found in the literature show a difference in quality and quantity in the compositions and the yield. According to the results presented by Bouguerra et al. (2017) concerning the components of *T. vulgaris* harvested in Blida (Northern Algeria), we note a total absence of Carvacrol and a predominance of Linalool (82.88%), followed by Thymol (4.92%), Linalyl acetate (2.43%), Cymene (2.08%). The number of compounds identified in this study is 18 chemical compounds. Similarly, we note the absence of carvacrol for *T. vulgaris* from Morocco (Imelouane et al. 2009), with a predominance of Camphor (38.54%), followed by Camphene (17.19%), α -Pinene (9.35%), 1, 8-Cineole (5.44%), Terminalol (4.91%) and β -Pinene (3.90%), as for the number of compounds identified, it is 41 chemical compounds. Moreover, in Cameroon, Tchoumboungang et al. (2009) noted that the essence of *T. vulgaris* is dominated by Thymol (40.1%), *p*-Cymene

Table 9 Chemical composition of essential oil of *L. angustifolia* analyzed by GC-MS

No	RT	KI	Compounds	%
1	4.69	800	Hexanal	0.0052
2	5.35	819	Methoxyhexane	0.0272
3	6.19	843	2E-Hexenal	0.0064
4	6.71	858	3Z-Hexenol	0.0666
5	8.23	901	Heptanal	0.0014
6	9.15	916	Santolina triene	0.0018
7	9.32	919	Tricyclene	0.0186
8	9.6	924	α -Thujene	0.0098
9	10	931	α -Pinene	0.1556
10	10.81	944	Camphene	0.3217
11	12.19	967	<i>n</i> -Heptanol	0.0033
12	12.36	970	Sabinene	0.0368
13	12.52	973	β -Pinene	0.1491
14	13.24	985	Octanone	0.4479
15	13.55	990	Myrcene	0.5485
16	13.84	995	Octanol 3	0.1087
17	14.33	1002	α -Phellandrene	0.0167
18	14.6	1006	Dehydroxy- <i>cis</i> -linalool oxide	0.0291
19	14.7	1008	δ -3-Carene	0.0071
20	15.11	1013	Hexyl acetate	0.5591
21	15.73	1022	<i>o</i> -Cymene	0.0782
22	16.21	1029	Eucalyptol	3.9327
23	16.77	1037	(<i>Z</i>)- β -Ocimene	0.6641
24	17.49	1047	(<i>E</i>)- β -Ocimene	0.9204
25	18.12	1056	γ -Terpinene	0.0819
26	18.72	1065	<i>cis</i> -Sabinene hydrate	0.023
27	19.14	1071	<i>cis</i> -Linalool oxide (furanoid)	0.6932
28	20.19	1085	Fenchone	1.8127
29	21.96	1110	Linalool	37.9206
30	22.43	1117	1-Octen-3-ol. acetate	0.2399
31	22.6	1119	β -thujone	0.071
32	23.16	1127	3-Octyl acetate	0.1005
33	24.46	1145	Camphor	6.7765
34	24.83	1150	Hexyl isobutyrate	0.1573
35	25.13	1155	Menthone	0.0662
36	25.94	1166	Borneol	3.6827
37	26.07	1168	Lavandulol	0.3321
38	26.63	1175	Terpinen-4-ol	0.1713
39	27.2	1183	Cryptone	0.1942
40	27.35	1185	<i>p</i> -Cymen-8-ol	0.0287
41	27.73	1191	α -Terpineol	2.4379
42	27.94	1194	Hexyl butyrate	0.9667
43	28.18	1197	Methyl chavicol	0.0388
44	28.62	1203	<i>Trans</i> caran-4-one	0.0715
45	28.82	1206	Safranal	0.0203
46	29.14	1211	<i>cis</i> caran-4-one	0.1325
47	29.63	1218	endo-Fenchyl acetate	0.0431
48	29.73	1219	<i>cis</i> -Carveol	0.0204
49	30.47	1230	Nerol	0.3484

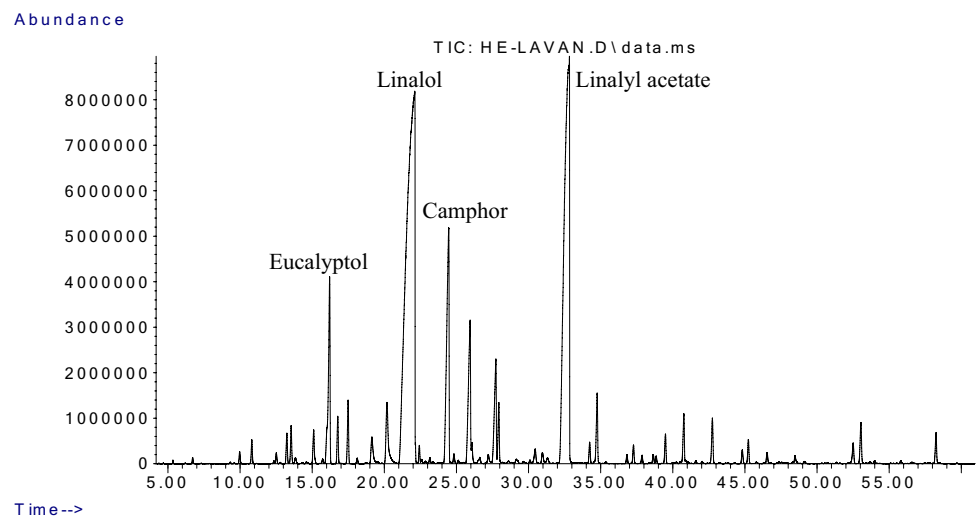
Table 9 (continued)

No	RT	KI	Compounds	%
50	30.96	1237	Cumin aldehyde	0.2387
51	31.31	1242	Hexyl isovalerate	0.1639
52	32.04	1253	Piperitone	0.0126
53	32.81	1264	Linalyl acetate	25.9473
54	34.24	1285	Bornyl acetate	0.3283
55	34.56	1290	<i>p</i> -Cymen-7-ol	0.0253
56	34.76	1293	Lavandulyl acetate	1.1768
57	35.36	1301	Carvacrol	0.0324
58	36.82	1324	Myrtenyl acetate	0.1422
59	37.27	1331	Hexyl tiglate	0.2922
60	37.87	1340	2,4-Octadienol	0.135
61	38.85	1355	α -Terpinyl acetate	0.0215
62	39.23	1361	α -Longipinene	0.0037
63	39.49	1365	Neryl acetate	0.4527
64	39.99	1372	α -Copaene	0.0182
65	40.77	1384	Geranyl acetate	0.8178
66	40.89	1386	Hexyl hexanoate	0.0467
67	41.03	1388	7- ϵ pi-Sesquithujene	0.0463
68	42.03	1404	Sesquithujene	0.0438
69	42.74	1415	(<i>E</i>)-Caryophyllene	0.7653
70	43.22	1423	Lavandulyl isobutanoate	0.0163
71	43.30	1425	β -Copaene	0.0054
72	43.64	1430	Coumarin	0.0081
73	43.87	1434	<i>Trans</i> - α -Bergamotene	0.0221
74	44.29	1441	(<i>Z</i>)- β -Farnesene	0.0198
75	44.82	1449	α -Humulene	0.2266
76	45.24	1456	(<i>E</i>)- β -Farnesene	0.373
77	46.53	1477	Germacrene D	0.1917
78	47.38	1491	Epi-cubebol	0.0368
79	48.30	1506	(<i>Z</i>)- α -Bisabolene	0.0363
80	48.48	1509	Lavandulyl isovalerate	0.1619
81	49.14	1521	δ -Cadinene	0.0479
82	52.50	1578	Caryophyllene oxide	0.3916
83	53.05	1588	Viridiflorol	0.7428
84	53.69	1599	Longiborneol	0.0435
85	54.00	1604	Humulene epoxide II	0.0558
86	55.80	1637	Epi- α -Cadinol	0.0553
87	58.25	1681	α -Bisabolol	0.5024
88	58.48	1685	Shyobunol	0.0147
89	66.68	1843	6,10,14-Trimethylpentadecan-2-one	0.0121
90	70.70	1924	Methyl hexadecanoate	0.0149
91	76.54	2048	Manool	0.1236
92	78.78	2097	Methyl elaidate	0.0342

(23.4%), γ -Terpinene (15.1%), with the presence of Carvacrol in low content (2.4%); the number of identified compounds is 23 chemical compounds.

The oil yield of *L. angustifolia* obtained was 1.5%. This yield is lower than that obtained by Belhadj et al. (2014)

Fig. 9 GC–MS chromatogram of *L. angustifolia* essential oil (Abundance as function the retention time in min)



in Batna (East Algeria) with 2.0%, by Wesolowska et al. (2010) in Poland with 2% and by Arabaci and Bayram (2005) in Turkey with 1.54–2.34%. On the other hand, it is much weaker than that reported by Verma et al. (2010) in India with 2.8%, by Messaoudi et al. (2017) in Morocco with 2.32%, as well as that of Benyagoub et al. (2014) in Tlemcen (Western Algeria) at 4.12%, but is relatively higher than that of Jianu et al. (2013) in Romania with 1.13%.

Our essential oil is slightly higher in yield compared to other species in Algeria such as *L. stoechas* with 1.03% (Chekoual et al. 2018), *L. multifida* with 1% (Saadi et al. 2016), *L. dentata* with 1.18% (Drisi et al. 2017) and *L. officinalis* with 1.5% (Boughendjioua 2017).

The essential oil of *L. angustifolia* extracted in the present study at Ain Defla contains 36 compounds; it is characterized by the predominance of 2 compounds, Linalool (37.92%) and Linalyl acetate (25.94%). In literature, the two major compounds obtained in our study are recorded in several countries in the world, but with different proportions. In China, Zhang et al. (2006) reported the following compounds: Linalool (37.6%), Linalyl acetate (35.8%), Terpinen-4-ol (4.5%), Lavandulyl acetate (4.1%). In Greece, the same chymotypes are recorded in the study conducted by Chatzopoulou et al. (2003), with Linalool (50.6%), Linalyl acetate (15.7%), Terpinen-4-ol (7.8%), (Z)- β -Ocimene (4.3%), (E)- β -Ocimene (2.7%). In the same country, Daferera et al. (2000) point out the same chemical compounds with Linalool (44.5%), Linalyl acetate (32.7%), Terpinen-4-ol (6.9%), 1,8-Cineole (4.8%), Borneol (3.9%).

In Algeria, several studies were conducted to test the efficacy of *L. angustifolia* and identify the chemical compounds of this plant. The same chemotypes are recorded, Linalool and Linalyl acetate, but with relatively lower percentages than our study, 22.35% and 21.80%,

respectively (Djenane et al. 2012). However, the essential oil of *L. angustifolia* of Batna (East Algeria) is completely different from that of Ain Defla, it is characterized by a predominance of 1,8-Cineole (29.4%), Camphor (24.6%), Terminalol (4.1%) and Viridiflorol (3.3%) (Belhadj et al. 2014). In Tizi Ouzou (Northern Algeria), the study carried out by Djenane et al. (2011) shows a predominance of 1,8-Cineole (37.80%), β -Caryophyllene (20.90%) and limonene (11.20%).

Following our results and those obtained in different countries in the world, for the same species or other species of *Lavandula* or *Thymus*, we find that the chemical compositions and the yield vary from one country to another and from one area to another; sometimes, we partially obtain the same chemical profile or the same chemotype for different species.

On the other hand, we observe different chemical compositions or chemotypes for the same species. This may be due to the plant itself, such as species, genetics factors, phenological stage or other extrinsic factors, such as soil, climate, harvest period, harvesting area, amendments in the case of cultivated plants (Ozcan and Chalchat 2004; Imelouane et al. 2009), and the part of the analyzed plant.

In this study, we can conclude that the essential oil of *T. vulgaris* with Carvacrol and *L. angustifolia* with Linalool and Linalyl acetate cause strong larvicidal effect against *T. pityocampa*. This result opens interesting prospects for the application of *T. vulgaris* oil for the production of bio-cides. We can conclude that the inclusion of plant products such as plant extracts could constitute an appropriate economic and environmental alternative for the management of *T. pityocampa*.

Acknowledgements We are grateful to anonymous reviewer for comments on a draft of this manuscript.

Compliance with ethical standards

Conflict of interest All authors declare that they have no conflict of interest.

References

- Abbott WS (1925) A method of computing the effectiveness of an insecticide. *J Econ Entomol* 18(2):265–267
- Adams RP (2001) Identification of essential oil components by gas chromatography: quadrupole mass spectroscopy. Carol Stream, Allured Pub Corp, p 456
- Ait Taadaoui N, Hsaine M, Rochdi A, Nilahyane A, Bouharroud R (2012) Effet des extraits végétaux méthanoliques de certaines plantes marocaines sur *Tuta absoluta* (Lepidoptera, Gelechiidae). *EPPA Bull* 42(2):275–280
- Arabaci O, Bayram E (2005) The effect of nitrogen fertilization and plant density on some agronomic and quality traits of lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) under ecological conditions of Aydin. Adnan Menderes Uni. *J Agric Faculty* 2(2):13–19
- Bachir K, Tail G, Bouragba N, Zamoum M, Trigui M, Tounsi S, Saidi F (2017) Synergic effect between *Bacillus thuringiensis* Kurstaki HD1 δ -endotoxins and *Melia azedarach* (Meliaceae) methanolic extract against the larvae of *Thaumetopoea pityocampa* Den. & Schiff. (Lepidoptera, Notodontidae). *J Ent Res* 41(4):343–352
- Barrento MJ, Santos H, Branco M, Paiva MR (2008) Monitorização da processionaria do pinheiro, *Thaumetopoea pityocampa*. In: Branco M, Valente C, Paiva MR (eds) *Pragas e doenças em Pinhal e Eucaliptal - desafios para a sua gestão integrada*. ISA Press, Lisboa, pp 55–64
- 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. *Ecol Appl* 15(6):2084–2096
- Belhadj MM, Kabouche A, Abaza I, Aburjai, Touzani R, Kabouche Z, (2014) Chemotypes investigation of *Lavandula* essential oils growing at different North African soils. *J Mater Environ Sci* 5(6):1896–1901
- Ben Khedher S, Boukedi H, Dammak M, Kilani-feki O, Sellami-Boudawara T, Abdelkefi-Mesrati L, Tounsi S (2017) Combinatorial effect of *Bacillus amyloliquefaciens* AG1 biosurfactant and *Bacillus thuringiensis* Vip3Aa16 toxin on *Spodoptera littoralis* larvae. *J Invertebr Pathol* 144:11–17
- Benyagoub E, Nabbou N, Sirat M, Dahlis Z (2014) Propriétés antibactériennes et constituants phytochimiques des extraits de la Lavande de la région de Tlemcen et Leur Effet sur quelques espèces Bactériennes responsables d'infection alimentaire. *Revue des Bioressources* 4(2):18–28
- Bouchikhi TZ, Khelil MA, Hassani F (2008) Fight against the bruchid bean *Acanthoscelidesobtectus* (Coleoptera: Bruchidae) and the mite *Tineola bisselliella* (Lepidoptera: Tineidae) by the essential oils extracted from *Rosmarinus officinalis*. *Biosci Biotechnol Res Asia* 5(2):651–656
- Bosly AH (2013) Evaluation of insecticidal activities of Mentha piperita and Lavandula angustifolia essential oils against house fly, *Musca domestica* L. (Diptera, Muscidae). *J Entomol Nematol* 5(4):50–54
- Boughendjioua H (2017) Chemical composition and antibacterial activity of essential oil of *Lavandula officinalis* grown in the région of Skikda—Algeria. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège* 86:88–95
- Bouguerra N, Tine Djebbar F, Soltani S (2017) Algerian *Thymus-vulgaris* essential oil: chemical composition and larvicidal activity against the mosquito *Culex pipiens*. *Int J Mosq Res* 4(1):37–42
- Breuer M, Devkota B (1990) Control of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) By extracts of *Melia azedarach* L. (Meliaceae). *J Appl Entomol* 110:128–135
- Chatzopoulou PS, Goliaris AH, Katsiotis ST (2003) Contribution to the analysis of the volatile constituents from some lavender and lavandin cultivars grown in Greece. *Sci Pharm* 71:229–234
- Chebaibi A, Marouf Z, Rhazi-Filali F, Fahim M, Ed-Dra A (2016) Évaluation du pouvoir antimicrobien des huiles essentielles de sept plantes médicinales récoltées au Maroc. *Phytothérapie* 14(6):355–362
- Chekoua L, Aissat A, Ait-Kaci Aourahoun K, Benabdelkader T (2018) Comparative study of yield, chemical composition and antioxidant activity of wild Algerian *Lavandula stoechas* L. Obtained by ultrasound pre-treatment and by conventional hydrodistillation. *Revue Phytothérapie* 16(1):109–118
- Chenchouni H, Zanati K, Rezougui A, Briki A, Arar A (2010) Population monitoring of pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*) by pheromone trapping at the Southern limit of distribution of *Pinus halepensis* in Eastern Algeria. *For Sci Technol* 6(2):67–79
- Clemente S, Mareggiani G, Broussalis A, Martino V, Ferraro G (2003) Insecticidal effects of Lamiaceae species against stored products insects. *Boletín de Sanidad Végetal Plagas* 29:421–426
- Clevenger JF (1928) Apparatus for the détermination of volatile oil. *J Am Pharm Assoc* 17(4):345–349
- Daferera DJ, Ziogas BN, Polissiou MG (2000) GC–MS analysis of essential oils from some greek aromatic plants and their fungitoxicity on *Penicillium digitatum*. *J Agric Food Chem* 48:2576–2581
- De La Torre Rodriguez YC, Estrada FRM, Suarez AEF, De Torres NW, Aranda RS (2013) Larvicidal and cytotoxic activities of extracts from 11 native plants from northeastern Mexico. *J Med Entomol* 50(2):310–313
- Démolin G (1967) Gréganisme et subsocialité chez *Thaumetopoea pityocampa*. Nid d'hiver, activité de tissage. C. R. V^{ème} Congrès de l'union internationale pour l'étude des insectes sociaux 69–77
- Démolin G (1987) La processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Au Mont Ventoux. *Etude Vaclusiennes n° spécial* (3):157–173
- Démolin G, Delmas JC (1967) Les Ephippigères (Orthoptères, Tettigoniidae), prédateurs occasionnels, mais importants de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. *Entomophaga* 12:399–401
- Djenane D, Lefsih K, Yangiela J, Roncales P (2011) Composition chimique et activité anti-Salmonella Enteritidis CECT 4300 des huiles essentielles d'*Eucalyptus globulus*, *Lavandula angustifolia* et *Satureja hortensis*; Tests *in vitro* et efficacité sur les œufs entiers liquides conservés à 7±1 °C. *Phytothérapie* 9(6):343–353
- Djenane D, Aïder M, Yangiela J, Idir L, Gómez D, Roncalés P (2012) Antioxidant and antibacterial effects of Lavandula and Mentha essential oils in minced beef inoculated with *E. coli* and *S. aureus* during storage at abuse refrigeration temperature. *Meat Sci* 92(4):667–674
- Drissi D, Tine-Djebbar F, Soltani N (2017) *Lavandula dentata* essential oils: chemical composition and larvicidal activity against *Culiseta longiareolata* and *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae). *Afr. Entomol.* 25(2):387–394
- El Akhal F, Greche H, Ouazzani Chahdi F, Guemmouh R, El Ouali LA (2015) Chemical composition and larvicidal activity of *Culex pipiens* essential oil of *Thymus vulgaris* grown in Morocco. *J Mater Environ Sci* 6(1):214–219
- Ebadollahi A, Safaralizadeh MH, Pourmirza AA, Gheibi SA (2010) Toxicity of essential oil of *Agastache foeniculum* (Pursh) Kuntze to *Oryzaephilus surinamensis* L. and *Lasioderma serricorne* F. *J Plant Prot Res* 50(2):215–219

- El Akhal F, Guemmouh R, Maniar S, Taghzouti K, El Ouali LA (2016) Larvicidal activity of essential oils against of the malaria vector *Anopheles labranchiae* (Diptera: Culicidae) original article. *Int J of Pharm Pharm Sci* 8(3):372–376
- El-Nekeety AA, Mohamed SR, Hathout AS, Hassan NS, Aly SE, Abdel-Wahhab MA (2011) Antioxidant properties of *Thymus vulgaris* oil against aflatoxin-induced oxidative stress in male rats. *J Toxicol* 57(7–8):984–991
- Finney D (1971) Statistical method in biological assay, 2nd edn. Griffin, London, p 333
- Georghiou GP (1990) Overview of insecticide resistance. In Green MB, LeBaron HM, Moberg WK (eds) Managing resistance to agrochemicals—from fundamental research to practical strategies. *Am. Chem. Soc. Symp. Ser.* 421, Washington, DC, pp 18–41
- Georghiou GP, Lagunes-Tejeda A (1991) The occurrence of resistance to pesticides in arthropods. Food agriculture organism. Union Nations Rome. AGPP/MISC/91-1, 318P
- Guillen MD, Manzano MJ (1998) Study of the composition of the different parts of a Spanish *Thymus vulgaris* L. plant. *J Food Chem* 63(3):373–383
- Haddouchi F, Lazouni HA, Meziane A, Benmansour A (2009) Etude physicochimique et microbiologique de l'huile essentielle de *Thymus fontanesii* Boiss & Reut. *Afr Sci* 5(2):246–259
- Hernandez-Ochoa LR (2005) Substitution de solvants et matières actives de synthèse par un combiné 'solvant active d'origine végétal'. Thèse de doctorat en science des agro agresseurs. Institut national polytechnique de Toulouse, 224 p
- Huchon H, Démolin G (1970) La Bioécologie de la processionnaire du Pin. Dispersion potentielle. Dispersion actuelle. *Revue forestière française XXII* (n° spécial) 220–234
- Imelouane B, Amhamdi H, Wathel JP, Ankit M, Khedid K, El Bachiri A (2009) Chemical composition of the essential oil of thyme (*Thymus vulgaris*) from Eastern Morocco. *Int J Agric Biol* 11:205–208
- Jianu C, Pop G, Gruia AT, Horhat FG (2013) Chemical composition and antimicrobial activity of essential oils of lavender (*Lavandula angustifolia*) and lavandin (*Lavandula x intermedia*) grown in Western Romania. *Int J Agric Biol* 15(4):772–776
- Kabouche A (2005) Etude phytochimique de plantes médicinales appartenant à la famille des Lamiaceae. Thèse de doctorat d'état en chimie. Université Mentouri-Constantine. Faculté des sciences exactes, 310 p
- Kaloustian J, Chevalier J, Mikail C, Martino M, Abou L, Vergne MF (2008) Etude de six huiles essentielles : composition chimique et activité antibactérienne. *Phytothérapie* 6(3):160–164
- Kanat M, Alma MH (2003) Insecticidal effects of essential oils from various plants against larvae of pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff) (Lepidoptera: Thaumetopoeidae). *Pest Manag Sci* 60(2):173–177
- Kesdek M, Kordali S, Coban K, Usanmaz A, Ercisli S (2014) Larvicidal effect of some plant extracts on the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermuller) in laboratory conditions. *Acta Sci Pol Hort Cult* 13(5):145–162
- Khemici M, Zamoum M, Démolin G (1988) Ecologie de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff, (Lep., Thaumetopoeidae) en Algérie Incidence du climat sur le comportement de l'insecte. *Ann Rech For* 3(3):67–77
- Khosravi R, Sendi JJ (2013) Toxicity, development and physiological effect of *Thymus vulgaris* and *Lavandula angustifolia* essential oils on *Xanthogaleruca luteola* (Coleoptera: Chrysomelidae). *J King Saud Univ Sci* 25(4):349–355
- Kumar P, Mishra S, Malik A, Satya S (2011) Insecticidal Evaluation of essential oils of *Citrus sinensis* L. (Myrtales: Myrtaceae) against housefly, *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae). *Parasitol Res* 110:1929–1936
- Markalas S (1998) Biomass production of *Pinus pinaster* after defoliation by the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.). USDA, Forest Service General technical Report, NE-247, pp 292–302
- Messaoudi MI, Filali H, Ait Haj Said A, Nayme K, Timinouni M, Rahmoune I, Hakkou F (2017) Phytochemical composition and antibacterial activity of Moroccan *Lavandula angustifolia* Mill. *J Essent Oil Bearing Plants* 20(4):1074–1082
- Moharrampour S, Taghizadeh A, Meshkatsadat MH, Talebi AA, Fathipour Y (2008) Repellent and fumigant toxicity of essential oil from *Thymus persicus* against *Tribolium castaneum* and *Callosobruchus maculatus*. *Commun Agric Appl Biol Sci* 73(3):639–642
- Moon T, Cavanagh MA, Wilkinson JM (2006) Antiparasitic activity of two Lavandula essential oils against *Giardia duodenalis*, *Trichomonas vaginalis* and *Hexamita inflata*. *Parasitol Res* 99(6):722–728
- Miura K, Kikuzaki H, Nakatani N (2002) Antioxidant activity of chemical components from sage (*Salvia officinalis* L.) and Thyme (*Thymus vulgaris* L.) measured by the oil stability index method. *J Agric Food Chem* 50(7):1845–1851
- Nezhadali A, Nabavi M, Rajabian M, Akbarpour M, Pourali P, Amiri F (2014) Chemical variation of leaf essential oil at different stages of plant growth and *in vitro* antibacterial activity of *Thymus vulgaris* Lamiaceae, from Iran Beni-Suef Univ. *J Basic Appl Sci* 3:87–92
- ONS (2015) Statistiques sur l'environnement. Office national des statistiques, Rapport, p 82
- Oulebsir-mohandkaci H, Ait KS, Doumandji-mitiche B (2015) Essential Oils of two Algerian aromatic plants *Thymus vulgaris* and *Eucalyptus globulus* as bio-insecticides against aphid *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). *Wulfenia J* 22(2):185–197
- Ozcan M, Chalchat JC (2004) Aroma profile of *Thymus vulgaris* L. growing wild in Turkey. *Bulg J Plant Physiol* 30(3–4):68–73
- Park Yu, Koo HN, Kim GH (2012) Chemical composition, larvicidal action, and adult repellency of *Thymus magnus* against *Aedes albopictus*. *J Am Mosq Control Assoc* 28:192–198
- Pavela R (2008) Larvicidal effects of various Euro-Asiatic plants against *Culex quinquefasciatus* Say larvae (Diptera: Culicidae). *J Parasitol Res* 102(3):555–559
- Pavela R, Vrchotová N, Triska J (2009) Mosquitocidal activities of thyme oils (*Thymus vulgaris* L.) against *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae). *J Parasitol Res* 105(5):1365–1370
- Pestaña M, Santolamazza-Carbone S (2010) Defoliation negatively affects plant growth and the ectomycorrhizal community of *Pinus pinaster* in Spain. *Oecologia* 165(3):723–733
- Peterson CJ, Nemetz LT, Jones LM, Coats JR (2002) Behavioral activity of Catnip (Lamiaceae) essential oil components to the German cockroach (Blattodea: Blattellidae). *J Econ Entomol* 95:377–380
- Regnault-Roger C, Hamraoui A (1993) Influence d'huiles essentielles sur *Acanthoscelides obtectus* Say, bruche du haricot. *Acta Botanica Gallica* 140(2):217–222
- Robinet C, Baier P, Pennerstorfer J, Schopf A, Roques A (2007) Modeling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff) (Lep., Notodontidae) in France. *Global Ecol Biogeogr* 16(4):460–471
- Ruiz LM, Segura C, Trujillo J, Orduz S (2004) In vivo binding of the Cry1Bb toxin of *Bacillus thuringiensis* subsp. medellin to the midgut of mosquito larvae (Diptera: Culicidae). *Mem Inst Oswaldo Cruz* 99(1):73–79
- Saadi A, Brada M, Kouidri M, Dekkiche H, Attar F (2016) Chemical composition and content of essential oil of *Lavandula multifida* from Algeria. *Chem Nat Compd* 52(1):162–164
- Saroukolai AT, Moharrampour S, Meshkatsadat MH (2009) Insecticidal properties of *Thymus persicus* essential oil against *Tribolium castaneum* and *Sitophilus oryzae*. *J Pest Sci* 83(1):3–8
- Sebti S (2015) Recherche écologique et répartition spatio-temporelle de la processionnaire *Thaumetopoea pityocampa* Denis et

- Schiffermüller dans la région de l'Atlas blidéen. Thèse de doctorat en sciences Agronomiques. L'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 108 p
- Scott TL, Milton CT, Erickson GE, Klopfenstein TJ, Stock RA (2003) Corn processing method in finishing diets containing wet corn gluten feed. *J Anim Sci* 81(12):3182–3190
- Shawl AS, Kumar SJ (2000) Med potential of lavender oil industry in Kashmir. *J Med Arom Plant Sci* 22:319–321
- Tchoumboungang F, Dongmo PMJ, Sameza ML, Mbanjo EGN, Fotso GBT, Henri P, Zollo A, Menut C (2009) Activité larvicide sur *Anopheles gambiae* Giles et composition chimique des huiles essentielles extraites de quatre plantes cultivées au Cameroun. *Biotechnol Agron Soc Environ* 13(1):77–84
- Toffolo ED (2008) Climate change and pine processionary moth: role of the host plant. Doctorate school of crop science. University of Padova, Italy, 100 p
- Uremis I (2009) Herbicidal activity of essential oils on germination of some problem weeds. *Asian J Chem* 21(4):3199–3210
- Verma RS, Rahman LU, Chanotiya CS, Verma RK, Chauhan A, Yadav A, Singh A, Yadav AK (2010) Essential oil composition of *Lavandula angustifolia* Mill. cultivated in the mid hills of Uttarakhand, India. *J Serb Chem Soc* 75(3):343–348
- Wesołowska A, Jadczyk D, Grzeszczuk M (2010) Influence of distillation time on the content and composition of essential oil isolated from lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.). *Herba Pol.* 56(3):24–36
- Zamoum M (1992) Evaluation de quelques facteurs de mortalité agissant sur une population de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. (Lep., Thaumetopoeidae) depuis le départ des chenilles en procession de nymphose jusqu'à l'émergence des adultes. Etude biologique particulière sur deux parasitoïdes: *Phryxe caudata* Rond. (Dipt., Tachinidae) et *Coelichneumon rudis* Fonsc. (Hym., Ichneumonidae). DEA Univ. Des Sci. de Rennes I, 30 p
- Zamoum M (1998) Données sur la bioécologie, les facteurs de mortalité et la dynamique des populations de *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiffermüller. (Lep., Thaumetopoeidae) dans les pineraies subsahariennes de la région de Djelfa (Algérie). Thèse de Doct. Université des sciences de Rennes I, France, 247 p
- Zamoum M, Démolin G (2003) Possibilités de renforcement de la lutte contre *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiffermüller (Lep., Thaumetopoeidae) dans les reboisements de *Pinus halepensis* du "barrage vert". *Ann Sci For* 1:18–26
- 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 la Recherche Forestière* 6:155–173
- Zamoum M, Démolin G, Martin J (1997) Efficiency of a microbiological insecticide (Foray 48B) tests on the stages L3 and L4 of the pine processionary *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) in the reforestations of Moudjebara (Djelfa, Algeria). *Ann For Res* 1:3–41
- Zamoum M, Khemici M, Démolin G (1999) Eléments constitutifs de la stratégie de lutte intégrée contre *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiff. (Lep., Thaumetopoeidae) dans les reboisements du "Barrage Vert"—Cas de Moudjebara (Djelfa). Acte 1^{er} séminaire "Développement des zones arides et semi-aride", Djelfa, 7 p
- Zamoum M, Démolin G, Sai K (2005) Données sur les envols d'adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiff. (Lep., Thaumetopoeidae) dans les pineraies semi arides. *Ann Sci For* 12:30–42
- Zamoum M, Démolin G, Sai K (2006) Données sur les envols d'adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiff. (Lep., Thaumetopoeidae) dans les pineraies semi arides. *Annales de la Recherche Forestière en Algérie* 12:30–42
- Zamoum M, Martin J, Bensidi A, Bahmane R (2016) Immediate and delayed mortality of the pine processionary moth treated by *Bacillus thuringiensis* var. kurstaki 3a, 3b in the sub-Saharan pine reforestations. *Turk J For* 17:76–79
- Zhang QX, Jiang Y, Zhang ZQ (2006) The study on development of essential oil from lavender. *Flavor Fragr Cosm* 6:21–24

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.