

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

UNIVERSITE DE BLIDA 1
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Biotechnologies

THÈSE DE DOCTORAT

IMPACT DE LA GESTION PHYTOSANITAIRE
SUR L'INTERACTION PLANTE HÔTE / RAVAGEUR

Par

ZIOUCHE Sihem

Devant le jury composé de :

A. BENRIMA-GUENDOZ	P ^r	U. de Blida1	Présidente
Z.E. DJAZOULI	P ^r	U. de Blida1	Encadreur
F.Z. KARA - TOUMI	P ^r	U. de Blida 1	Examinatrice
N. CHABOUTI-MEZIOU	P ^r	U. M'ed. Bougara Boumerdes.	Examinatrice
F. ACHEUK	MCA	U. M'ed. Bougara Boumerdes	Examinatrice
M. KHALDI	MCA	U. Med. Boudiaf de M'sila	Examineur

Blida, 2018

RÉSUMÉ

IMPACT DE LA GESTION PHYTOSANITAIRE SUR L'INTERACTION PLANTE HÔTE / RAVAGEUR

La chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) est le principal ravageur défoliateur qui endommage gravement les forêts de pin d'Alep des régions du bassin méditerranéen. En Algérie, cet insecte ravageur est présent dans l'ensemble des forêts résineuses. Ce défoliateur constitue un bon modèle pour l'étude de ces interactions hôte-ravageur dans le contexte des changements environnementaux car ils alternent des phases endémiques et épidémiques qui dépendent de deux facteurs majeurs : le niveau de disponibilité en arbres affaiblis par un stress biotique et/ou abiotique et le niveau de population de ces insectes. Nous avons développé une approche pluridisciplinaire couplant la caractérisation de traits écophysologiques et dendrométriques impliqués dans l'intensité de l'attaque de *T. pityocampa* avec la caractérisation de facteurs écologiques clés pour la démographie des chenilles (traits d'histoire de vie du ravageur et stratégies d'exploitation de l'hôte). Les abondances et l'ordre d'arrivée écologiques des formes biologiques de la chenille processionnaire semblent être influencés par les variations de température et rayonnement solaire. Le choix du positionnement des nids d'hiver par cette chenille, paraît ne pas être conditionné par l'effet site, altitude et la hauteur des arbres infestés. Les chenilles installent leurs nids d'hiver sur les rameaux à orientation Sud et Ouest. En parallèle, les polyphénols, les flavonoïdes, sucres totaux et les tannins condensés ont été quantifiés dans les aiguilles saines et infestées. L'incidence des attaques de la chenille à travers l'analyse des composés phénoliques et terpéniques des aiguilles des arbres ont montrés l'augmentation de la teneur en Polyphénols des sucres totaux et des tanins, or que les Flavonoïdes présentent des variations nulles. Les résultats de la caractérisation des huiles essentielles étudiées révèlent que les principaux représentants des phénols présents dans l'huile essentielle de *T. pallescens* sont le Carvacrol (54,09%) et le Thymol (16,24%). Les Cétone terpéniques dont principalement le Camphor (24,6%) et le Chrysanthenone (14,06%) sont les constituants majoritaires de l'huile essentielle d'*A. herba alba*. Les composants majeurs de l'huile essentielle de *P. halepensis* sont : β -Caryophyllene (28,43%), β -Myrcene (12,51%) et l' α -Pinène (12,48%). Les huiles essentielles de *T. pallescens* et de *P. halepensis* ont entraînés une mortalité larvaire de 90 % chez les larves L₂ à la dose la plus élevée. Parmi les huiles essentielles appliquées sur les larves L₃ *T. Pallescens* est plus efficace que les autres et a entraîné la mortalité à la dose la plus élevée (96,7%) et l'huile essentielle de *P. halepensis* était moins efficaces sur ce stade larvaire de la chenille processionnaire et atteint 75% de mortalité. LM'huile essentielle d'*A. herba alba* été relativement efficace et a permis une mortalité de 83,3 % sur les larves L₃. Cependant, cette huile était moins efficaces et n'atteignaient que 36,7% à la doses la plus élevée sur les larves L₂. Sur la base des valeurs de la DL₅₀ l'ordre de toxicité est le suivant : *T. pallescens*>*P. halepensis*>*A. herba alba*. La réaction métabolique et le remaniement des réserves énergétiques (les lipides, les protéines, les glycogènes et les glucides) des larves L₂ et L₃ de *T. pityocampa* évaluées sous l'action des huiles essentielles de *T. pallescens*, *A. herba alba* et *P. halepensis* montrent qu les réserves lipidiques sont très distinguées par rapport aux autres réserves énergétiques.

Mots-clés : Biomarqueurs énergétiques, dynamique des populations, facteurs abiotiques, huiles essentielles, *Pinus halepensis*, potentiel larvicide, qualité phytochimique, *Thaumetopoea pityocampa*.

ABSTRACT

IMPACT OF PHYTOSANITARY MANAGEMENT ON THE INTERACTION HOST PLANT / PEST

The pine processionary caterpillar (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) is the main defoliating pest that severely damages the Aleppo pine forests of the Mediterranean basin. In Algeria, this pest insect is present in all coniferous forests. This defoliator is a good model for the study of these host-pest interactions in the context of environmental changes because they alternate endemic and epidemic phases that depend on two major factors: the level of availability of trees weakened by biotic and / or abiotic stress and the population level of these insects. We have developed a multidisciplinary approach coupling the characterization of eco-physiological and dendrometric features involved in the intensity of the attack of *T. pityocampa* processionary caterpillar with the characterization of key ecological factors for the demography of caterpillars (history traits pest life and host exploitation strategies). The ecological abundances and order of arrival of the biological forms of processionary caterpillar seem to be influenced by the variations of temperature and solar radiation. The choice of the positioning of winter nests by this caterpillar appears not to be conditioned by the effect of site, altitude and height of infested trees. The caterpillars set their winter nests on the south and west facing branches. In parallel, polyphenols, Flavonoids, total sugars and condensed tannins were quantified in healthy and infested needles. The incidence of caterpillar attacks through the analysis of phenolic and terpene compounds of the needles of trees has shown increase in the polyphenols content, of total sugars and tannins and that Flavonoids show zero variations. The results of the characterization of the essential oils studied reveal that the principal representatives of the phenols present in the essential oil of *T. pallescens* are Carvacrol (54.09%) and Thymol (16.24%). Our results show that the essential oil of *A. herba alba* is characterized by the presence of six constituents, mainly terpene ketone including Camphor (24.6%) and Chrysanthenone (14.06). The major components of the essential oil of *P. halepensis* are: β -Caryophyllene (28.43%), β -Myrcene (12.51%) and α -Pinene (12.48%). The essential oils of *T. pallescens* and *P. halepensis* resulted in a larval mortality of 90% in L₂ larvae at the highest dose. Among the essential oils applied to L₃ larvae. *T. pallescens* was more effective than the others and resulted in the highest dose mortality (96.7%) and the essential oil of *P. halepensis* was less effective in this larval stage of the processionary caterpillar and had a mortality rate of 75%. Among the other essential oils applied *A. herba alba* was relatively effective and resulted in 83.3% mortality on L₃ larvae. However, this oil was less effective and reached only 36.7% at the highest dose on L₂ larvae. . On the basis of the LD₅₀ values the order of toxicity is as follows: *T. pallescens* > *P. halepensis* > *A. herba alba*. The metabolic reaction and the reworking of the energy reserves (lipids, proteins, glycogen and carbohydrates) of *T. pityocampa* larvae L₂ and L₃ evaluated under the action of the essential oils of *T. pallescens*, *A. herba alba* and *P. halepensis* show the lipid reserves are very distinguished compared to other energy reserves.

Keywords: Energy biomarkers, population dynamics, abiotic factors, essential oils, *Pinus halepensis*, larvicidal potential, phytochemical quality, *Thaumetopoea pityocampa*.

ملخص

تأثير إدارة الصحة النباتية على تفاعل النبات المضيف / الآفات

اليرقة الزيافة للصنوبر الحلبي هي المدمر الرئيسي للاوراق و التي تدمر بخطورة غابات الصنوبر الحلبي في مناطق حوض البحر الأبيض المتوسط. في الجزائر، هذه الحشرة موجودة في الغابات الصنوبرية. يعتبر هذا المدمر نموذجاً جيداً لدراسة التفاعلات بين النبات المضيف والآفات في سياق التغيرات البيئية لأنه يتناوب بين المرحلة المتسرطنة و البوانية التي تتوقف على عاملين رئيسيين: مدى توافر الاشجار المستضعفة من الاجهاد الحيوي او الاحيوي . وكذلك كثافة أعداد هذه الحشرات. لقد طورنا نسفاً متعدد التخصصات و الذي يقرن الصفات أو المميزات البيئية فيريولوجيا و القياسات المتجانسة التي تشارك في وتيرة شدة هجوم هذه الحشرات مع توظيف العوامل البيئية الرئيسية لديموغرافيا اليرقة الزيافة(ميزات تاريخية لحياة و استراتيجيات استغلال المضيف).

يبدو أن الوفرة وترتيب الوصول الإيكولوجي للأشكال البيولوجية لليرقة الزيافة قد تأثر بتغيرات درجة الحرارة والإشعاع الشمسي. ويبدو أن اختيار أعشاش الشتاء ليس مشروطاً بتأثير الموقع والارتفاع وارتفاع الأشجار المتضررة. تضع اليرقات أعشاشها الشتوية على الفروع المواجهة للجنوب والغرب. في موازاة ذلك ، تم تحديد كمية البوليفينول والفلافونويد والسكريات الكلية والتانينات المكثفة في الأوراق (الإبر) السليمة و المتضررة. فيما يخص تأثير الهجمات من خلال تحليل المكونات الكيميائية النباتية لإبر الصنوبر و كذا نوعية المركبات الفينولية والتيربينية التاربان فان نتائج دراستنا تبين بأنه هناك زيادة في نسب محتوى البوليفينول والسكريات الكلية والتانينات ، بينما ينعدم الاختلاف في نسب الفلافونويد.

نتائج توصيف الزيوت الأساسية التي تم دراستها تكشف أن الممثلين الرئيسيين للفينولات الموجودة في الزيت العطري لـ *T. pallescens* هي Carvacrol (54.09%) و Thymol (16.24%). كيتونات التيربينيك ، أساساً الكافور (24.6%) و Chrysanthenone (14.06%) هي المكونات الرئيسية للزيت الأساسي لـ *A. herba alba*. المكونات الرئيسية للزيت الأساسي *P. halepensis* هي: β -Caryophyllene (28.43%) ، α -Pinene (12.48%) ، Myrcene (12.51%).

أدت الزيوت العطرية لـ *P. halepensis* و *T. pallescens* إلى موت 90% من يرقات في اليرقات الطور 2 بأعلى جرعة ، ومن بين الزيوت الأساسية التي تم تطبيقها على يرقات الطور 3. كان *T. pallescens* أكثر فعالية من الآخرين ، وأسفر عن أعلى معدل للوفيات (96.7%) وكان الزيت العطري لـ *P. halepensis* أقل فعالية في هذه المرحلة اليرقية وكان معدل الوفيات 75%. من بين الزيوت الأساسية الأخرى التي تم تطبيقها *A. herba alba*. كانت فعالة نسبياً وأدت إلى وفيات 83.3% على اليرقات 3L. ومع ذلك ، كان هذا الزيت أقل فعالية ووصل إلى 36.7% فقط بأعلى جرعة على اليرقات 2L. على أساس قيم الجرعة المميتة 50 يكون ترتيب السمية على النحو التالي: A. alba herb > P. halepensis > T. pallescens.

التفاعل الأيضي وإعادة تكوين احتياطيات الطاقة (الدهون والبروتينات والجليكوجين والكربوهيدرات) عند يرقات 2L و 3L لـ *T. pallescens* التي تم تقييمها تحت تأثير الزيوت الأساسية لـ *A. herba* ، *T. pallescens* و *alba* و *P. halepensis* أن تظهر احتياطيات الدهون مميزة للغاية مقارنة باحتياطيات الطاقة الأخرى.

الكلمات المفتاحية: المرقمات الحيوية للطاقة ، الديناميات السكانية ، العوامل اللاأحيائية ، الزيوت العطرية ، القنب الهندي ، الإمكانات القاعية لليرقات ، جودة الفيتوكيميائية ، الثيمتوبويا بيتيوكامبا.

REMERCIEMENTS

Cette thèse est non seulement l'aboutissement d'un long parcours mais aussi celui d'un réel travail d'équipe. Pour ces deux raisons, j'aimerais n'oublier personne au cours de ces quelques lignes.

Mes premiers remerciements s'adressant au DIEU de m'avoir donné la foi, la force, la patience, et le courage pour réaliser ce travail.

Toute ma reconnaissance va à la personne la plus importante dans la réalisation de cette thèse est sans aucun doute mon promoteur Pr DJAZOULI Z.E., pour la qualité de son encadrement et pour les précieuses corrections apportées à ce manuscrit. Je l'en remercie chaleureusement pour ses encouragements, ses orientations, ses chers conseil, son soutien indéfectible et pour sa disponibilité quand j'avais besoin de lui

Mes vifs remerciements vont au Pr BENRIMA-GUENDOZ A. qui me fait l'honneur de présider le jury. Je teins également a remercie Pr CHABOUTI-MEZIOU N., Pr KARA-TOUMI F.Z., D^r ACHEUK F. et D^r KHALDI M. qui ont accepté de participer a ce jury et d'examiner cette thèse.

J'aimerais aussi remercier tous mes amis qui m'ont accompagné et soutenu. Enfin, je remercie spécialement, M^{me} BABA AISSA K., M^r MOUSSAOUI K., M^{me} REMINI L., D^r BRAHIMI L., du fond du cœur tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, pour leur soutien incroyable, leur patience et leur présence affectueuse à mes côtés jusqu'à la dernière minute.

Je voulais remercie amplement tout le personnel des laboratoires de Phytopathologie et de biologie végétale qui était toujours disponible.

J'exprime ma profonde gratitude et mes vifs remerciements à toute l'équipe de conservation des forêts de la wilaya de Bordj Bou Arreridj pour ses précieuses aides et conseils en particulier M^{me} BENTATA N., M^r AMARA O. et M^r RAMACHE S. Ainsi que Mr SAOUD N. de la Direction Générale des Forêts d'Alger pour son aide.

Je tiens à remercier tous ceux qui d'une manière ou d'autre ont contribue a la réalisation de ce travail.

MERCI

TABLE DES MATIERES

RESUME	
REMERCIEMENTS	
SOMMAIRE	
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE	16
CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	19
1. Les interactions plantes-insectes	19
1.1. Introduction	19
1.2. L'herbivorie par les insectes	20
1.3. Importance de l'alimentation pour les insectes	21
1.3.1. Éléments nutritifs	21
1.3.2. Balance nutritionnelle et allocation des réserves énergétiques	22
1.3.2.1. Réserves énergétiques considérées comme biomarqueurs	24
1.4. Réponses de la plante face aux bioagresseurs	27
1.4.1. Rôle des métabolites secondaires	29
1.4.2. Les défenses structurales	32
1.4.3. Les défenses chimiques	32
2. Modèle d'étude : la chenille processionnaire du pin <i>Thaumetopoea pityocampa</i> (Denis & Schiffermuller, 1775)	33
2.1. Classification systématique	33
2.2. Cycle de développement	34
2.3. Bioécologie et particularités du cycle de la chenille processionnaire du pin	38
2.3.1. Plante hôte <i>Pinus halepensis</i> (Mill., 1768)	38
2.3.2. Facteurs écologiques influençant le développement de la chenille	39
2.3.2.1. Ensoleillement et radiation solaire	39
2.3.2.2. Température	39
2.4. Répartition géographique de la <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	40
2.5. Conséquences environnementales et dégâts forestiers	42
2.5.1. Conséquences écologiques	42
2.5.2. Conséquences économiques	43
2.6. La lutte contre la chenille processionnaire du pin	43
2.6.1. La lutte biologique	43
2.6.2. Lutte mécanique	44
2.6.3. La lutte sylvicole	44
2.6.4. La lutte chimique	44
2.7. Utilisation des huiles essentielles dans la lutte contre les bioagresseurs	45
2.7.1. Toxicité des huiles essentielles	47
2.7.2. Activités biologiques des huiles essentielles	47
2.7.2.1. Activité insecticide	47
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES	51
2.1. Situation géographique de la région d'étude	51
2.1.1. Présentation des zones d'étude	51
2.1.2. Synthèse climatique de la région d'étude	52
2.1.2.1. Diagramme Ombrothermique	54

2.1.2.2. Étage bioclimatique (Climagramme d'EMBERGER)	55
2.1.3. Mise en place des stations d'observation	57
2.2. Modèle biologique	58
2.2.1. Observation du cycle biologique	59
2.2.1.1. Piégeage des adultes	59
2.2.1.2. Eclosion des pontes et phénologie larvaire	59
2.2.2. Enquête sur les infestations	59
2.3. Échantillonnage sur terrain	60
2.4. Mesures réalisées et méthodes d'analyses au laboratoire	62
2.4.1. Elevage du modèle biologique	62
2.4.2. Préparation des différents types de traitements appliqués	63
2.4.2.1. Extraction des huiles essentielles	63
2.4.2.2. Caractérisation des huiles essentielles étudiées par GC-MS	64
2.4.2.3. Dilutions des huiles essentielles étudiées et présentation du témoin positif	64
2.4.2.4. Application des traitements	65
2.5. Méthodes d'estimation de certains paramètres populationnels	66
2.5.1. Estimation du taux de mortalité	66
2.5.1.1. Calcul du pourcentage de la mortalité observée	66
2.5.1.2. Calcul du pourcentage de la mortalité corrigée	66
2.5.1.3. Calcul du pourcentage des populations résiduelles	67
2.6. Calcul des DL ₅₀	67
2.7. Dosages biochimiques chez les chenilles	68
2.7.1. Dosages des protéines	68
2.7.2. Dosage des lipides et des glucides	68
2.7.2.1. Dosage des lipides	69
2.7.2.2. Dosage des sucres	69
2.8. Dosages phytochimiques des aiguilles du Pin d'Alep	69
2.8.1. Extraction et dosage des polyphénols	70
2.8.2. Extraction et dosage des flavonoïdes	70
2.8.3. Extraction et dosage des Tanins condensés	71
2.8.4. Extraction et dosage des Sucre totaux	71
2.9. Analyses statistique	71
CHAPITRE 3 : RESULTATS	73
3.1. Dynamique temporelle des formes biologique de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> Schiff.	74
3.1.1. Ordre d'arrivée écologique des formes biologiques de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> dans les stations d'étude durant les campagnes 2015-2016/2016-2017	78
3.1.2. Effet des températures et du rayonnement solaire sur les fluctuations annuelles de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	81
3.1.3. Modèle d'ajustement et d'optimisation relative aux formes biologique de la chenille processionnaire du pin en fonction des facteurs climatiques étudiés	83
3.2. Stratégie de choix de l'emplacement des nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin	85
3.2.1. Effet des facteurs abiotique sur l'abondance des nids d'hiver	85
3.2.1.1. Influence des stations sur la disponibilité des nids d'hiver	87

3.2.1.2. Effet de l'altitude sur le nombre de nids	88
3.2.1.3. Tendance de l'abondance et positionnement des nids d'hiver selon les directions cardinaux	88
3.2.2. Tendance de la disponibilité des nids d'hiver de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> Schiff sous l'effet des facteurs climatiques	89
3.3. Incidence de la composition en composés phénoliques de la plante hôte <i>Pinus halepensis</i> sur les attaques de la chenille <i>Thaumetopoea pityocampa</i> Schiff. Dans les trois stations étudiées	91
3.3.1. Incidence des attaques de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> Schiff sur la composition phytochimique des aiguilles de la plante hôte <i>Pinus halepensis</i> dans la station de Bordj Bou Arreridj	92
3.3.2. Incidence des attaques de la chenille <i>Thaumetopoea pityocampa</i> Schiff sur la qualité des composés terpéniques (huiles essentielles) des aiguilles de la plante hôte <i>Pinus halepensis</i> dans la station de Bordj Bou Arreridj	93
3.4. Evaluation de l'activité insecticide des huiles essentielles de <i>Thymus palleescens</i> , <i>Artemisia herba alba</i> et <i>Pinus halepensis</i> sur les stades larvaires L ₂ et L ₃ de <i>Thaumetopoea pytiocampae</i> Schiff.	95
3.4.1. Caractérisation des huiles essentielles étudiées	95
3.4.2. Estimation de la mortalité observée sur les larves L ₂ et L ₃ de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	98
3.4.3. Evolution temporelle de la mortalité corrigée des larves L ₂ de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> sous l'effet des différents types de traitements à base des huiles essentielles de thym, d'armoise et de pin comparé à un insecticide chimique	101
3.4.4. Effet des différents traitements sur les populations résiduelles de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	105
3.4.5. Détermination de la DL ₅₀ après 24h d'exposition aux huiles essentielles étudiées	107
3.5. Effet des huiles essentielles appliquées sur la stratégie évolutive des larves de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> traduite par la fluctuation de ses allocations énergétiques	109
3.5.1. Intersection en réserves énergétiques des larves de <i>T. pityocampa</i> sous l'effet des huiles essentielles étudiées	109
3.5.2. Fluctuation des réserves énergétiques des deux stades larvaire de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> sous l'effet des huiles essentielles étudiées	111
3.5.3. Tendance des teneurs réserves énergétiques sous l'effet des différents traitements appliquées sur les larves L ₂ et L ₃ de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	115
CHAPITRE 4 : DISCUSSION GÉNÉRALE	117
4.1. Variables climatiques et dynamique temporelle et ordre d'arrivée écologiques des formes biologiques de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> Schiff.	118
4.2. Stratégie de choix du positionnement des nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin	123
4.3. Incidence de la composition phytochimique sur l'attaque de la chenille <i>Thaumetopoea pytiocampae</i> Schiff.	125
4.3.1. Incidence de la composition en composés phénoliques de la plante hôte <i>Pinus halepensis</i> sur les attaques de la chenille <i>Thaumetopoea pityocampa</i> Schiff. Dans les trois stations étudiées	125
4.3.2. Incidence des attaques de la chenille <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	127

Schiff sur la qualité des composés terpéniques (huiles essentielles) des aiguilles de la plante hôte <i>Pinus halepensis</i> dans la station de Bordj Bou Arreridj	
4.3. Caractérisation des huiles essentielles de <i>Thymus palleescens</i> , <i>Artemisia herba alba</i> et <i>Pinus halepensis</i> et évaluation de leur toxicité et activité insecticide sur les larves L ₂ et L ₃ de <i>Thaumetopoea pytiocampae</i> Schiff.	131
4.4. Evaluation de l'effet toxique des huiles essentielles et de l'insecticide chimique appliqué sur les traits de vie biochimiques des larves de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	136
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	143
REFERNCES BIBLIOGRAHIQUES	147
ANNEXES	187

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Représentation du flux d'énergie au sein d'un organisme	23
Figure 1.2. : Evaluation de la qualité de l'environnement par une approche globale chimique et biologique	25
Figure 1.3. : Catégorie de la défense directe de la plante contre les insectes herbivores	28
Figure 1.4 : Voies principales de synthèse des composés secondaires chez les plantes supérieures.	30
Figure 1.5 : Les métabolites secondaires produits par les plantes suite à des agressions biotiques et/ou abiotiques	31
Figure 1.6: Les aspects morphologiques des différentes espèces du genre <i>Thaumetopoea</i> ; (a) <i>T. pinivora</i> ; (b) <i>T. pityocampa</i> ; (c) <i>T. processionea</i> ; (d) <i>T. herculeana</i> ; (e) <i>T. solitaria</i> ;	34
Figure 1.7: Le cycle de vie de la processionnaire du pin	36
Figure 1.8: Stades de développement de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> Schiff.	37
Figure 1.9 : Cycle de vie de la processionnaire du pin en fonction du type de climat.	38
Figure 1.10 : Répartition mondiale de la chenille processionnaire du pin d'Alep	41
Figure 1.11: Distribution de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> en Algérie en relation avec la distribution des espèces conifères	42
Figure 2.1: Situation géographique de la région d'étude	51
Figure 2.2 : Diagramme Ombrothermique de Gaussen pour la région de Bordj Bou Arreridj pour la Période 2007-2017	54
Figure 2.3: Diagramme Ombrothermique de Gaussen pour la région de Bordj Bou Arreridj (2015-2016/2016-2017)	55
Figure 2.4: Localisation de la région de Bordj Bou Arreridj sur le Climagramme D'EMBERGER	56
Figure 2.5: Localisation de la zone d'étude sur la carte de la wilaya de Bordj Bou Arreridj.	57
Figure 2.6. Vue satellitaire des trois stations d'études	58
Figure 2.7: Les manchons des pontes récoltés sur aiguilles (a) et sur rameaux (b)	60
Figure 2.8 : Pré-nid et Nid d'hiver	61
Figure 2.9: Triage des chenilles selon le stade larvaire	62
Figure 2.10 : Elevage des larves de la chenille processionnaire du pin	62
Figure 2.11: Dispositif d'extraction par hydrodistillation (Appareil de type Clevenger)	63
Figure 2.12 : L'insecticide conventionnel (Lambda-cyhalothrine 5%)	65
Figure 2.13 : Schéma récapitulatif de la logique des traitements appliqués sur les larves de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> .	66

Figure 3.1: Evolution temporelle de l'abondance globale des différentes formes biologiques de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> dans les stations étudiées pour deux campagnes	75
Figure 3.2 : Présentation de la structure temporelle des formes biologiques au niveau des sites d'étude durant deux campagnes	78
Figure 3.3 : Effet des paramètres climatiques sur les variations d'abondances des formes biologiques de la Chenille <i>Thaumetopoea pityocampa</i> en 2016 et 2017.	83
Figure 3.4 : Nombre de nids de la chenille processionnaire chez <i>Pinus halepensis</i> dans les trois stations étudiées.	87
Figure 3.5 : Nombre de nids de la chenille processionnaire chez <i>Pinus halepensis</i> par arbre par rapport à l'altitude.	88
Figure 3.6 : Projection des abondances des nids d'hiver selon les directions cardinaux sur les deux axes de l'ACP	89
Figure 3.7 : Projection des composés phénoliques du pin d'Alep <i>Pinus halepensis</i> selon l'état phytosanitaire	91
Figure 3.8 : Les constituants des huiles essentielles de <i>Thymus pallescens</i> , <i>Artemisia herba alba</i> et <i>Pinus halepensis</i> identifiées	98
Figure 3.9 : Evolution temporelle du taux de mortalité observée des larves L ₂ et L ₃ de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> sous l'effet des différents types de traitements	100
Figure 3.10 : Variation de la mortalité corrigée des larves L ₂ de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> sous l'effet des différentes huiles essentielles appliquées à trois doses en comparaison avec un insecticide conventionnel	102
Figure 3.11: Variation de la mortalité corrigée des larves L ₃ de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> sous l'effet des différentes huiles essentielles appliquées à trois doses en comparaison avec un insecticide conventionnel	104
Figure 3.12 : Evolution temporelle des populations résiduelles de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> sous l'effet des différentes huiles essentielles appliquées à trois doses en comparaison avec un insecticide conventionnel	106
Figure 3.13 : Projection des réserves énergétiques des larves L ₂ et L ₃ de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> sous l'effet des huiles essentielles étudiées	110
Figure 3.14a : Variation des taux des réserves lipidiques et protéiques chez les larves L ₂ et L ₃ de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	112
Figure 3.14b : Variation des taux des réserves glucidiques et glycogéniques chez les larves L ₂ et L ₃ de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	114
Figure 3.15 : Projection des teneurs des réserves énergétiques des deux stades larvaires de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> sous l'effet des différents traitements étudiés sur les deux axes de l'ACP	116

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Variations mensuelles des températures et de la pluviométrie dans la région de Bordj Bou Arreridj durant les périodes 2015-2016 / 2016-2017.	53
Tableau 2.2: Variations mensuelles des températures et de la pluviométrie dans la région de Bordj Bou Arreridj durant la période 1987-2017.	53
Tableau 3.1: Résultat du test ANOVA associé au test de Tukey (Groupes homogènes) concernant les abondances mensuelles moyennes des individus durant les deux campagnes, avec un intervalle de confiance à 95%.	76
Tableau 3.2: Résultat du test ANOVA associé au test de Tukey (Groupes homogènes) concernant l'abondance globale dans les trois stations durant les deux campagnes de suivi, avec un intervalle de confiance à 95%.	76
Tableau 3.3: Ordre d'arrivée écologique des formes biologique de la Chenille <i>T. pityocampa</i> par station durant deux campagnes (2015-2016/2016-2017).	80
Tableau 3.4: Présentation des équations d'estimation des abondances formes biologique de la chenille processionnaire du pin en fonction des facteurs climatiques durant la campagne 2015-2016.	84
Tableau 3.5: Présentation des équations d'estimation des abondances formes biologique de la CPP en fonction des facteurs climatiques durant la campagne 2016-2017.	58
Tableau 3.6: Valeurs moyennes de la hauteur des arbres, le nombre denids d'hiver, position des nidspar rapport à la hauteur de l'arbre et l'orientation cardinale des nids.	86
Tableau 3.7: Relation entre les facteurs climatiques et l'abondance des nids d'hiver de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> Schiff.	90
Tableau 3.8: Les teneurs moyennes de l'accumulation des Polyphénols et flavonoïdes des aiguilles des arbres de <i>Pinus halepensis</i> Mill. dans les trois stations étudiées.	92
Tableau 3.9 : Test de Tukey appliqué aux teneurs moyennes des Polyphénols et flavonoïdes des aiguilles des arbres sains et attaqués de <i>Pinus halepensis</i> Mill. dans les trois stations étudiées.	92
Tableau 3.10 : Test de Tukey appliqué aux teneurs moyennes des Polyphénols, flavonoïdes, tanins et sucres totaux des aiguilles des arbres sains et attaqués de <i>Pinus halepensis</i> Mill. dans la station de Bordj Bou Arreridj.	93
Tableau 3.11: Composition chimiques (par familles) de l'essentielle des aiguilles de <i>Pinus halepensis</i> obtenus des arbres sains et attaqués.	94
Tableau 3.12 : Composition chimiques des composants majoritaires des huiles essentielle des aiguilles de <i>Pinus halepensis</i> obtenus des arbres sains et attaqués	94

Tableau 3.13: Composition chimiques (par familles) des l'huiles essentielles de <i>Thymus pallescens</i> , <i>Artemisia herba alba</i> et <i>Pinus halepensis</i> .	95
Tableau 3.14 : Pourcentages des principaux constituants de l'huile essentielle d' <i>Artemisia herba alba</i> .	96
Tableau 3.15 : Pourcentages des principaux constituants de l'huile essentielle de <i>Thymus pallescens</i> .	96
Tableau 3.16 : Pourcentages des principaux constituants de l'huile essentielle de <i>Pinus halepensis</i>	97
Tableau 3.17 : Activité larvicide des huiles essentielles de <i>Thymus pallescens</i> , <i>Pinus halepensis</i> , <i>Artemisia herba alba</i> et de l'insecticide chimique sur les larves L ₂ et L ₃ de <i>Thaumetopoea. Pityocampa</i> après 24h d'exposition (mortalité moyenne (%) \pm SE).	108

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La forêt représente un élément intégral et principal de la vie de la planète, de l'environnement, réservoir génétique précieux et source de revenus appréciables. Dans ce contexte, elle doit être gérée et développée dans un but d'assurer la durabilité du bien-être social et économique [1]. En Algérie, les forêts de Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) couvrent plus de 850.000 hectares. Cette espèce qui est présente dans tous les étages bioclimatiques, depuis le littoral jusqu'à l'Atlas saharien, trouve son optimum de croissance essentiellement en zone semi-aride. Sa grande plasticité et son tempérament robuste ont fait d'elle une essence pionnière des grands reboisements [2]. Comme toute forêt du bassin méditerranéen, celle de Pin d'Alep a subi depuis des siècles d'intenses pressions humaines (défrichements, coupes illicites, incendies, pâturages) causant ainsi la déforestation et la régression du couvert végétal [3 ; 4]. A cela s'ajoutent divers problèmes sanitaires d'origine abiotique ou biotique [5].

La chenille processionnaire du pin (Denis & Schiffermüller, 1775) (Lepidoptera: Notodontidae), est le principal défoliateur des forêts de pins en Méditerranée [6, 7, 8] (Europe et Afrique du Nord). Ces larves (chenilles) en nombres importants se nourrissent d'aiguilles de pin tout au long de l'hiver. Elles peuvent sévèrement défolier des arbres, entraînant une perte de croissance, affaiblir les arbres et les rendre plus vulnérables aux attaques d'autres parasites ou maladies ou au stress environnemental causé par la sécheresse, [9 ; 10 ; 11 ; 12 ; 13]. Cet organisme nuisible représente également une menace pour la santé publique car les chenilles libèrent des soies urticantes, provoquant des réactions allergiques chez l'homme et les animaux domestiques [14]. On rencontre ce ravageur dans tous les pays de la méditerranée occidentale [15] et se répand actuellement dans les latitudes supérieures probablement en réponse au changement climatique avec des températures hivernales croissantes [16;17]. Les chenilles sont capables de s'adapter afin de compenser d'éventuelles variations climatiques, comme l'illustre la construction et l'orientation du nid d'hiver, permettant d'allier effet de masse (atténuation de fortes variations de température par regroupement de nombreux individus) et insolation maximale [18]. Des mesures de surveillance et de lutte des ravageurs sont donc nécessaires régulièrement, afin d'assurer l'évolution de la détection et l'atténuation des risques potentiels pour les forêts et la santé publique [19; 20].

En Algérie, cet insecte ravageur est présent dans l'ensemble des forêts résineuses. Les attaques massives sont apparues après les grands efforts de reboisement dans le cadre de "barrage vert". En effet la monoculture exclusive à base du Pin d'Alep, a engendré une explosion démographique des populations de cette chenille par rapport à d'autres insectes ravageurs [21]. Plusieurs travaux ont été réalisés en Algérie portant sur plusieurs aspects à savoir la systématique, l'écologie, les dégâts et les moyens de lutte contre cet insecte [22 ; 23], ainsi que

la lutte biologique contre *T. pityocampa* Schiff., par Bahakemi et Saadi [24]. Fekroun et Chabira [25]. La lutte contre la chenille processionnaire du pin a pour principal objectif de maintenir les populations à des niveaux tolérables, afin de protéger la santé humaine et animale ainsi que les peuplements forestiers, mais n'a pas pour finalité son éradication [26]. En raison de son efficacité et de son application facile et pratique, l'utilisation des produits chimiques constitue à l'heure actuelle la technique la plus utilisée pour lutter contre les organismes nuisibles [27]. Cependant, l'emploi intensif et inconsidéré de ces produits a provoqué une contamination de la biosphère et de la chaîne alimentaire, une éradication des espèces non cibles telles que la faune auxiliaire et l'apparition des organismes résistants. Ces conséquences négatives ayant pour résultat l'attention croissante étant donnée aux produits naturels [28 ; 29]. En effet, de nouveaux produits sont recherchés pour, d'une part, assurer une protection efficace de la production agricole, et d'autre part, contribuer à une gestion durable de l'environnement [30]. À tous ces inconvénients s'ajoute aussi un grand problème de développement de résistance aux insecticides chimiques, chez les insectes traités.

Par ailleurs, pour assurer une meilleure intervention, tout en préservant au maximum le milieu naturel, de nouvelles méthodes préventives ainsi que de nouveaux produits sont constamment recherchés [31 ; 32]. La protection des plantes contre les organismes nuisibles sans l'inconvénient des pesticides de synthèse, exige la recherche d'autres méthodes alternatives, en protection phytosanitaire [33 ; 34]. Ainsi, pour contribuer à une gestion durable de l'environnement, la mise en place de nouvelles alternatives de contrôle des ravageurs est davantage encouragée, le monde scientifique s'est mis à la recherche d'un produit biodégradable, plus sélectif que les substances chimiques et sans danger pour les plantes, les animaux et les humains. Les biopesticides représentent une bonne alternative aux produits chimiques [35 ; 36 ; 37]. Les substances naturelles qui présentent un large spectre d'action comme bactéricides, fongicides, acaricides, insecticides etc., peuvent aussi être utilisées comme pesticides de remplacement [38]. L'un des outils permettant la réduction des pesticides à usage agricole et promu aussi par l'utilisation de produits phytosanitaires d'origine biologique [39].

Les biopesticides représentent une bonne alternative aux produits chimiques [35 ; 36 ; 37]. Dans le domaine phytosanitaire et agro alimentaire, les huiles essentielles ou leurs composés actifs pourraient également être employés comme agents de protection contre organismes phytopathogènes et les microorganismes envahissant la denrée alimentaire [40]. Les produits considérés comme des biopesticides par les agences de réglementation européennes et mondiales sont d'origines diverses. Ils peuvent être classés en trois grandes catégories, selon leur nature : les biopesticides microbiens, les biopesticides végétaux et les biopesticides animaux [41 ; 42]. En raison de la conjoncture actuelle, les biopesticides d'origine botanique sont appelés à un avenir meilleur, car la

demande en produits phytosanitaires sans danger, de faible rémanence et qualifiés de produits verts est actuellement en hausse. Les substances d'origine végétale ont toujours constitué une source majeure pour l'élaboration de nouvelles substances aux propriétés thérapeutiques [33 ; 34 ; 43 ; 44].

Dans ce contexte, l'exploration dans ce cas, nous a permis de partager cette étude en deux grandes parties :

(i) Une partie qui s'est focalisée sur l'évaluation de certains paramètres abiotiques (les directions cardinaux et l'altitude ainsi que l'influence des facteurs climatiques) pour déterminer la stratégie de choix de l'emplacement des nids d'hiver de la chenille processionnaire *T. pityocampa* et de mettre en évidence l'incidence des attaques de la chenille sur la composition afin d'essayer de comprendre les relations plante hôte et ravageur.

(ii) L'autre partie s'est consacrée à la mise en valeur des espèces spontanées aromatiques du tiroir et de rationaliser l'utilisation des bioproduits. Dans cette optique, l'activité insecticide et la toxicité (DL₅₀) des huiles essentielles de *Thymus palleescens*, *Artemisia herba alba* et *Pinus halepensis* en comparaison avec un insecticide conventionnel (Lambda-cyhalothrine) ont été évaluées sur deux stades larvaires (L₂ et L₃) de *Thaumetopoea pytiocampae* Schiff. Également, Nous nous sommes intéressés à la stabilité écologique de la cohorte larvaire par estimation des traits de vie biochimiques, notamment les réserves énergétiques, par l'analyse de leurs remaniements en fonction des types et des doses des traitements.

CHAPITRE 1

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Les interactions plantes-insectes

1.1. Introduction

Les interactions entre les plantes et les insectes phytophages reposent sur trois niveaux trophiques et sont régies par un grand nombre de stimulus chimiques impliquant les métabolites primaires et secondaires de défense des plantes hôtes [45]. Les insectes recourent à des signaux chimiques dans la détection de la nourriture, du site d'oviposition, dans l'établissement de relations interindividuelles, sociales et sexuelles, et dans l'appréhension du danger (reconnaissance d'un prédateur, d'une substance toxique) [46 ; 47].

Les insectes s'adaptent par ailleurs aux conditions environnementales des plantes mais aussi aux constituants chimiques perçues en broutant le feuillage, [48]. La plante hôte, comme source de nourriture, joue un rôle déterminant dans la dynamique des populations avec ses composantes nutritives (protéines, acides aminés, glucides, lipides, vitamines, minéraux, eau, etc.) et ses composantes non-nutritionnelles (composés allélochimiques) (phénols, polyphénols, monoterpènes, glucosinolates, alcaloïdes, etc.) [49].

Il est donc important de bien connaître les besoins alimentaires et l'utilisation de la nourriture par l'insecte afin de mieux comprendre son interaction avec l'écosystème et ainsi être plus apte à contrôler ses populations par l'intervention directe et/ou indirecte lorsque celui-ci entre en conflit avec nos intérêts économiques [50 ; 51].

Les insectes représentent les trois-quarts des espèces animales décrites sur la planète avec environ six millions d'espèces à l'heure actuelle. Les végétaux (environ 300 000 espèces) représentent, quant à eux, le groupe d'organismes avec la plus forte biomasse. Ainsi, les communautés d'insectes et de végétaux jouent un rôle primordial dans le fonctionnement de la biosphère [52].

Mêlant à la fois la complexité des plantes et la variété du monde des insectes, les interactions entre plantes et insectes est un domaine extrêmement riche [53]. Les plantes et les insectes coexistent depuis environ 100 millions d'années et ont développé une importante variété d'interactions bénéfiques et délétères [54]. Des interactions à bénéfices réciproques (mutualisme) s'expriment par exemple dans le cadre de la pollinisation entomophile où la fécondation croisée des plantes est favorisée par la recherche de nectar par l'insecte [55]. C'est également le cas lorsque qu'une plante produit un nectar attractif pour un insecte capable d'éliminer

ses compétiteurs, comme cela a été montré avec le Mimosa ou l'Acacia chez les fourmis [56].

Les plantes sont attaquées et endommagées par des insectes antagonistes qui en consomment différentes parties (feuilles, racines, fleurs, fruits...) de façon plus ou moins sélective selon les espèces. L'intensité des dommages causés à la plante dépend du type et de la fréquence des attaques ainsi que du stade de développement de la plante au cours duquel elles se produisent [57]. L'étude des interactions plantes-insectes représente donc des enjeux scientifiques et sociétaux particulièrement importants puisqu'elles affectent la distribution et l'abondance des plantes, et par conséquent le fonctionnement et la diversité biologique des écosystèmes [58].

1.2. L'herbivorie par les insectes

La classe des insectes, découpée en de très nombreux ordres, représente près de la moitié des espèces vivantes recensées au monde et près des trois quarts de celle du monde animal [59]. Si un million d'espèces a déjà été décrites, il en resterait près de 30 millions encore inconnus, présents dans toutes les zones du globe et sous tous les climats. Les insectes herbivores, spécialistes ou généralistes, représentent 50 % des insectes décrits à l'heure actuelle.

Les réponses des plantes-hôtes impliquent des protections mécaniques ou structurales se traduisent par la production d'épines, pilosité, ou renforcements des parois cellulaires...) [60 ; 61 ; 62] ou de substances ayant un impact négatif sur les insectes phytophages (cires, latex, résine, feuilles riches en silice mucilage...) [61] ou chimiques qui repose sur l'utilisation de métabolites secondaires. Les végétaux produisent une très grande quantité de ces métabolites secondaires et donc ont de multiples possibilités en termes de défense chimique. Ces métabolites peuvent être de différentes classes : terpénoïdes, stéroïdes, alcaloïdes, glucosinolates, glycosides cyanogénique, phénols, etc...[63] qui réduisent l'appétence ou la digestibilité de la partie consommée ou accroissent sa toxicité [58].

Enfin, les plantes attaquées peuvent attirer indirectement les ennemis naturels de l'insecte herbivore par les substances chimiques émises. La combinaison des défenses directes et indirectes offre à la plante une résistance durable dans l'écosystème [64]. La composition et la dynamique des communautés d'insectes herbivores sont donc largement influencées par les traits des végétaux : métabolisme secondaire, biomasse et architecture de la plante, morphologie du feuillage, valeur nutritionnelle de la plante en termes d'eau et de nutriments [52]. Les insectes utilisent des stratégies alimentaires différentes pour obtenir les nutriments nécessaires à leur développement. Bien que tous les insectes phytophages infligent des dégâts sur les tissus végétaux, la quantité et la qualité des dégâts varient grandement selon les guildes trophiques. Les insectes

généralistes (i.e. polyphages) se nourrissent sur plusieurs hôtes appartenant à différentes familles, et sont généralement plus sensibles aux mécanismes de défense de la plante. Les insectes spécialistes (i.e. monophages et oligophages) sont, quant à eux, restreints à une ou quelques plantes de la même famille [64], et utilisent les composés chimiques émis par la plante pour leur propre défense [52].

Les insectes herbivores, du fait de leur durée de vie relativement courte, doivent être capables de chercher puis de sélectionner leur ressource trophique ou celle de leur progéniture avec efficacité. Des comportements de recherche mal adaptés à certaines conditions climatiques ou à une présence importante de prédateurs ne permettront pas une sélection efficace de la plante-hôte. La sélection de plantes hôtes par les insectes phytophages est en grande partie déterminée par les insectes adultes qui choisissent le lieu de développement des descendants [65]. Chez de nombreuses espèces, les stades immatures ne changent pas de plantes-hôtes ou de localisation au sein de la plante-hôte durant leur développement. Par conséquent, la quantité et la qualité de la nourriture disponible pour leur développement mais aussi les conditions écologiques environnantes résultent du choix des parents (généralement la mère) [66]. La décision d'un insecte pour accepter ou rejeter son hôte est déterminée par l'existence de mécanismes de défense directs et/ou indirects développés par la plante [67].

Quand ces plantes-hôtes diffèrent dans leur qualité pour le développement des insectes phytophages, la théorie évolutive prédit une relation positive entre le choix du site de ponte par la femelle et la performance des descendants : c'est l'hypothèse de « préférence-performance » [59]. Cette hypothèse est basée sur la capacité des insectes à classer les plantes-hôtes selon des critères de préférence d'un point de vue nutritionnelle et/ou refuge pour les parents et les descendants et pour éviter les phénomènes de compétition intra- et interspécifique.

1.3. Importance de l'alimentation pour les insectes

1.3.1. Éléments nutritifs

Il existe une forte relation entre les performances de l'insecte et le taux d'azote [68 ; 69 ; 70 ; 71]. Mais si la nourriture ne contient pas ou contient en faible quantité l'un des dix acides aminés essentiels (l'arginine, l'histidine, l'isoleucine, la leucine, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, le tryptophane, la valine) [72], le développement larvaire est affecté quel que soit le taux d'azote total [73].

Le sucre est la principale source d'énergie pour les insectes. Par contre, certaines espèces sont capables de remplacer entièrement les glucides par les lipides ou les protéines. Les acides gras, les phospholipides et les stérols sont des éléments de la membrane cellulaire et peuvent avoir des fonctions spécifiques. Plusieurs

insectes ont besoin d'une source d'acides gras polyinsaturés et de stérols indispensables à leur croissance [74].

Les minéraux comme le potassium, le phosphore et le magnésium sont nécessaires aux fonctions physiologiques de l'insecte [74; 75] de même que pour le fer, le zinc, le manganèse et le cuivre car ils agissent comme catalyseurs de réactions enzymatiques [75]. Les insectes n'ont par contre besoin de calcium et de sodium qu'à l'état de trace. Les vitamines semblent être essentielles aux fonctions physiologiques des insectes. Ces vitamines agissent comme coenzymes des réactions métaboliques et proviennent soit de la nourriture, soit des symbiotes, [74; 76 ; 77]. L'eau peut limiter la croissance des insectes [78; 75].

1.3.2. Balance nutritionnelle et allocation des réserves énergétiques

Les besoins nutritionnels d'un insecte changent avec le temps selon les besoins pour la croissance, la reproduction, la diapause et la migration. Un insecte confronté à un déséquilibre nutritionnel peut essayer de le compenser soit en augmentant son ingestion, soit en changeant la source de nourriture (changement d'hôte, de partie de la plante) ou encore en ajustant son efficacité de conversion de sa nourriture [77; 79]. L'étude de la relation entre l'insecte et son hôte à l'aide des paramètres biologiques généraux (le temps de développement, le poids, la survie) est parfois insuffisante pour comprendre le phénomène de balance nutritionnelle. Les indices nutritionnels permettent donc de mieux comprendre les phénomènes impliqués entre l'intrant, la nourriture, et l'extrait, avec les performances de l'insecte (le temps de développement, le poids, la survie), selon [80 ; 81].

Les insectes ingèrent plus d'une douzaine de nutriments présents en quantité et en ratios variables selon l'âge, le stade de développement et leur statut reproductif. Les insectes sont capables de réguler de manière spécifique leur prise alimentaire. Une balance est en effet requise entre les différents nutriments. Le ratio C/N modifie particulièrement leurs performances. Cette balance peut varier selon que l'insecte est généraliste ou spécialiste [82]. D'un point de vue physiologique, maintenir un tel équilibre nécessite de la part de l'insecte la capacité de percevoir la qualité nutritionnelle de sa source alimentaire *via* des récepteurs spécifiques à certains nutriments clés, et aussi la possibilité d'intégrer des informations internes sur son état nutritionnel («feedback» sur la concentration de l'hémolymphe en tréhalose par exemple) [83]. Le flux d'énergie au sein des organismes peut être évalué à différents niveaux. L'acquisition et l'allocation de l'énergie pour les fonctions de développement, de maintenance, de croissance et de reproduction dépendent de la disponibilité, de l'ingestion et de l'assimilation de la nourriture [84 ; 85] (Figure 1.1).

Les autres coûts, dits de production, regroupent la croissance, le développement et la reproduction. Le cadre général regroupant la dynamique de tous ces

processus et des flux associés suit le principe de l'homéostasie qui s'applique à la masse structurale de l'organisme et ses réserves tout au long de sa vie. La dynamique de l'allocation énergétique varie à l'échelle du corps de l'individu, d'un tissu à l'autre, et au niveau de l'individu, à l'échelle temporelle car la distribution des ressources évolue au cours du temps [85] (Figure 1.1).

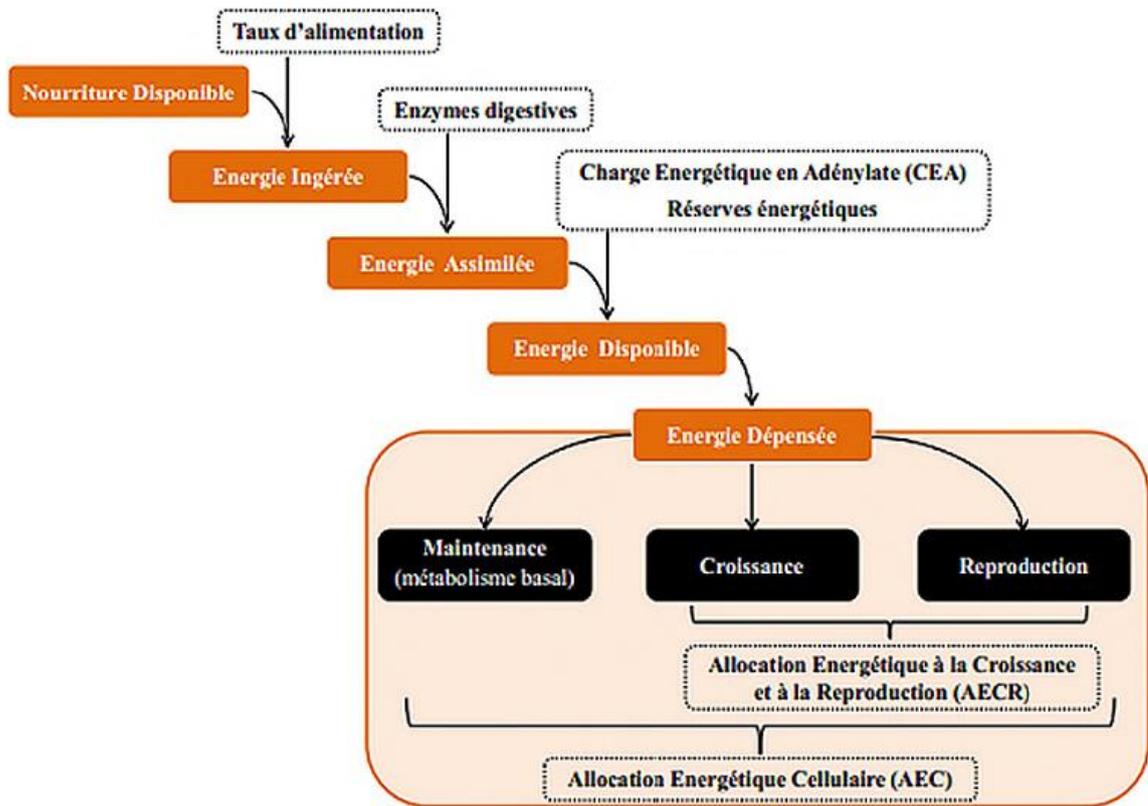


Figure 1.1 : Représentation du flux d'énergie au sein d'un organisme [modifié d'après 84 ; 85]

Les phénomènes d'allocation énergétique présentent également des compromis évolutifs. En effet, plus la quantité énergétique destinée à la reproduction et stockée sous la forme de réserves lipidiques et glucidiques pendant la phase larvaire est élevée, la quantité d'énergie disponible pour la croissance des tissus larvaires est faible. Ces différents traits d'histoire de vie suivent donc un modèle de densité-dépendance au sein duquel la quantité de ressources disponibles joue un rôle déterminant [86 ; 87].

L'allocation énergétique à la croissance et à la reproduction (AECR), l'allocation énergétique cellulaire (AEC), la charge énergétique en adénylate (CEA) ainsi que les réserves énergétiques (glycogène, lipides et protéines) font partie des biomarqueurs énergétiques classiquement étudiés en écotoxicologie [88 ; 89].

Ces éléments sont dépendants des processus d'acquisition de l'énergie, lesquels sont conditionnés en amont par la prise de nourriture et la dégradation de celle-ci.

Ainsi, l'énergie brute sous forme d'aliments glucidiques, lipidiques et protéiques va être ingérée puis transformée en énergie assimilable [90].

D'une manière générale, l'allocation énergétique chez les adultes est en permanence un compromis entre survie et reproduction [91]. Chez les insectes, il est ainsi possible d'opposer la production de « nombreux petits œufs » au « peu de gros œufs » ou encore le caractère « généraliste » au « spécialiste » ou enfin un comportement visant à optimiser la croissance au détriment de l'implication dans l'effort reproducteur [85].

En effet, les perturbations au niveau individuel et infra-individuel ayant le plus de chance d'être liées à des effets aux niveaux d'intégration biologiques supérieures sont celles qui vont affecter directement ou non la « fitness » de l'individu et au-delà, le maintien de la population. Parmi les éléments déterminant le succès reproducteur des organismes, on peut citer l'allocation énergétique nécessaire au maintien du métabolisme basal, à la croissance et à la reproduction. De manière indirecte, nous pouvons également évoquer l'ensemble des processus biochimiques et physiologiques impliqués dans le métabolisme énergétique [92].

1.3.2.1. Réserves énergétiques considérées comme biomarqueurs

Un Biomarqueur est défini comme un changement observable et/ou mesurable au niveau moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique ou comportemental qui révèle l'expression présente ou passée d'un individu à au moins une substance chimique à caractère polluant [93]. L'approche « biomarqueur » peut être illustrée par une relation entre l'état de santé d'un organisme et sa réponse à des concentrations croissantes de contaminants dans son environnement [94 ; 95 ; 96].

L'utilisation simultanée des biomarqueurs spécifiques mesurés à plusieurs niveaux d'organisation biologique, moléculaire, cellulaire, tissulaire et physiologique peut apporter des informations pertinentes en condition de stress sur le mode d'action et les effets des xénobiotiques présents dans le milieu. De plus, les biomarqueurs ne concernent qu'un certain nombre d'individus appartenant à une ou plusieurs espèce(s) sentinelle(s). Ils ne peuvent ainsi présenter une signification écologique que lorsqu'ils sont associés à des études concernant les populations et les communautés. Finalement, seule une approche globale intégrant des analyses chimiques et biologiques (bioindicateurs et biomarqueurs) permet d'évaluer la qualité d'un écosystème et les risques qu'il encourt (Figures 1.2) [97].

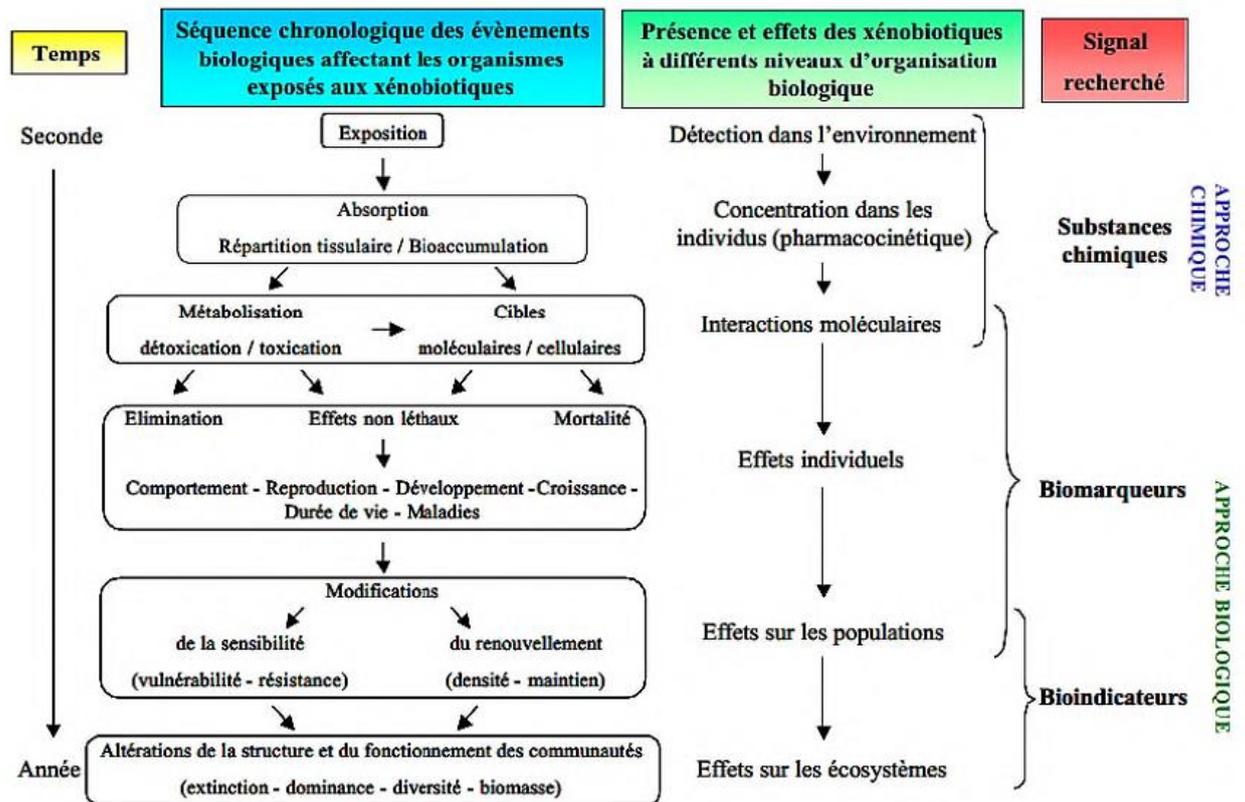


Figure 1.2. : Evaluation de la qualité de l'environnement par une approche globale chimique et biologique [97].

En effet, l'exposition à des stress peut entraîner un déséquilibre de la balance énergétique de l'individu se traduisant par une hausse des dépenses énergétiques pour assurer la survie de l'organisme, au dépend de l'énergie destinée à la croissance et à la reproduction [98]. Plusieurs paramètres en lien avec le métabolisme énergétique et caractéristiques d'un niveau d'organisation biologique peuvent être étudiés et être mis en relation avec des critères macroscopiques représentatifs du maintien (taux de survie), de la croissance (indices de condition) ou de la reproduction (nombre d'embryons) [92].

D'une façon générale, des processus impliqués dans la tolérance ou la résistance au stress entrent en compte quant à la gestion des ressources énergétiques [99 ; 100]. Il a par ailleurs été montré chez de nombreuses espèces d'insectes que les réserves nutritionnelles stockées durant la phase larvaire peuvent être directement réallouées à d'autres fonctions au stade adulte [101]. Ainsi, l'énergie contribuant initialement à la maturation des larves peut en partie être réallouée à la reproduction des adultes [85]. Enfin, certains auteurs pensent que les compromis sont visibles uniquement lorsque les conditions environnementales sont défavorables. En effet, les individus peuvent investir l'énergie de façon maximale dans tous les traits lorsque les conditions sont favorables [101].

Les biomarqueurs peuvent être cependant très sensibles aux facteurs environnementaux abiotiques et biotiques, la présence de micro-habitats ou de relations de compétition ou de prédation au sein des communautés. Ainsi la réponse de chaque niveau d'organisation aux stress s'inscrit sur une échelle de temps : de la réaction enzymatique instantanée à la modification irréversible de l'écosystème [102 ; 103 ; 104].

L'exposition des organismes vivants à des cocktails de polluants est susceptible d'engendrer une perturbation de leur métabolisme énergétique. En effet, les mécanismes de défense vis-à-vis des facteurs de stress environnementaux sont considérés comme métaboliquement coûteux [105], impliquent une diminution de l'énergie disponible en faveur d'autres processus : le métabolisme basal, la croissance et la reproduction [106]. Parmi les biomarqueurs du métabolisme énergétique couramment utilisés [88 ; 107 ; 108 ; 109], on peut citer les réserves énergétiques (Protéines, lipides, sucres).

Il existe trois types de réserves énergétiques : les glucides, les lipides et les protéines. La première source d'énergie, et immédiate, utilisée lors d'un stress correspond généralement aux glucides, et plus particulièrement au glycogène [110]. Les glucides sont stockés essentiellement sous deux formes. La première forme est le glycogène qui est stocké dans les muscles du vol, dans le corps gras et à la périphérie du tube digestif [83]. La seconde forme est le tréhalose qui est facilement convertible en glucose en fonction de la demande énergétique de l'organisme et joue également un rôle important dans la protection contre les stress [74]. Les besoins en glucides varient selon la nature chimique de ces derniers, l'espèce considérée, l'âge et le sexe de l'individu [66 ; 111].

Les lipides sont la seconde source d'énergie utilisée lors d'un stress [112 ; 113]. Les lipides peuvent aussi être mobilisés en premier lorsque la nourriture devient rare [114 ; 115]. Une diminution des concentrations en lipides est généralement observée quand la concentration en glucides devient faible ou quand la demande énergétique est trop forte [116].

Les lipides regroupent les acides gras, mono-, di- et triglycérides, et les stérols. Les acides gras constituent une source énergétique essentielle pour le métabolisme des insectes. Ils sont convertis et stockés sous la forme de triglycérides dans le corps gras (50 % du poids sec du puceron) et sont mobilisés selon les besoins [117 ; 118]. Les acides gras servent à la synthèse des phospholipides membranaires, des cires cuticulaires, de nombreuses phéromones et des composés de défense tels que les quinones ou les phénols [119]. Ils contribuent également aux stratégies d'évitement des prédateurs et / ou à la sélection sexuelle. Les insectes, selon leur alimentation et leur capacité de transformation, sont capables de réaliser des inter-conversions entre les différents stérols qui stimuleraient la phago-stimulation en synergie avec le saccharose. La quantité de stérols est indispensable au développement de l'embryon. En absence

de stérols, une diminution de la fécondité et de la fertilité peuvent être observées [120 ; 121].

Les phytophages utilisent les stérols présents dans leur alimentation sans les transformer ou bien en réalisant des réactions de déalkylations, de réductions et d'isomérisations pour obtenir le cholestérol qu'ils sont incapables de synthétiser, ce qui donne des indications sur l'évolution de la phytophagie [122].

Les protéines sont la dernière source d'énergie utilisée lors d'un stress. Face à un stress, les organismes ont besoin de beaucoup d'énergie pour lutter et se maintenir, et cette énergie peut être stimulée par le catabolisme des protéines [123]. Une diminution de la concentration en protéines peut être due à la formation de lipoprotéines utilisées pour réparer les dommages causés aux organites des cellules et des tissus [124 ; 125] ou peut être attribuée à une diminution de l'activité métabolique générale [126 ; 127]. Cette diminution indique donc une protéolyse qui permet la production d'acides aminés libres. Ces acides aminés vont pouvoir être utilisés par le cycle de Krebs pour fournir de l'énergie ou par la gluconéogenèse pour fournir du glucose. Les lipides et les protéines sont considérés comme de bons indicateurs de l'état nutritionnel et reflètent l'état physiologique des organismes [128 ; 129].

1.4. Réponses de la plante face aux bioagresseurs

L'insecte exploite la plante à son seul bénéfice et la plante subit une déprédation, un dégât préjudiciable à sa physiologie ou son développement. Le dégât direct est une lésion, la destruction d'un ou plusieurs types d'organes (racine, tige, feuille, fleur, fruit...) ou la spoliation de sève lors de la prise alimentaire ou de la ponte. Un dégât indirect correspond à une aggravation de la déprédation par une réaction physiologique (nécrose, malformation, déformation ou avortement d'organes liés à la toxicité de la salive, formation de galle), le développement de micro-organismes dans ou sur la plante (phytopathogènes, saprophytes ou épiphytes) [130 ; 131], ou l'altération du fonctionnement de certains mécanismes physiologiques (photosynthèse par exemple) [48].

L'impact global qu'une espèce d'insecte a sur une plante dépend du préjudice qu'un individu peut occasionner par son comportement alimentaire ou de ponte et de celui résultant de l'action conjuguée d'un groupe d'individus (association avec d'autres espèces comme les champignons, les nématodes, etc...). La nature de l'organe consommé et la quantité consommée par individu caractérisent la déprédation et son impact [57]. Ainsi, l'effet individuel de défoliation sur un arbre par une chenille est négligeable pour la vie de la plante. À l'inverse, la consommation des graines ou fruits des mêmes arbres par d'autres chenilles (tordeuses) ou des larves de charançons est plus importante, car chaque fruit touché par une seule larve ne pourra donner de graines [132, 133]. L'effet déprédateur sur une plante, ou un groupe de plantes dépend du niveau de

population de l'herbivore. Alors que l'effet individuel peut être négligeable, l'effet de groupe peut au contraire être important si l'insecte est capable de pulluler comme c'est le cas les chenilles processionnaires [134], ou si un effet de seuil permet de supplanter les défenses naturelles de la plante (réduction des capacités d'excrétion de résine chez les conifères affaiblis par les attaques massives de scolytes) [135].

La réponse des plantes induite par les phytophages implique l'activation de voies métaboliques permettant des changements physiologiques (Figure 1.3) [136]. Des systèmes de défenses sont mis en place au moment ou peu après le début de l'attaque. Green et Ryan [137] ont mis en évidence ce phénomène en montrant que la consommation des feuilles de tomate ou de pomme de terre par les larves du doryphore *Leptinotarsa decemlineata* induit une rapide accumulation d'inhibiteurs de protéases dans les feuilles de ces plantes. Ces protéines permettent de retarder la croissance des phytophages [138 et 139] et de manière plus générale, d'améliorer la résistance de la plante vis-à-vis du ravageur [140 ; 41]. Les insectes phytophages ne déclenchant pas de réponse chez les plantes attaquées font figures d'exceptions [142].

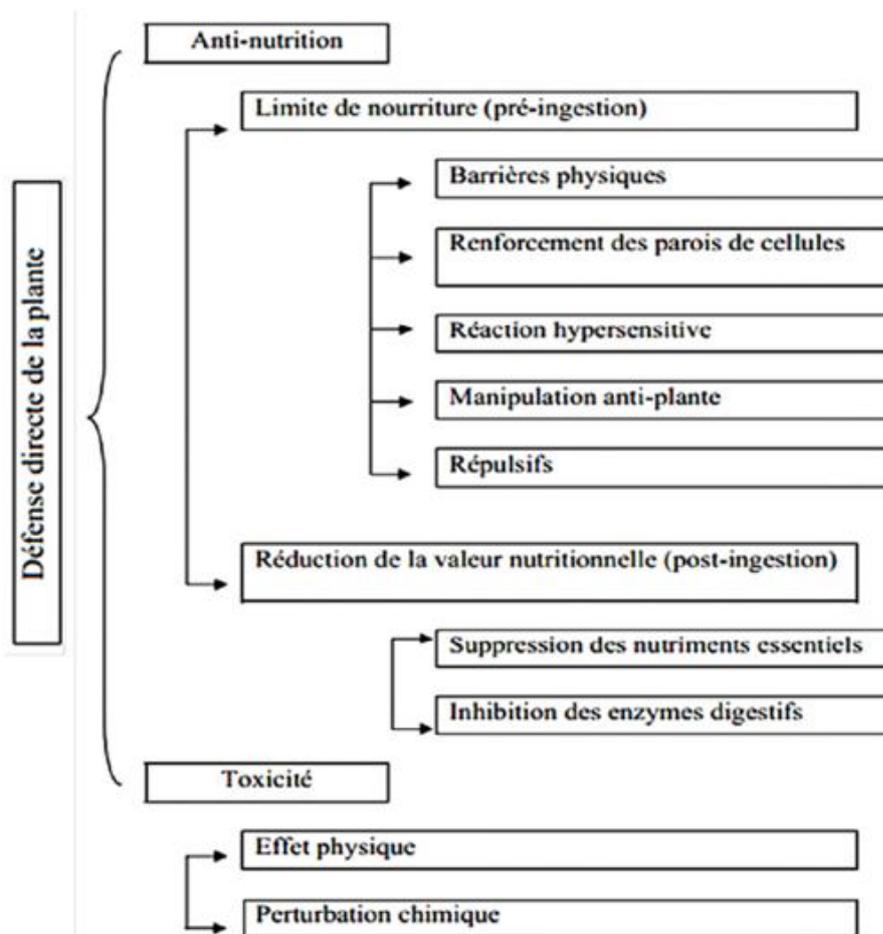


Figure 1.3. : Catégorie de la défense directe de la plante contre les insectes herbivores [143].

1.4.1. Rôle des métabolites secondaires

Les métabolites secondaires participent à l'adaptation de la plante avec l'environnement, ainsi à la tolérance contre les chocs [144]. D'une manière générale, la plupart des composés secondaires (Figure 3.15) agissent sur le comportement d'un grand nombre d'insectes phytophages par des processus de répulsion ou d'anti-appétence et vont ainsi limiter les phénomènes de colonisation de ces plantes par les insectes [145].

L'intensité de l'augmentation des métabolites secondaires végétaux n'est pas toujours identique dans les différents tissus de la plante [142]. En effet, selon la théorie de l'«Optimal Défense» [146 ; 147 ; 148], la concentration des composés secondaires est plus forte au niveau des parties importantes en termes de fitness pour la plante et au niveau des zones présentant de fortes probabilités d'attaques.

Les tannins sont des composés phénoliques qui sont présents dans les végétaux sous forme de polymères ayant des structures plus ou moins complexes [149]. Ils peuvent avoir des effets positifs, négatifs ou neutres sur les herbivores. Pour les insectes affectés négativement, les mécanismes d'action des tannins aboutissent à une réduction de la disponibilité de l'azote nutritionnel [150] et une réduction de la nourriture consommée [151]. De plus, les tannins peuvent exercer un effet toxique direct pour certaines espèces [152].

Les principaux COV sont des allélochimiques libérés en réponse aux attaques des herbivores. Ce sont des monoterpènes, des aldéhydes, de l'éthylène, des alcaloïdes, des flavonoïdes, des terpènes lactones et des phénols [153]. Ces substances sont produites et stockées dans les parois des cellules des feuilles, les vacuoles, des cires ou encore des cellules spécialisées comme les trichomes [154].

Les alcaloïdes sont souvent toxiques et servent principalement d'inhibiteurs de croissance et de phago-dissuadant [155]. Les saponines, qui sont fréquentes chez les plantes notamment au niveau des graines et des racines, exercent dans certains cas des effets toxiques contre les insectes [156].

Deux classes de protéines sont courantes dans le règne végétal pour lutter contre les herbivores : les inhibiteurs de protéases digestives (Figures 3.16) et les lectines [158 ; 159 ; 160]. Beaucoup de plantes répondent à l'attaque des herbivores en activant des gènes de défense dont les produits réduisent la qualité nutritionnelle des protéines ingérées et inhibent les protéases digestives de l'insecte [161]. Lorsque les larves de premier stade se nourrissent de feuilles dans lesquelles les protéines solubles représentent 1 % de la matière fraîche, on observe une mortalité de plus de 60 % des larves après 7 jours et les larves survivantes présentent un retard de croissance de l'ordre de 70 % [162].

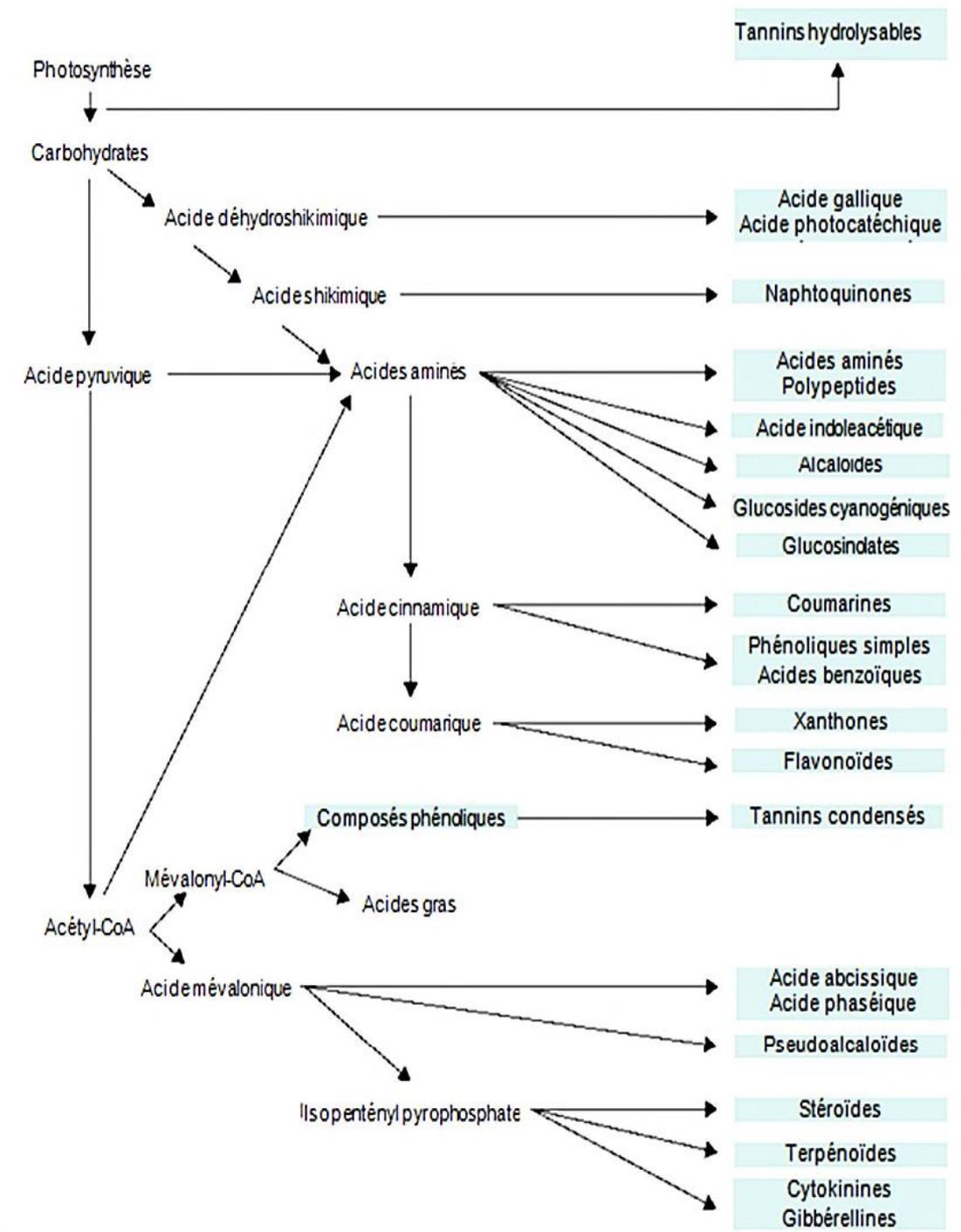


Figure 1.4 : Voies principales de synthèse des composés secondaires chez les plantes supérieures [157].

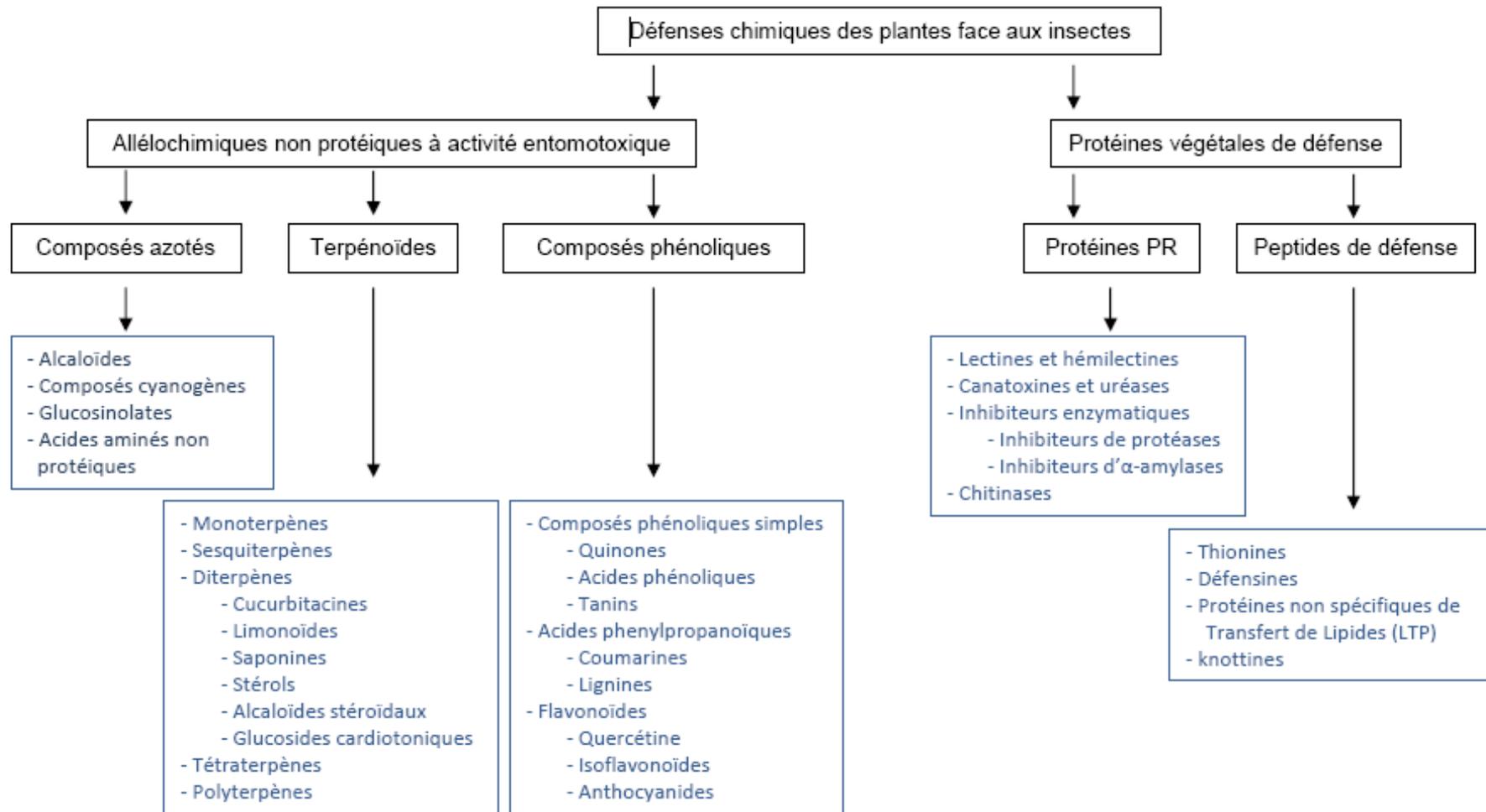


Figure 1.5 : Les métabolites secondaires produits par les plantes suite à des agressions biotiques et/ou abiotiques [160].

1.4.2. Les défenses structurales

La définition de la défense structurale a été donnée par Hanley et al. [61] : “tout trait morphologique ou anatomique qui confère un avantage à une plante en dissuadant directement les herbivores de se nourrir”. Les défenses mécaniques ou structurales se traduisent par la production d’épines, de pilosité ou de renforcements des parois cellulaires [60, 61, 60] ou de substances ayant un impact négatif sur les insectes phytophages (cires, latex, résine, mucilage...) [61]. Ce type de défense structurale est bien souvent constitutive mais de nombreux exemples prouvent qu’elles peuvent également être induites par la présence de ravageurs [163, 60, 164]. Enfin, les défenses structurales des plantes n’ont pas que des effets contre les insectes phytophages, elles peuvent aussi agir comme des barrières contre des stress abiotiques [165 ; 166 ; 167].

1.4.3. Les défenses chimiques

La résistance chimique repose sur l’utilisation de métabolites secondaires. Ces derniers sont des molécules organiques complexes synthétisées par les plantes autotrophes [168]. Ce sont caractérisées généralement par une faible concentration dans les tissus végétaux (généralement quelques pourcents du carbone total, si nous excluons la lignine de cette catégorie) [169]. Aussi n’exercent pas de fonction directe au niveau des activités fondamentales de la plante [170]. Biosynthétisés à partir de métabolites primaires et jouent un rôle majeur dans les interactions de la plante avec son environnement, contribuant ainsi à la survie de l’organisme dans son écosystème [171]. Ces composés secondaires sont souvent considérés comme étant un moyen de défense de la plante productrice contre divers organismes comme les pathogènes et les ravageurs [172]. Ces substances représentent probablement le facteur le plus important contrôlant le comportement des insectes dans la nature et sont tributaires du cycle phénologique et des attaques dus aux ravageurs [173]. Elles se rencontrent sous forme de composés allélochimiques et/ou certains inhibiteurs de protéases [174] et déclenchent chez l’insecte des réponses comportementales. Elles peuvent être attractives, répulsives (anti-appétantes) ou toxiques [175]. D’après leur biosynthèse, les métabolites secondaires peuvent être divisés en quatre classes : Polyphénols ; terpénoïdes; stéroïdes et alcaloïdes [176].

Les principaux sucres solubles qui sont à la base des différents processus contrôlant la vie d’une plante et accumulés sous stress sont : le glucose, le fructose et le saccharose [177]. Depuis longtemps, il est connu que le taux de ces sucres augmente considérablement chez des plantes soumises aux différents types de stress [178; 179]. L’un des effets majeurs du déficit hydrique est qu’il affecte le métabolisme des hydrates de carbones, [180] en relation directe avec plusieurs processus physiologiques tels que : la photosynthèse, la translocation et la respiration, [181].

Par ailleurs, il a été observé que sous stress hydrique, les réserves amylacées sont progressivement utilisées suite à leur conversion rapide en saccharose, qui pourrait être associé à une inhibition de la synthèse de l'amidon [182]. Le saccharose et les autres monosaccharides confèrent chez les différentes plantes une tolérance vis à vis du stress [183 ; 184].

2. Modèle d'étude: la chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermuller, 1775)

Les *Thaumetopoeinae* est une sous famille des *Notodontidae* qui elle-même appartient à l'ordre des Lépidoptères. Le genre *Thaumetopoea* regroupe 9 espèces de chenilles processionnaires [185 ; 186].

Ces espèces peuvent localement coexister et qui sont parfois difficiles à distinguer. Toutefois, il existe certaines différences morphologiques (Figure 1.6) (telles que l'intensité de la couleur des ailes) et biologiques (notamment en ce qui concerne les plantes hôtes et la date d'éclosion, qui peut avoir lieu au printemps pour *Thaumetopoea bonjeani* (Powell), *Thaumetopoea pinivora* (Treitschke), *Thaumetopoea processionea* (L.), ou en fin d'été pour *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermuller), *Thaumetopoea wilkinsoni* (Tams), *Thaumetopoea solitaria* (Freyer), *Thaumetopoea jordana* (Staudinger), *Thaumetopoea herculeana* (Rambur) et *Thaumetopoea cheela* (Moore) [185]. Le développement larvaire est donc printanier à estival pour les trois premières espèces, et hivernal pour *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermuller), *Thaumetopoea wilkinsoni* (Tams) [187].

2.1. Classification systématique

La processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa*, a été décrite par Denis et Schiffermüller en 1775. En latin, *pityocampa* signifie « chenille du pin » (*campa* = chenille, *pityo*= pin) et *Thaumetopoea* signifie « qui vénère la verdure » (*thaumeto*= vénérer, *poea*= herbe).

Règne :	<i>Animalia</i> .
Embranchement :	<i>Arthropoda</i> .
Classe :	<i>Insecta</i> .
Super-ordre :	<i>Endopterygota</i> .
Ordre :	<i>Lepidoptera</i> .
Famille :	<i>Notodontidae</i> .
Sous-famille :	<i>Thaumetopoeinae</i> .
Genre :	<i>Thaumetopoea</i> .
Nom binominal :	<i>Thaumetopoea pityocampa</i> . (Denis & schiffermüller; 1775).

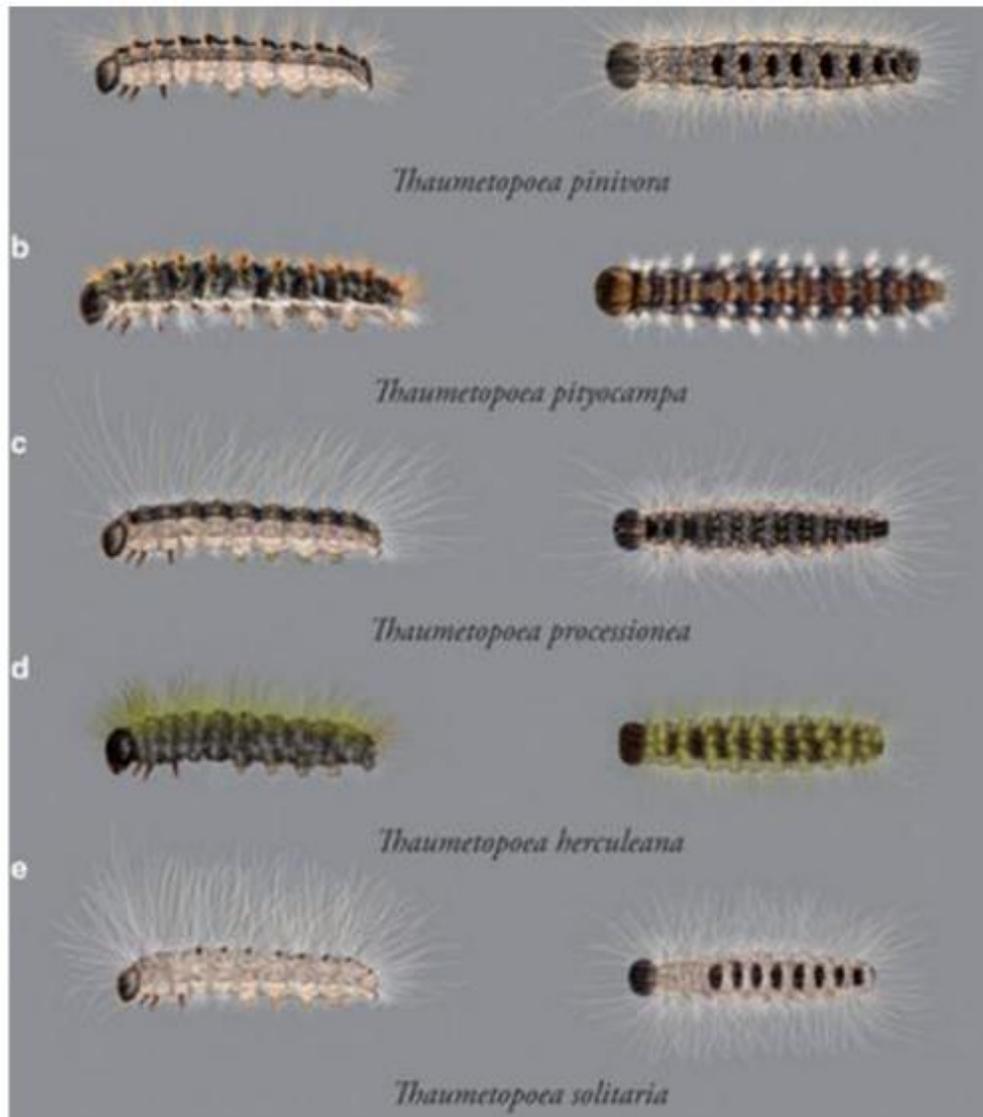


Figure 1.6 : Les aspects morphologiques des différentes espèces du genre *Thaumetopoea*; (a) *T. pinivora*; (b) *T. pityocampa*; (c) *T. processionea*; (d) *T. herculeana*; (e) *T. solitaria* [188].

2.2. Cycle de développement

Le cycle de vie de la processionnaire du pin est très variable selon le type de climat et l'altitude considérés. Ce cycle est habituellement annuel, mais il peut se prolonger jusqu'à cinq ans. Le cycle de vie de *Thaumetopoea pityocampa* est généralement annuel mais il peut s'étendre sur plusieurs années (jusqu'à cinq ans), selon les conditions environnementales notamment la température et l'ensoleillement, donc l'altitude et la latitude, peuvent en effet fortement influencer le déclenchement des différents stades [189]. Le cycle s'effectue en deux phases à deux strates différentes de l'écosystème : l'une aérienne (évolution larvaire en cinq stades), l'autre souterraine (prénymphose et nymphose [190]). Les différentes écophases de son évolution sont synthétisées et illustrées par la figure 1.7 et figure 1.8

Comme chez tous les lépidoptères, il se décompose en deux phases successives : La phase aérienne dure cinq à huit mois et comprend plusieurs étapes, de l'émergence des papillons jusqu'à l'enfouissement précédent la nymphose. Les papillons sortent de terre où les nymphes étaient enterrées [191]. Cette émergence se fait au coucher du soleil, Les mâles apparaissent avant les femelles (environ une demi-heure) [189]. Généralement, la sex-ratio est équilibrée entre les mâles et les femelles. Morphologiquement, les deux sexes se ressemblent notamment par leurs ailes de couleur gris-blanchâtre (Figure 1.8 a et b) [192]. Les papillons rejoignent un emplacement surélevé à proximité pour y déployer leurs ailes. A la tombée de la nuit, la femelle va commencer à émettre une phéromone sexuelle afin d'attirer les mâles pour l'accouplement (Figure 1.8 c). Une fois celui-ci terminé, le mâle meurt quelques heures après, alors que la femelle va chercher un arbre par sa silhouette [193].

Après l'accouplement et une fois son hôte trouvé les femelles vont pondre ses œufs généralement en une seule et unique ponte disposée en manchon autour de deux aiguilles, formant un manchon de 5 cm de long, contenant 7 à 220 œufs, protégés par les écailles de l'abdomen maternel (Figure 1.8 d). Elle mourra quelques heures après la ponte [189]. Quand la somme des températures moyennes journalières a atteint 780°C correspondant au cumul des températures moyennes des 30 à 45 jours après l'émergence des adultes, les chenilles L₁ éclosent (Figure 1.8. e). Les larves sont des chenilles de quelques millimètres de long, brun noirâtre avec des tâches rougeâtres sur le dessus et les flancs. Elles possèdent en position dorsale des miroirs composés de poils urticants, de très petite taille (0,08-0,16 nm) et réfléchissant la lumière. Ils sont fusiformes avec une extrémité portant des barbules acérées qui permettent leur pénétration dans la peau mais pas leur extraction. Ces poils contiennent une protéine urticante, la thaumétopéine [189].

Les chenilles évoluent en cinq stades larvaires (L₁ à L₅) (Figure 1.8 f). Au stade L₁, les chenilles mesurent deux à trois millimètres et sont de couleur jaune. Leurs soies dorsales sont noires, tandis que leurs soies latérales sont blanches et plus longues. Leur capsule céphalique, noire, est déjà volumineuse et leur permet dès ce stade de s'attaquer à une nourriture solide et résistante. La durée de ce stade larvaire est de 8 à 12 jours. Les chenilles deviennent rousses à deuxième stade larvaire (L₂) qui dure de 12 à 18 jours. Le nombre de soies latérales augmente significativement. Ce phénomène s'amplifie encore au troisième stade larvaire (L₃) et s'accompagne de l'apparition de poils urticants, localisés à la face dorsale de certains segments abdominaux ce stade larvaire dure 30 à 60 jours. L'appareil urticant continue à se développer au cours des deux stades suivants L₄ et L₅, La durée de ces deux stades larvaires est de 30 à 60 jours. Au stade L₅, les chenilles mesurent quatre à cinq centimètres. A chaque changement de stade larvaire, les chenilles entrent dans une période de mue où elles cessent de s'alimenter [194].

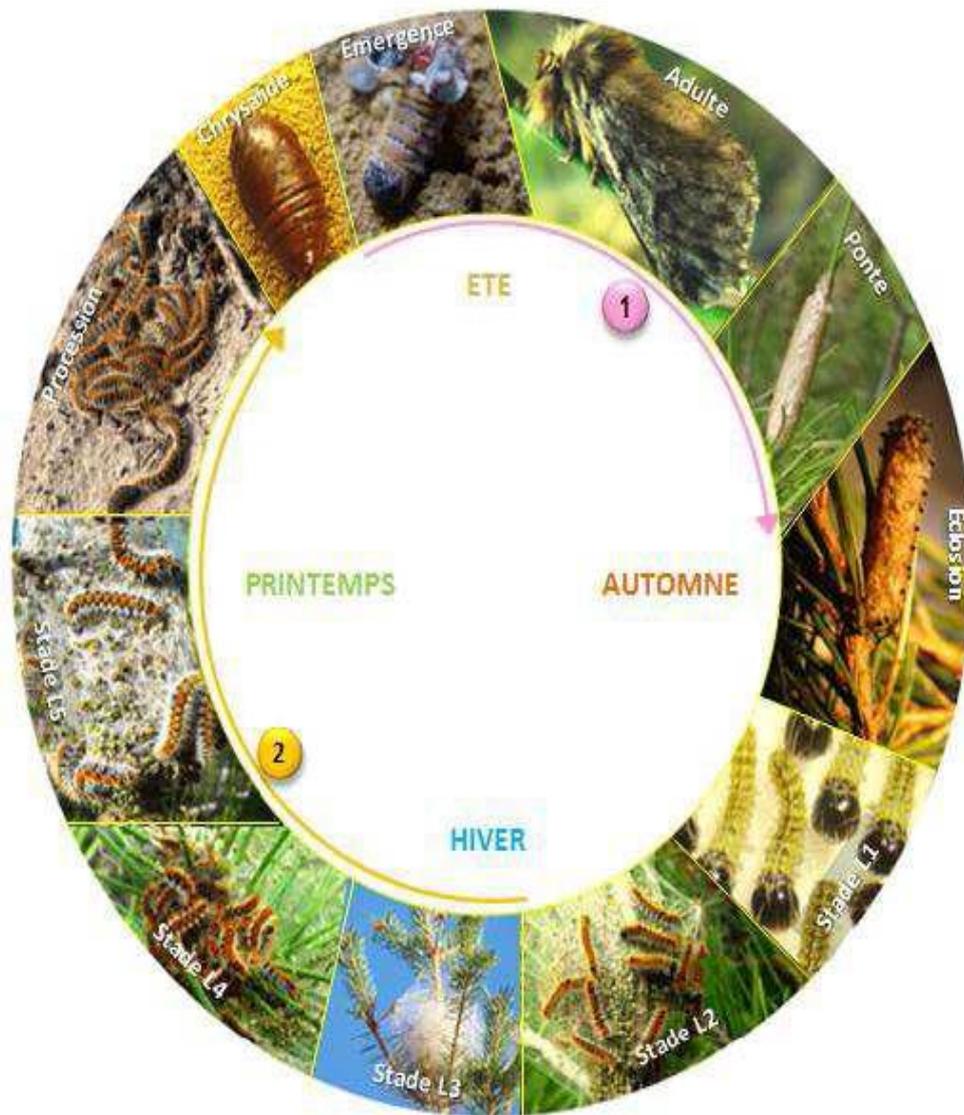


Figure 1.7: Le cycle de vie de la processionnaire du pin [195].

La construction de « nid » commence dès la sortie des chenilles L1. Celles-ci tissent un entrelacement de soie très fin tout autour de la ponte aussi appelé « pré-nid » [196] (Figure 1.8 g). Elles commencent à se déplacer la nuit pour s'alimenter pouvant aussi changer de lieu de regroupement. Elles partent se nourrir en procession. Cette alimentation nocturne est réglée sur la période d'obscurité. Mais dans des cas exceptionnels, comme la surpopulation ou des températures nocturnes trop froides, l'alimentation peut se faire pendant la période diurne [197]. Dès l'arrivée des premiers froids, la colonie commence la construction du nid d'hiver (Figure 1.8 h) qui est un radiateur thermique captant les rayons du proche infrarouge émis par le soleil permettant ainsi la survie du groupe [198].

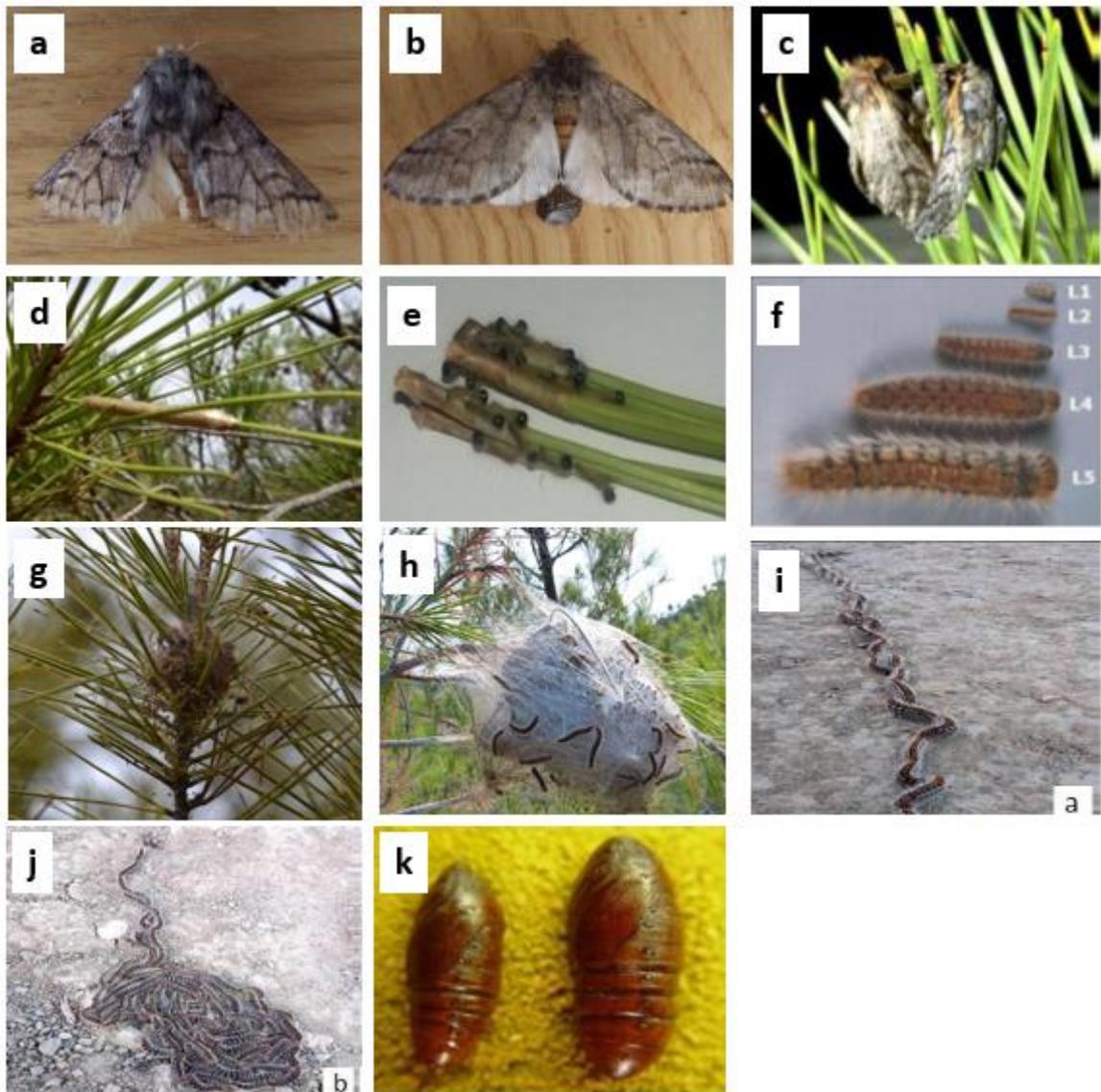
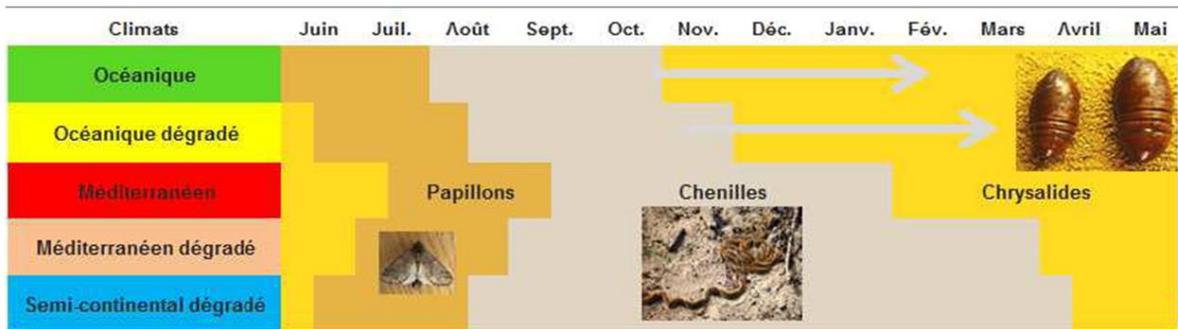


Figure 1.8. : Stades de développement de *Thaumetopoea pityocampa* Shiff. (a) Papillon mâle (b) Papillon femelle [191], (c) Accouplement des papillons de processionnaires du pin [192], (d) Manchons de ponte (Photographie originale, 2017), (e) Les chenilles au stade larvaire L₁ (Photographie originale, 2017), (f) Les différents stades [192], (g) Pré-nid (Photographie originale, 2017), (h) Nid d'hiver (Photographie originale, 2017), (i) Procession de chenilles processionnaires du pin , (j) Début de l'enfouissement de chenilles processionnaires (Photographie originale ,2017), (k) Chrysalides Mâle (à gauche) ; femelle (à droite) [199]

La phase aérienne se termine par la procession (Figure 1.8 i et j) qui peut durer jusqu'à six jours. La chenille de tête est une femelle, elle se dirige vers un terrain qui est ensoleillé et meuble, la profondeur de l'enfouissement peut aller de 5 à 20 cm sous terre. La phase souterraine peut alors commencer [200]. Elle peut durer de quelques jours à plusieurs mois de mars à juillet. Une fois sous terre, En fonction de l'altitude, de la latitude et de l'ensoleillement, la chenille processionnaire adapte son cycle de développement grâce à la diapause au stade chrysalide (Figure 1.8 k). Si les conditions d'espace et de température ne sont pas réunies, les chenilles peuvent ressortir pour chercher une zone plus propice [196].

Dans les régions méditerranéennes, il reprend activement quelques semaines avant l'émergence des adultes. Quand les conditions sont défavorables, la diapause peut être prolongée et peut durer jusqu'à cinq ans [201].

Il est important de noter que depuis quelques années, du fait du réchauffement climatique, des départs en procession précoces sont observés, réduisant ainsi la phase larvaire au niveau de régions bénéficiant d'un climat de type océanique ou océanique dégradé. Les données présentées dans la figure 1.9 [195].



2.3. Bioécologie et particularités du cycle 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 faune et la flore, éléments indispensables pour le choix d'un plan de lutte efficace.

2.3.1. Plante hôte *Pinus halepensis* (Mill., 1768)

La chenille processionnaire du pin est phytophage : elle se nourrit des aiguilles de pins. L'origine du nom *Pinus* proviendrait du mot «pit», mot indo-européen désignant la résine ou encore du mot celtique «pen» désignant la tête. En latin «*pinus*» désigne le pin parasol et *halepensis* signifie Alep (région d'Alep en Syrie) [3]. La première classification du pin d'Alep est celle de Miller en 1768, reprise par Ozenda [202].

Règne	<i>Plantae</i>
Sous-règne	<i>Tracheobionta</i>
Embranchement	<i>Spermaphytes</i>
Sous-embranchement	<i>Gymnospermes</i>
Classe	<i>Pinopsida</i>
Ordre	<i>Coniférales</i>
Famille	<i>Pinaceae</i>
Sous-famille	<i>Pinoideae</i>
Genre	<i>Pinus</i>
Espèce	<i>Pinus halepensis</i> Miller, 1768
Noms Vernaculaire	Snaouber halabi (Arabe), Azoumbei, tayada (Berbère), « Allepo pine » (anglais). « Pino caracso » (espagnol).

Le pin d'Alep est un arbre de taille moyenne, pouvant atteindre une hauteur totale de 25 à 27 mètres [203]. En Algérie, est un arbre de seconde grandeur et sa hauteur dépasse rarement les 20 mètres. La longévité du Pin d'Alep est estimée à 150 ans avec une moyenne de 120 ans [204].

2.3.2. Facteurs écologiques influençant le développement de la chenille

2.3.2.1. Ensoleillement et radiation solaire

Le rayonnement solaire est un déterminant important de la température de l'air, mais il a rarement été pris en compte dans les études traitant sa combinaison à la température corporelle des larves d'insectes. [205 ; 17 ; 206]. Le rayonnement solaire varie considérablement avec le microhabitat, en particulier les écosystèmes structurels complexes tels que les forêts [207]. Un fait intrigant est que les insectes semblent ajuster leur comportement thermorégulateur en sélectionnant des microhabitats afin de maximiser leur croissance [208]. Le rayonnement solaire est également une composante importante du changement climatique, bien que les effets locaux soient moins faciles à prévoir que la température en raison du nombre élevé de facteurs déterminant la nébulosité [209].

La chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pinivora pityocampa* Treitschke (Lepidoptera Notodontidae), qui se nourrit des aiguilles de pin, est fortement dépendante du rayonnement solaire afin d'améliorer la température corporelle au cours du premier stade larvaire [210]. *Thaumetopoea pinivora* a une nette préférence pour les pinèdes dispersé en lisière de forêt et les arbres isolés de *Pinus sylvestris* L. Aimi *et al.*, [211] et Battisti *et al.*, [212] ont émis l'hypothèse que le rayonnement solaire peut être un élément important de la distribution spatiale de cette espèce comme cela semble être le cas pour l'espèce sœur *Thaumetopoea pityocampa* [17]. et d'autres Lépidoptères [207].

2.3.2.2. Température

Les insectes herbivores étant généralement poïkilothermiques sont très sensibles aux changements de leur environnement. La hausse des températures a généralement des effets sur temps de développement des insectes, le voltinisme (nombre de génération), de survie en hiver et la diapause [213 ; 214 ; 215].

La dynamique des populations des ravageurs forestiers dépend souvent d'interactions complexes entre des facteurs de régulation abiotiques et biotiques [216 ; 215].

Au cours des dernières décennies, il a été démontré que le changement climatique avait des conséquences importantes sur les épidémies des ravageurs et la dynamique des populations de plusieurs espèces [217 ; 209]. L'un des

exemples les mieux documentés de l'effet du réchauffement climatique sur la libération de seuils thermiques limitant la répartition des espèces est la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermüller, 1775) (Lepidoptera: Notodontidae), un défoliateur majeur du pin en Europe du sud [9].

Les populations de cet insecte d'origine méditerranéenne en développement se développent vers les plus hautes latitudes et altitudes du sud et à l'ouest de l'Europe hivernales [17 ; 218]. La zone de distribution potentielle de la chenille *T. pityocampa* est délimitée par plusieurs seuils de températures [16; 17; 219]. Donc, *T. pityocampa* pénètre dans de nouvelles zones bioclimatiques et bioécologiques où elle pourrait affecter la faune résidente, par exemple, par de nouvelles interactions compétitives pour les ressources des pins, des effets indirects sur la qualité de l'hôte [220; 221]. Effets en cascades dus aux ennemis naturels [222] et à des parasitoïdes partagés et à la transmission de virus/maladies. De nombreux effets sont mal connus et peu documentés chez les insectes en expansion et des espèces envahissantes [223].

Les chenilles processionnaires du pin sont capables de s'adapter afin de compenser d'éventuelles variations climatiques, comme l'illustre la construction et l'orientation du nid d'hiver, permettant d'allier effet de masse (atténuation de fortes variations de température par regroupement de nombreux individus) et insolation maximale. L'optimum de développement se situe entre 20 et 25°C, ce qui explique le développement hivernal de *Thaumetopoea pityocampa*. Le seuil critique inférieur, température basse à laquelle les chenilles meurent, est de -7°C pour un individu isolé, mais il est diminué à -16 °C lorsque les chenilles sont regroupées, grâce à l'effet bénéfique du rassemblement des individus (effet de masse) [224 ; 225].

L'alimentation des chenilles dépend également de la température. Deux conditions sont en effet nécessaires : association d'une température supérieure à 9°C dans le nid durant le jour et d'une température de l'air supérieure à 0°C la nuit suivante [17]. Si l'une de ces conditions n'est pas respectée, le taux de survie des chenilles diminue, car celles-ci ne sortent pas s'alimenter [219].

2.4. Répartition géographique de la *Thaumetopoea pityocampa*

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 au développement des chenilles processionnaires du pin. 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) participent ainsi aux importantes variations de niveaux de populations, appelées « gradations ». En revanche, la réponse des autres espèces de

Thaumetopoea au changement climatique reste peu connue ou un sujet de débat, et dans certains cas même leur répartition géographique actuelle est encore imprécise. Il y a longtemps, mais le changement climatique peut permettre à l'heure actuelle la création d'insectes dans les zones situées au-delà de l'aire de répartition naturelle de l'insecte [218].

A l'échelle mondiale, les chenilles processionnaires du pin sont présentes sur plusieurs continents aux : Etats-Unis, où elles ont tendance à pulluler et en Europe. Elles se sont retrouvées plus particulièrement dans les pays méditerranéens (à l'exception de l'Egypte). Elles se sont retrouvées également en France, Grèce, Italie, Algérie, Albanie, Croatie, Liban, Maroc, Tunisie, Turquie, Espagne, en Suisse et en Yougoslavie [226]. (Figure 1.10). Sa distribution en Algérie est représentée dans la figure 1.11.

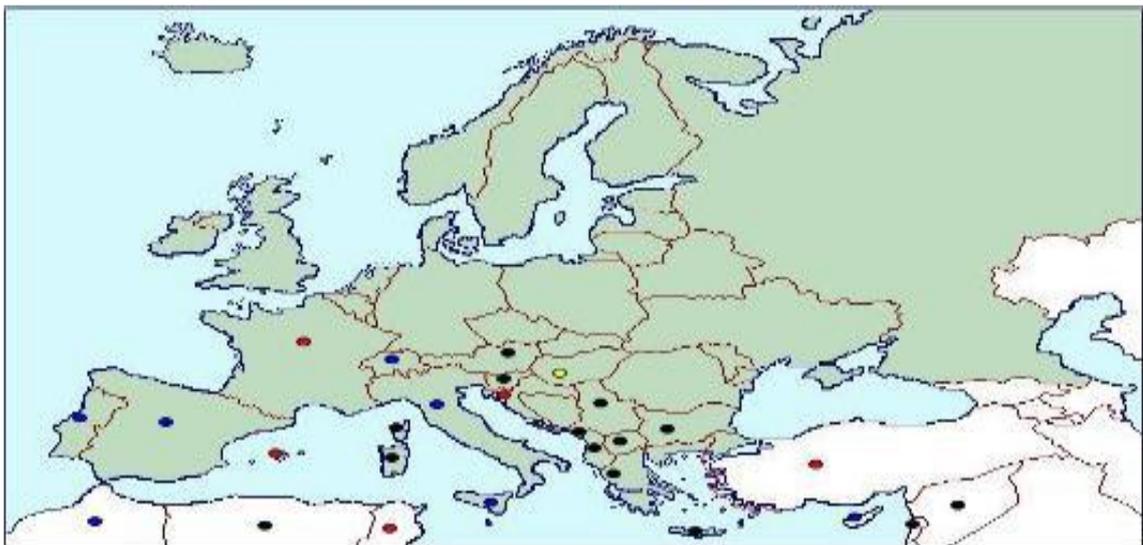


Figure 1.10. : Répartition mondiale de la chenille processionnaire du pin d'Alep [226].

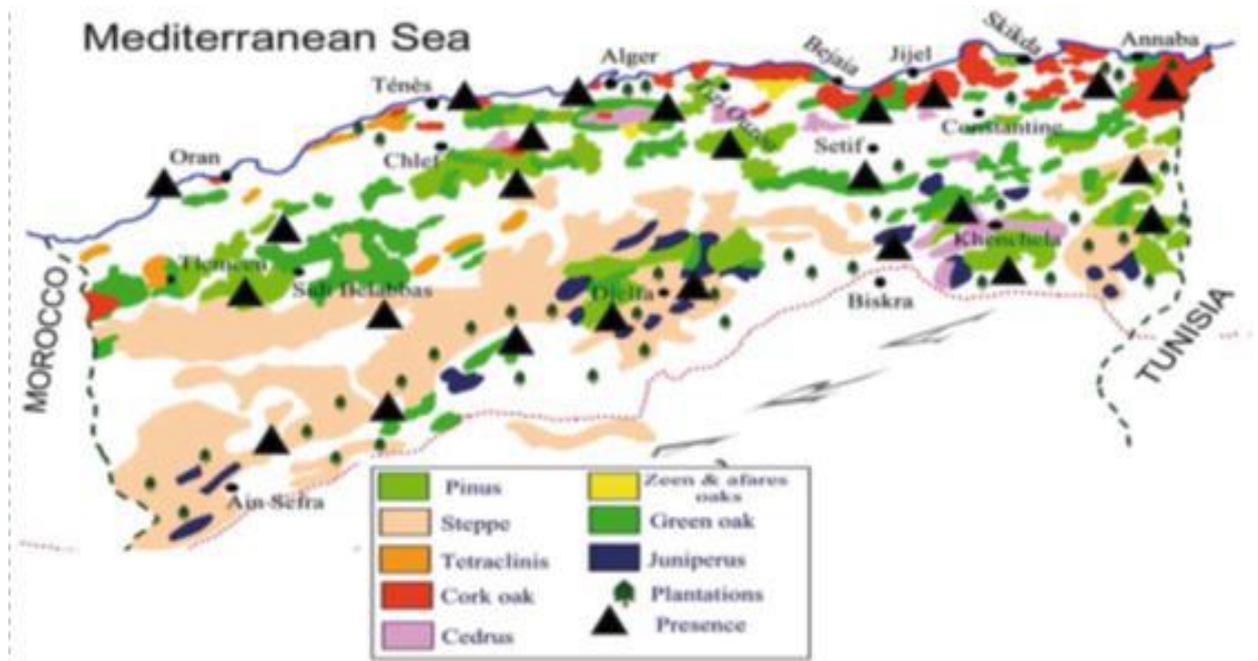


Figure 1.11. : Distribution de *Thaumetopoea pityocampa* en Algérie en relation avec la distribution des espèces conifères [227].

2.5. Conséquences environnementales et dégâts forestiers

La chenille processionnaire du pin est l'un des principaux défoliateur des peuplements résineux de la zone méditerranéenne [228 ; 229]. 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). Dans les forêts, la présence des chenilles auraient même provoqué la migration du gibier, fuyant les zones souillées par ces insectes [229 ; 230].

En Algérie, depuis l'indépendance, l'accroissement des reboisements en pin d'Alep, *Pinus halepensis* L., a entraîné une prolifération de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Schiff., mettant en danger les jeunes reboisements [231].

2.5.1. Conséquences écologiques

Dès l'éclosion, à l'automne, les chenilles commencent à se nourrir des aiguilles de l'arbre hôte, puis les défoliations s'intensifient au cours de l'hiver. Les chenilles s'alimentent dans un premier temps des aiguilles à proximité de la ponte, puis s'éloignent progressivement au cours de leur développement larvaire. Les préjudices écologiques dépendent donc du stade d'évolution des chenilles [226].

Les conséquences directes de la défoliation sont l'affaiblissement par diminution du pouvoir de photosynthèse et la perte de croissance des arbres tant en

circonférence qu'en hauteur [10]. Une défoliation même totale ne provoque pas la mortalité des arbres atteints. Les chenilles ont donc une action néfaste sur la production et l'accroissement des arbres, mais pas directement sur la mortalité des pins [232]. Les mortalités d'arbres consécutives aux défoliations des chenilles processionnaires sont donc très rares et n'interviennent que si d'autres facteurs affaiblissent les pins [233] avec un effet indirect, si les populations sont importantes, occasionnant une défoliation massive les arbres deviennent toutefois plus vulnérables aux ravageurs secondaires comme les scolytes ou le pissode [234] et aux stress thermiques et hydriques [194].

2.5.2. Conséquences économiques

Les conséquences économiques sont principalement liées aux pertes de croissance en forêt de production, dues aux défoliations massives par les chenilles processionnaires du pin qui peuvent se répercuter sur plusieurs années. Ainsi, d'après Morel [235], une année de forte Pullulation entrainera une perte économique d'une année complète de production de bois, étalée sur les 3 années suivant l'attaque.

2.6. La lutte contre la chenille processionnaire du pin

La lutte contre la chenille processionnaire du pin a pour principal objectif de maintenir les populations à des niveaux tolérables, afin de protéger la santé humaine et animale ainsi que les peuplements forestiers, mais n'a pas pour finalité son éradication. Il existe plusieurs techniques de lutte, dont l'utilisation varie selon le cycle biologique de l'insecte, lui-même dépendant de la localisation géographique et des conditions climatiques : les périodes de traitement, dépendantes du stade de développement de l'insecte. Il existe actuellement quatre principaux types de mesures de lutte contre ce ravageur : la lutte mécanique, la lutte chimique, la lutte microbiologique et les luttes alternatives (la lutte sylvicole, la lutte biologique et les différents outils de surveillance), ces dernières étant plus respectueuses de l'environnement [26].

La vision traditionnelle en forêt est que les insectes et agents pathogènes qui se nourrissent des plantes sont des agents destructeurs qui doivent être contrôlés pour protéger les ressources de la forêt. Toutefois, tant que sur le plan économique et environnemental, les interventions de lutte antiparasitaire doivent découler d'un besoin évident de gérer cet organisme nuisible, décision qui doit autant que possible être fondée sur des preuves scientifiques [236].

2.6.1. La lutte biologique

* Les traitements aériens à base de BtK : Les traitements insecticides microbiologiques à base de *Bacillus thuringiensis* kurstaki (BtK) sont les plus employés. La cible est la chenille qui ingère le produit présent à la surface des

feuilles, ce qui provoque sa mort. L'application du produit se fait généralement par traitement aérien au cours des premiers stades larvaires. Ce traitement est respectueux de l'environnement puisqu'il ne persiste que très peu après application et il a une spécificité d'action étroite (Lépidoptères). Le BtK, utilisé en France dans la grande majorité des traitements forestiers contre les chenilles défoliatrices. La faible persistance d'action sur le feuillage des spores de BtK et son innocuité sur la faune auxiliaire comme sur l'homme, sont des atouts majeurs pour la protection de l'environnement [190].

* L'utilisation des phéromones sexuelles : la ptyolure, phéromone sexuelle émise par la femelle, peut être recrée artificiellement. Cette phéromone de synthèse est utilisée par diffusion à l'intérieur de pièges pour un piégeage massif des mâles ou un suivi de population, « le monitoring ». Le piégeage de masse consiste à quadriller régulièrement une surface sensible avec des pièges à phéromone dans le but de capturer un maximum d'adultes mâles et ainsi d'éviter la rencontre avec les femelles. Le nombre de pièges à disposer à l'hectare est de 6 à 9 pièges. Quel que soit la taille du dispositif (forêt ou jardin), le nombre est le même. Les pièges peuvent être suspendus sur n'importe quel support (feuillus, résineux, clôture...). Cette méthode doit conduire progressivement, d'années en années, à la réduction du niveau de population de la processionnaire du pin. La lutte par confusion sexuelle, bien que très prometteuse par la méthode et les résultats, n'est pas homologuée contre cet insecte faute de firmes pour en assurer le développement [190].

*La prédation par les mésanges : La présence de nichoirs artificiels adaptés à la mésange (diamètre du trou : 32 mm) favorise largement la nidification et donc potentiellement la prédation des chenilles présentes sur le site. En effet la mésange n'étant pas sensible aux poils urticants est un excellent prédateur des chenilles processionnaires. Le nid d'hiver perforé par celle-ci est très vite vidé de son contenu [190].

2.6.2. Lutte mécanique

Consiste en le prélèvement et destruction manuelle des pontes et nids dans les arbres. A réaliser d'octobre à mars, avant la procession. Nécessité de bien se protéger des poils urticants (masque, lunettes, etc.) contenu [237].

2.6.3. La lutte sylvicole

Des espèces d'arbres non sensibles à la processionnaire peuvent être plantées. La diversité des essences forestières réduit généralement la colonisation par la processionnaire du pin contenu [190].

2.6.4. La lutte chimique

En raison de son efficacité et de son application facile et pratique, l'utilisation des produits chimiques constitue à l'heure actuelle la technique la plus utilisée pour lutter contre les organismes nuisibles contenus [27]. Cependant, l'emploi intensif et inconsidéré de ces produits a provoqué une contamination de la biosphère et de la chaîne alimentaire, une éradication des espèces non cibles telles que la faune auxiliaire et l'apparition des organismes résistants. Ces conséquences négatives ayant pour résultat l'attention croissante étant donnée aux produits naturels [29]. En effet, de nouveaux produits sont recherchés pour, d'une part, assurer une protection efficace de la production agricole, et d'autre part, contribuer à une gestion durable de l'environnement [30].

L'insecticide utilisé est le Diflubenzuron (régulateur de croissance, il perturbe le développement larvaire) [190].

2.7. Utilisation des huiles essentielles dans la lutte contre les bioagresseurs

Plusieurs pesticides sont utilisés dans la lutte contre les ravageurs de culture et de stock. Ces pesticides constitués pour la plus part des produits de synthèse, capables d'agir sur la physiologie des insectes. Ils agissent par fumigation, par contact ou par ingestion [238] et provoquent des troubles de comportement aboutissant à la mort de l'insecte. Ils induisent dans bien de cas le phénomène de la résistance chez les insectes traités et ont des effets néfastes sur l'environnement et la santé du consommateur. De nos jours, la lutte contre les ravageurs des produits agricoles entre dans une nouvelle phase avec le regain d'intérêt pour les biopesticides d'origine végétale [239].

De nouvelles perspectives, à base d'insecticides biologiques ou naturels ayant une faible répercussion écologique sont ainsi, entrain de se développer. Ces substances naturelles d'origine végétale sont constituées de molécules organiques biodégradables. Ce sont les métabolites secondaires des plantes et leurs dérivés. De nombreuses stratégies de lutte contre les ravageurs sont donc élaborées à partir de ces substances naturelles. Ainsi, les biopesticides phytochimiques sont utilisés de diverses manières :

- Les organes entiers : ce sont généralement des rameaux feuillés qui sont disposés en couches alternes dans la masse de graines.
- Les poudres de plantes entières ou d'organes végétaux sont utilisées pour l'enrobage des graines à traiter. Cette formulation reste toutefois difficile à appliquer à grande échelle [239]. L'énorme quantité de matière première à utiliser dans ce traitement limite l'utilisation de cette formulation en dehors du laboratoire [240].

- Les extraits bruts de plantes sont obtenus par extraction au solvant suivie de son évaporation. On obtient ainsi des extraits concentrés que l'on peut utiliser dans les traitements phytosanitaires. L'utilisation des extraits bruts standardisés est plus rentable que celle des composés purs, le coût de production étant réduit [241]. L'effet synergique d'autres composés présents dans les extraits bruts renforce l'activité du principe actif [242]. Toutefois, l'action des composés antagonistes n'est pas à exclure. Les huiles essentielles jouent divers rôles dans les plantes qui les produisent. Chez certaines plantes, elles ont un rôle protecteur car elles repoussent les insectes. D'autres propriétés (antimicrobienne, antioxydante) sont également évoquées et montrent la diversité du potentiel des huiles essentielles [243].

La protection des plantes contre les organismes nuisibles sans l'inconvénient des pesticides de synthèse, exige la recherche d'autres méthodes alternatives, en protection phytosanitaire [33, 34]. Une alternative aux pesticides s'imposant, le monde scientifique s'est mis à la recherche d'un produit biodégradable, plus sélectif que les substances chimiques et sans danger pour les plantes, les animaux et les humains [35 ; 36 ; 37]. Les plantes spontanées et aromatiques grâce à leurs molécules bioactives sont considérées comme des outils de choix dans les programmes de gestion de la résistance des bioagresseurs [244].

Les huiles essentielles se trouvent dans tous les organes de la plante : racine, fruits, graines, fleurs, feuilles, écorces, bois, etc... Elles se forment dans des cellules spécialisées, le plus souvent, regroupées en canaux ou en proches sécrétateurs et elles sont ensuite transportées dans les différentes parties de la plante, lors de la croissance de cette dernière [245].

Dans le domaine phytosanitaire et agro-alimentaire, les huiles essentielles ou leurs composés actifs pourraient également être employés comme agents de protection contre organismes phytopathogènes et les microorganismes envahissant la denrée alimentaire [40]. Certaines huiles essentielles servent à la défense des plantes contre les herbivores, insectes et micro-organismes [246], elles protègent les cultures en inhibant la multiplication des bactéries et des champignons. Elles empêchent la dessiccation de la plante (perte d'eau) par évaporation excessive et protègent la plante contre la lumière soit par diminution ou concentration. Par ailleurs leurs composés interviennent dans les réactions d'oxydo-réduction, comme donneurs d'hydrogène. Par exemple l'isoprène réagit rapidement avec l'ozone et les radicaux hydroxyles. Aussi, elles émettent l'excès de carbone et d'énergie [247].

Egalement, dans le domaine de l'aromathérapie, la pharmacie, la parfumerie, et en cosmétique des parfums et cosmétiques, les huiles essentielles sont employées en tant qu'agents conservateurs grâce à leurs propriétés antimicrobiennes qui permettent d'augmenter la durée de conservation du produit.

Cependant, c'est surtout pour leurs caractéristiques odorantes qu'elles sont utilisées, notamment dans la formulation de parfums, de produits d'entretien personnels ou ménagers [248]. Leur utilisation est liée à leurs larges spectres d'activités biologiques reconnues [249 ; 250 ; 251 ; 252 ; 253 ; 254 ; 255].

Les huiles essentielles sont des mélanges complexes constitués principalement de composés terpéniques qui font partie des métabolites dits secondaires de la plante [256 ; 257]. Wallach [258] présente les terpènes comme formes d'unités d'isoprènes (2-méthylebuta-1,3diène) et classés en : hémiterpènes (C5), monoterpènes (C10), sesquiterpènes (C15), diterpènes (C20), sesterpènes (C25), triterpènes (C30), tétraterpènes (C40) et polyterpènes ou polyisoprènes (>C40), suivant le nombre d'unités d'isoprènes.

2.7.1. Toxicité des huiles essentielles

Les huiles essentielles ne sont pas des produits qui peuvent être utilisés sans risque. Comme tous les produits naturels: "ce n'est pas parce que c'est naturel que c'est sans danger pour l'organisme". Certaines huiles essentielles sont dangereuses lorsqu'elles sont appliquées sur la peau en raison de leur pouvoir irritant (huiles riches en thymol ou en carvacrol), allergène (huiles riches en cinnamaldéhyde [259] ou phototoxique (huiles de *citrus* contenant des furocoumarines [260] D'autres huiles essentielles ont un effet neurotoxique, Il existe aussi quelques huiles essentielles dont certains composés sont capables d'induire la formation de cancers [261].

Les huiles essentielles ont une toxicité aiguë par voie orale, la majorité de celles qui sont couramment utilisées ont une DL*₅₀ comprise entre 2 et 5 g/Kg (anis, eucalyptus, girofle, etc...), ou ce qui est le plus fréquent, supérieure à 5 g/Kg (camomille, citronnelle, lavande, marjolaine, vétiver, etc...) [262].

La cible d'action de ces huiles au niveau des insectes est différente de celle des hommes, ce qui fait qu'aucune toxicité directe sur l'Homme n'a été pour le moment mise en évidence. En effet, les récepteurs chimiques chez les insectes n'existent pas dans le système nerveux des mammifères [263]. Ainsi, il a été montré que plusieurs composés des huiles essentielles (thymol, eugénol) sont des neurotoxines qui interfèrent avec le neurotransmetteur octopamine unique aux Arthropodes [264]. A cause de leur faible persistance, les huiles essentielles des plantes aromatiques ne présentent pas de risques pour l'environnement [265].

2.7.2. Activité biologiques des huiles essentielles

2.7.2.1. Activité insecticide

Les huiles essentielles se disposent de grands potentiels, qui les rend une piste de recherche très prometteuse, et particulièrement leur effet insecticide [266]. La grande majorité de ces études portaient sur les moustiques, que ce soit sur l'effet

répulsif des huiles essentielles [267] ou sur leur effet ovicide [268] ou larvicide [269].

L'effet insecticide des huiles essentielles par contact, ingestion et par fumigation a été bien démontré contre les déprédateurs des denrées entreposées [270], de nombreux travaux ont porté sur l'amélioration des formes d'utilisation des plantes qui permettent de renforcer et de rentabiliser leur activité insecticide [29], Certaines observations ont montré que l'extrait brut éthanolique [271], hexanique [242] ou à l'éther de pétrole [272] de matériel végétal possède une toxicité effective vis-à-vis des ravageurs de stocks. D'autres résultats indiquent que les huiles essentielles extraites de plantes odorantes ont une activité insecticide indéniable vis-à-vis de *Callosobruchus maculatus* F. [273 ; 272]. En Algérie, des travaux ayant le même axe de recherche ont été entrepris. Kechout [274], avait testé l'efficacité de l'huile essentielle du thym sur *Sitophilus orysae* L., traduite par un taux de mortalité évalué à 85%. La sensibilité d'un insecte pour une huile essentielle évolue en fonction de son cycle biologique [263].

Le mode d'action des huiles essentielles est relativement peu connu chez les insectes [263]. Elles ont des effets anti-appétent, affectant ainsi la croissance, la mue, la fécondité et le développement des insectes et acarien. Des travaux récents montrent que les monoterpènes inhibent l'acétyl [275]. Les différents modes d'action observés chez les huiles essentielles à travers la grande diversité des monoterpènes qu'elles contiennent montrent que leur activité insecticide est due à plusieurs mécanismes synergiques. Ces divers mécanismes affectent donc des cibles multiples perturbant ainsi plus efficacement l'activité cellulaire [276]. Par la diversité de leurs composés terpéniques, les huiles essentielles qui agissent par fumigation, présentent différents modes d'action. En effet, leurs actions peuvent se faire sur les estérases, les synapses inhibitrices, les récepteurs octopaminergiques ou sur l'activité électrique neuronale.

➤ Action sur les estérases

Selon Huignard et *al.*, [276], les monoterpènes contenus dans les huiles essentielles sont des neurotoxiques qui agissent sur différentes cibles en fonction de leur nature chimique. Le 1,8-cinéole et le terpinène-4-ol (deux composés majoritaires contenus dans l'huile essentielle extraite des feuilles de thé) ont une action inhibitrice sur l'acétylcholinestérase (Millset *al.*, 2004). Selon Ryan et Byrne [277] cinq monoterpènes (citrinal, pulegone, linalol, bornyl acétate et cinéole) représentant chacun un groupement fonctionnel donné (aldéhyde, cétone, alcool, ester et éther) sont des inhibiteurs réversibles compétitifs occupant le centre du site actif hydrophobique de l'AChE. D'autres composés terpéniques ont également montré une efficacité dans l'inhibition de l'AChE *in vitro*. Ce sont entre autres, le linarin (acacétin-7-O- β -D-rutinoside) extrait des fleurs de *Mentha arvensis* [278], le 3-carène et le β -pinène contenus dans les huiles essentielles de *Salvia fruticosa* et de *Salvia officinalis* var. *Purpurea* [279].

Selon Savelev et *al.*, [279], l'inhibition de l'acétylcholinestérase et de la butyrylcholinestérase par les huiles essentielles extraites des espèces du genre *Salvia* (*S. fruticosa*, *S. lavandulaefolia*, *S. officinallis* et *S. officinalis var purpurea*) est plus importante que celle induite par leurs composés terpéniques pris individuellement. Ce qui suggère donc un effet synergique. Selon Ketoh et *al.*, [280], les huiles essentielles d'*Ocimum basilicum* et de *Cymbopogon schoenanthus* inhibent partiellement l'activité des estérases.

➤ Action sur les synapses inhibitrices

En dehors de leur effet inhibiteur sur l'AChE, les composés terpéniques ont d'autres sites d'action. Le thymol perturbe le fonctionnement des synapses inhibitrices où le neurotransmetteur est l'acide γ -aminobutyrique (GABA) en se fixant sur les récepteurs GABA associés aux canaux chlorés situés sur la membrane des neurones post synaptiques ; ce qui perturbe l'activité régulatrice de ces cellules [281].

➤ Action sur les récepteurs octopaminergiques

Selon Enan [282], l'eugénol aurait un effet spécifique sur les récepteurs de l'octopamine qui est un neuromodulateur et une neurohormone chez les invertébrés [283]. Cette action de l'eugénol se fait soit à plus faibles doses (10⁻⁶M) en augmentant des cellules du système nerveux de l'insecte (*Periplaneta americana*) ; soit à plus fortes doses (10⁻⁵M) en réduisant la production d'AMP cyclique (AMPc) [284]. De plus, un mélange d'eugénol, d' α -terpineol et d'alcool cinnaminique (10⁻³M) inhibe l'accroissement du taux d'AMPc provoqué par l'octopamine. Sur des cultures de cellules de cerveau de *P. americana* et de *Drosophila melanogaster*, l'eugénol, à plus fortes doses (2,5 10⁻⁵M) mime l'action de l'octopamine et provoque une augmentation du taux de calcium intracellulaire [285]. L'eugénol serait donc selon Huignard et *al.*, [276], reconnu par les récepteurs à l'octopamine et son activité insecticide s'exercerait par l'intermédiaire du système octopaminergique. Le rôle de ce système octopaminergique dans la cytotoxicité des huiles essentielles a été aussi mis en évidence par Kostyukovsky et *al.*, [286] sur des cultures de cellules épidermiques de *Helicoverpa armigera*. Chez *D. melanogaster*, Enan [285], a montré que les monoterpènes tels que le thymol, le carvacrol et le α -terpineol, reconnus par les récepteurs à la tyramine, un précurseur de l'octopamine, influencent la production d'AMPc et de calcium au niveau cellulaire.

➤ Action sur l'activité électrique neuronale

Pour Price et Berry [287], l'effet de l'eugénol est tout autre. Ce monoterpène provoque plutôt une inhibition presque complète de l'activité électrique neuronale. Par contre le citral et le géraniol provoquent sur ces neurones un effet bi-phasique en fonction de la dose utilisée. A faible dose, ces deux monoterpènes induisent

une augmentation de l'activité électrique spontanée, puis une diminution à forte dose. Les travaux de Ketoh et al., [280], ont montré que l'huile essentielle de *Ocimum basilicum* par ces composants majoritaires (le linalool et l'estragol) induisait au niveau du système nerveux central de *P. americana*, une diminution de l'amplitude du potentiel d'action de près de 50%, associée à une réduction à la fois de la phase de post-hyperpolarisation et de la fréquence de décharge des potentiels d'action. En somme, son effet aboutit à une inhibition totale de l'activité électrique neuronale.

CHAPITRE 2

MATERIEL ET METHODES

2.1. Situation géographique de la région d'étude

La région de Bordj Bou Arreridj (lat. 36.07° N, long. 4.747° E, alt. 930m.) se situe au Nord Est de l'Algérie. En effet, elle se trouve à mi-parcours entre Alger et Constantine. Elle est limitée au Nord par la wilaya de Bejaïa et Sétif, à l'Est par la wilaya de Sétif, à l'Ouest par la wilaya de Bouira et au sud par la wilaya de M'sila (Figure 2.1). Elle est composée de trois zones géographiques qui se succèdent : une zone montagneuse au nord avec la chaîne des Bibans, une zone de hautes plaines qui constitue la majeure partie de la région, et une zone steppique, au sud-ouest, à vocation agropastorale. L'altitude varie entre 302 m et 1885 m [288].



Figure 2.1: Situation géographique de la région d'étude [289].

2.1.1. Présentation des zones d'étude

La forêt de Bordj Bou Arreridj dont les coordonnées géographiques sont de latitude 36.0667 et longitude 4.76667; 36° 4' 0" Nord, 4° 46' 0" Est, occupe une superficie de 81 253 ha [290], située à 200 km à l'Est d'Alger. Le climat pourrait être considéré comme faisant partie de l'étage bioclimatique semi-aride. La moyenne annuelle de la gamme d'amplitude thermique est de 21,3°C. La moyenne des précipitations est inférieure à 400 mm/an. La principale essence qui compose le fond forestier est le Pin d'Alep (76 %), dont les grandes forêts se concentrent dans la partie Nord et Nord-ouest de la wilaya, ceinturant ainsi la

chaîne montagneuse des Bibans et les monts de Beni-Yadel, et le Chêne vert (20%) [291].

2.1.2. Synthèse climatique de la région d'étude

Le climat de la région de Bordj Bou Arreridj est caractérisé par un climat méditerranéen du type «D» [292]., et se trouve sous la triple influence de « l'Atlas tellien » qui limite les précipitations hivernales (350-450 mm), «le Sahara» et «l'Atlas Saharien», responsables de masse d'air sec [288]. Le climat de la région est semi-tempéré avec une température moyenne du mois le plus froid comprise entre 0 et 10°C [293]. Trente années de données climatiques (précipitations, températures minimales, maximales et moyennes, durée d'ensoleillement) ont été collectées à partir des stations météorologiques de la région d'étude. La série climatique s'étend de 1987 à 2017. Le rayonnement solaire (R_s) est estimé à partir de la durée d'insolation (n) au moyen de la formule d'Angstrom [294] comme suit :

$$R_s / (R_{s0}) = a + b (n / N)$$

R_{s0} est le rayonnement solaire extraterrestre, ou rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère, N la durée maximum possible d'ensoleillement, a et b sont des coefficients qui représentent la fraction du rayonnement solaire extraterrestre qui atteint la terre en jour clair. Les valeurs de a et b sont prise égales respectivement à 0,25 et 0,50, comme recommandé par FAO-56 [295].

La température représente un facteur limitant de toutes premières importances, car elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère. Bale *et al* [296] observent qu'une hausse des températures dans les limites vitales des espèces, implique une accélération de leur développement. Chararas [297] précise que la température exerce son influence de façon constante sur tous les stades d'évolution de l'insecte.

Nous nous intéressons aux variations mensuelles des températures de la pluviométrie ainsi que le rayonnement solaire dans la région de Bordj Bou Arreridj durant la campagne agricole 2015-2016 et 2016-2017 (Tableau 2.1) ainsi que les données de la période 1987-2017 (Tableau 2.2). L'analyse des températures fait ressortir que les basses températures sont enregistrées aux mois de janvier, février, mars et décembre durant la campagne 2015-2016, Alors que pendant la campagne 2016-2017 c'est les mois de janvier, février, novembre et décembre tandis que les hautes températures sont enregistrées aux mois de juin, juillet, août et septembre pour la campagne 2015-2016 et de mai, juin, juillet, août et septembre durant la période 2016-2017. Les moyennes des minimas du mois le plus froid sont enregistrées au mois de février avec une température de 3,8°C pour la période 2015-2016 alors que pendant la campagne 2016-2017 une température de 1.1 °C a été enregistrée durant le mois de janvier, et les

moyennes des maximas du mois le plus chaud sont enregistrées au mois de juillet avec une température 36,9 et 36,5°C respectivement durant les deux campagnes (2015-2016/2016-2017). Les quantités pluviométriques sont réparties d'une manière relativement assez homogène pour les périodes pluvieuses, c'est-à-dire du mois de septembre jusqu'au mois de janvier, ou nous remarquons que le mois qui a la plus forte pluviosité est janvier avec 181,6 mm tandis que celui qui a la plus faible pluviosité est juillet avec 0,00 mm pour la campagne 2016-2017. Pendant la campagne 2015-2016, la précipitation enregistrée est durant le mois de Mars avec 50,8 mm, alors que le mois qui a enregistré une pluviosité la plus faible est celui du mois juillet avec 2,0 mm (Tableau 2.1).

Tableau 2.1: Variations mensuelles des températures et de la pluviométrie dans la région de Bordj Bou Arreridj durant les périodes 2015-2016 / 2016-2017.

	Paramètres	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
2015-2016	Tmax (°C)	14,3	14,3	15,7	22,7	26,6	32,9	36,9	35,0	29,7	26,2	15,1	16,0
	Tmin (°C)	4,1	3,8	4,8	9,0	11,9	15,7	18,9	18,0	15,1	13,4	5,9	6,8
	Tmoy (°C)	9,6	9,5	11,0	17,2	21,1	26,9	30,6	28,8	23,7	20,9	11,4	12,6
	Pv (mm)	15,0	26,4	50,8	37,6	22,6	11,2	2,0	3,1	10,4	16,8	33,0	8,9
	Rs (kWh/m ² /j)	9,6	12,7	16,6	20,5	23,4	25,9	26,4	23,6	18,8	13,5	9,7	7,9
2016-2017	Tmax (°C)	8,6	14,7	19,2	21,2	29,1	33,7	36,5	35,5	28,7	23,1	15,3	9,6
	Tmin (°C)	1,1	4,2	6,0	7,6	14,1	18,3	20,9	20,5	14,2	10,2	5,4	2,8
	Tmoy (°C)	9,2	16,8	22,1	25,1	36,1	42,8	47,0	45,7	35,9	28,2	18,0	10,9
	Pv (mm)	181,6	13,2	2,0	8,4	5,6	21,8	0,0	7,1	7,6	40,1	23,6	30,2
	Rs (kWh/m ² /j)	11,6	14,7	20,6	24,5	23,4	24,9	26,4	23,6	21,8	9,5	7,7	6,9

(Source : [291])

Concernant la compilation de trois décennies 1987-2017, les basses températures sont enregistrées aux mois de janvier, février, mars et décembre, tandis que les hautes températures sont enregistrées aux mois de juin, juillet, août et septembre. Les moyennes des minimas du mois le plus froid sont enregistrées au mois de janvier avec une température de 2,17°C, et les moyennes des maximas du mois le plus chaud sont enregistrées au mois de juillet avec une température 34,93°C. Les moyennes des précipitations enregistrées pendant la série (1987-2017) sont comme suit : 301,77 mm pour la station météorologique de Bordj Bou Arreridj (Tableau 2.2).

Tableau 2.2: Variations mensuelles des températures et de la pluviométrie dans la région de Bordj Bou Arreridj durant la période 1987-2017.

Paramètres	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Jui.	Juil.	Aou.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
T.max (°C)	10,9	12,1	15,9	19,2	25,4	30,7	34,9	34,4	28,3	22,9	15,5	11,5
Tmin (°C)	2,2	2,6	4,9	7,3	11,9	16,5	19,9	19,8	15,7	11,8	6,5	3,6
T.moy (°C)	6,1	7,1	10,6	13,4	18,4	24,1	27,7	27,2	21,9	17,2	10,7	7,1
Pv (mm)	41,5	31,9	34,6	46,5	34,4	22,9	9,6	11,2	31,7	33,5	34,6	33,9

(Source : [291])

2.1.2.1. Diagramme Ombrothermique

Bagnouls et Gausson [299] et Dajoz [300], définissent le mois sec lorsque la somme des précipitations moyennes exprimées en (mm) est inférieure au double de la température de ce mois ($P/2T$). Ils ont proposé un diagramme où on juxtapose les précipitations et les températures. Lorsque la courbe des précipitations rencontre celle des températures et passe en dessous de cette dernière, nous avons une période sèche [21].

A partir de cette hypothèse, nous traçons les diagrammes Ombrothermiques sur lesquels sont portés en abscisse les mois et en ordonnées les températures mensuelles moyennes et la pluviométrie. Le Diagramme Ombrothermique des années de la période 1987-2017 (Figure 2.2) montre l'irrégularité du climat au cours ces trois décennies. On remarque l'installation d'une période sèche qui s'étale sur quatre mois de juin à mi-septembre, et une période humide qui s'étale sur neuf mois depuis le mi- septembre à mai.

Pour l'année d'étude 2015-2016, le diagramme Ombrothermique (Figure 2.3 a) marque aussi une irrégularité climatique dont la période sèche s'étale sur huit mois d'avril à la mi-novembre, et une période humide qui s'étale sur quatre mois de la fin mai au mi- novembre jusqu'à mars. Le diagramme Ombrothermique de la période 2016-2017 est marqué aussi ne irrégularité climatique dont la période sèche s'étale sur dix mois de février à novembre et une période humide de deux mis et demi de la fin novembre jusqu'au début février (Figure 2.3b).

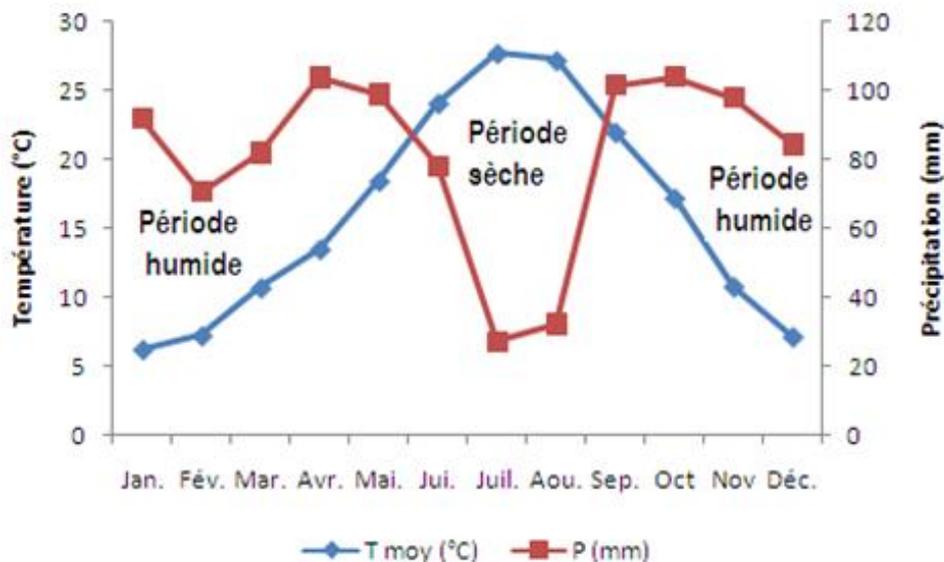


Figure 2.2 : Diagramme Ombrothermique de Gausson pour la région de Bordj Bou Arreridj pour la Période 2007-2017

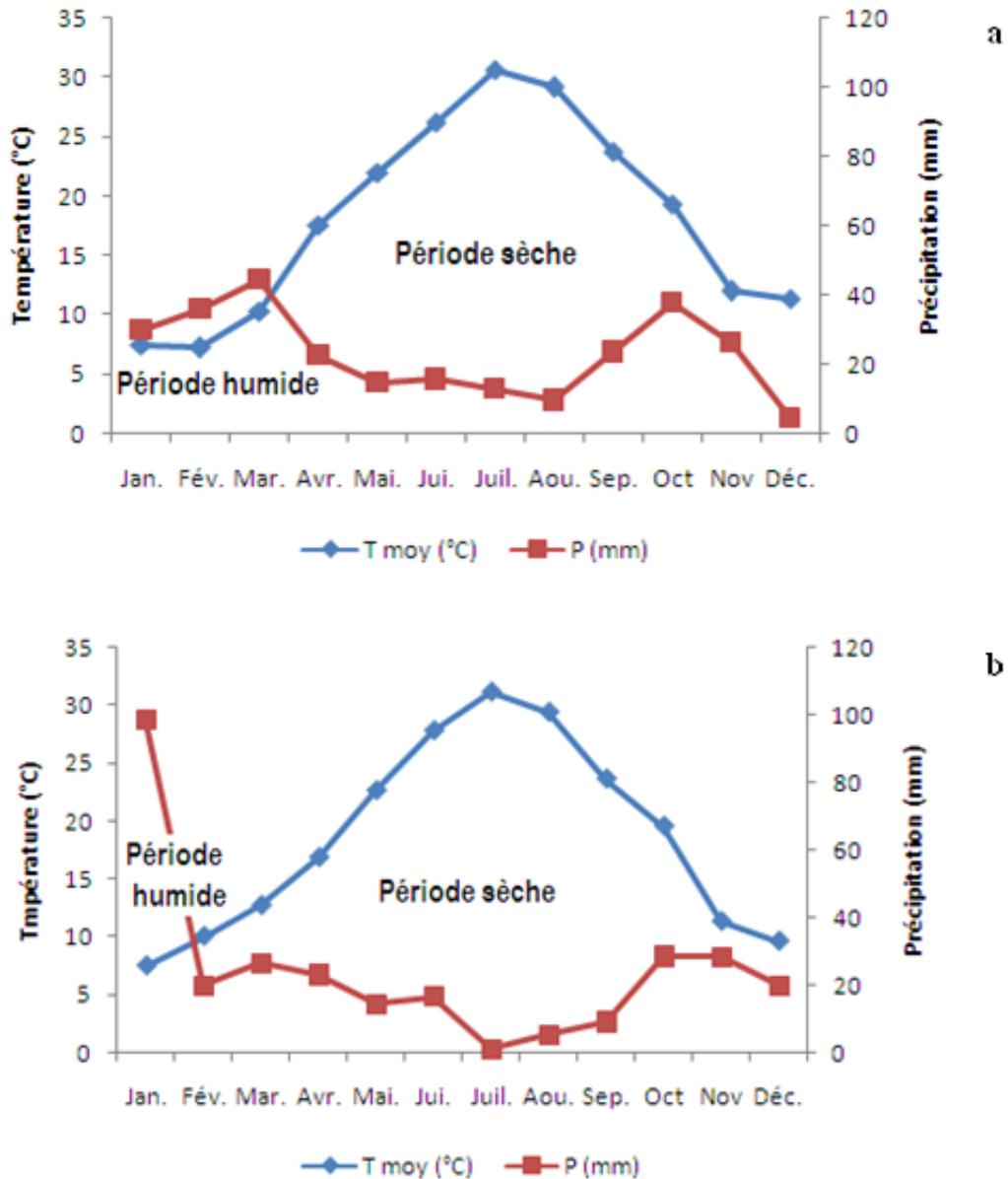


Figure 2.3: Diagramme Ombrothermique de Gausson pour la région de Bordj Bou Arreridj. (a) Année d'étude 2015-2016 ; (b) Année d'étude 2016-2017.

2.1.2.2. Étage bioclimatique (Climagramme d'EMBERGER)

L'indice d'EMBERGER permet la caractérisation des climats et leurs classifications dans les différents étages bioclimatiques. L'indice d'EMBERGER où le coefficient pluviométrique est calculé selon la formule [301]:

$$Q_2 = 3.43 \times P/M - m$$

Avec:

P: pluviométrie annuelle (mm);

M: Moyennes des températures maximale du mois le plus chaud;

m: Moyennes des températures minimales du mois le plus froid

En plaçant les valeurs (T_{\min} ; Q_2) sur le diagramme d'EMBERGER, nous avons défini l'étage bioclimatique pour notre région d'étude et qui se situe dans l'étage semi aride supérieur à hiver frais pour les trois décennies de 1987 à 2017, et puis dans l'étage semi aride moyen à hiver frais pour les années 2015 -2016 et 2016-2017 (Figure 2.4).

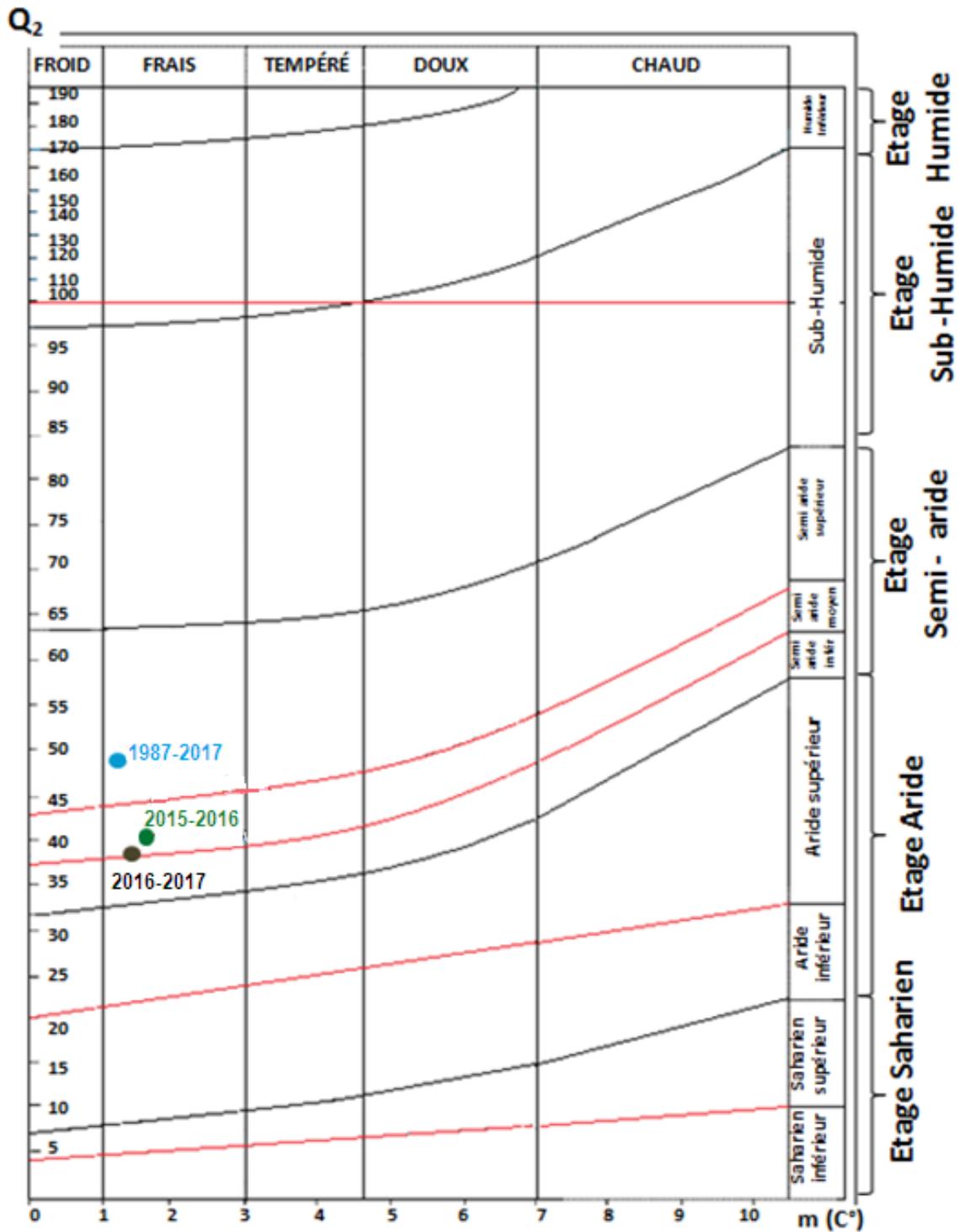


Figure 2.4: Localisation de la région de Bordj Bou Arreridj sur le Climagramme D'EMBERGER pour les périodes 2015-2016/ 2016-2017 et la période 1987-2017

2.1.3. Mise en place des stations d'observation

Selon l'INRF [302], pour assurer des échantillonnages et /ou relevés biologiques représentatifs, il est nécessaire de procéder à un parcellaire de la forêt ou du reboisement considéré en tenant compte, d'une part des paramètres écologiques (l'altitude, l'exposition, la topographie et structure du peuplement) et d'autre part, de la superficie du biotope. Ainsi en fonction de ces deux paramètres il s'agirait de : (i) Diviser le biotope en zones de 10 à 100 ha, (ii) Choisir dans chacune des zones, des stations d'observation permanentes, d'une superficie de 01 ha environ, (iii) Echantillonner dans chacune des stations d'observation, les arbres selon un ou plusieurs transects en choisissant au moins un arbre sur 5.

Dans le but d'améliorer la précision statistique des résultats et de contrôler localement l'évolution des populations, la région d'étude est divisée en 3 zones. Les zones sont délimitées en fonction des principaux types de peuplements qui forment des étages altitudinaux : peuplements clairs de basse altitude (Mansoura) (S1), 600-700 m, moyennement denses (Djehaifa) (S2) 900-1000 m en moyenne, pins isolés tabulaires qui s'étendent jusqu'aux limites altitudinales (1100-1200 m) de la forêt (Ras El Oued) (S3) (Figure 2.5), qui présentent de fortes attaques de la chenille processionnaire du pin et qui se localisent à différentes altitudes correspondant à :

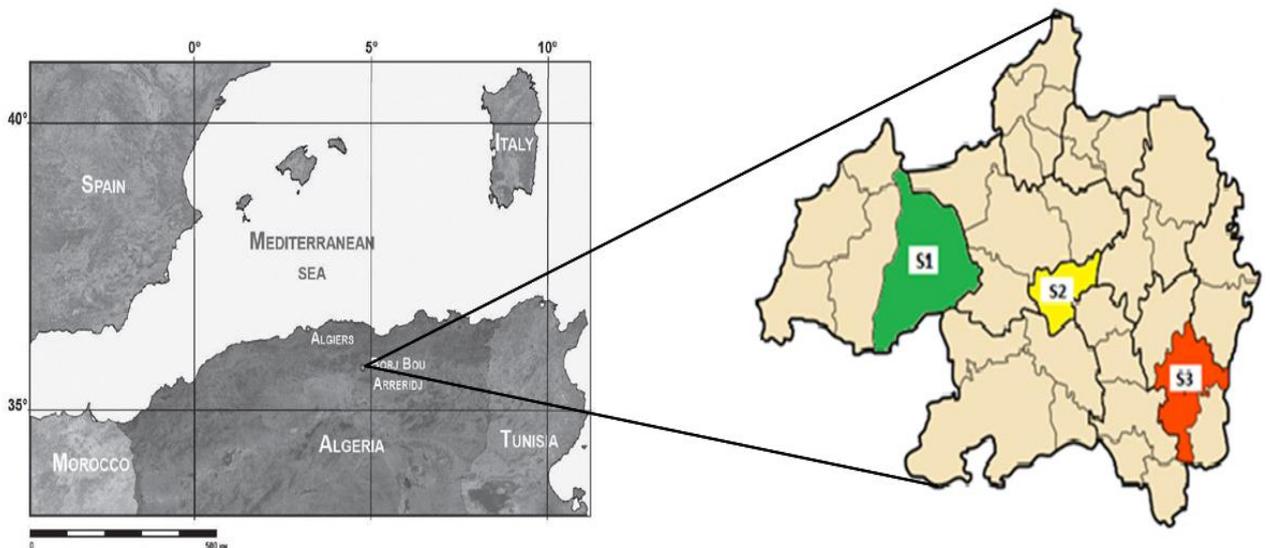


Figure 2.5: Localisation de la zone d'étude sur la carte de la wilaya de Bordj Bou Arreridj. (S1: Site de Mansoura; S2: Site de Djehaifa; S3: Site de Ras El Oued).

- Station de Mansoura (forêt de sidi Makhelouf-Mansoura) (S1): Elle fait partie de la grande forêt domaniale de Bibans (7518 ha), exactement dans la commune de Mansoura à l'extrême ouest de la wilaya de BBA, ce canton qui occupe sur une surface de 912,5 ha, à une altitude de 791 m, il est caractérisé par une couverture végétale dominée par 80% de pin d'Alep et autre espèces comme le genévrier, le chêne, etc... (Figure 2.6 a).

- Station de Bordj Bou Arreridj (forêt de Boumergued-Djehaifa) (S2): Cette forêt se situe à la sortie Est de la commune de BBA, elle est caractérisée par une formation végétative estimée à 98% de pin d'Alep, et d'une hauteur qui varie de 1 à plus de 12 m. Notre travail est réalisé sur la parcelle appelé Djehaifa, qui occupe environ de 279 ha sur la commune de BBA et 127 ha sur la commune d'El Annasser (406 ha au total) et qui se trouve à une hauteur de 930 m d'altitude. (Figure 2.6 b).

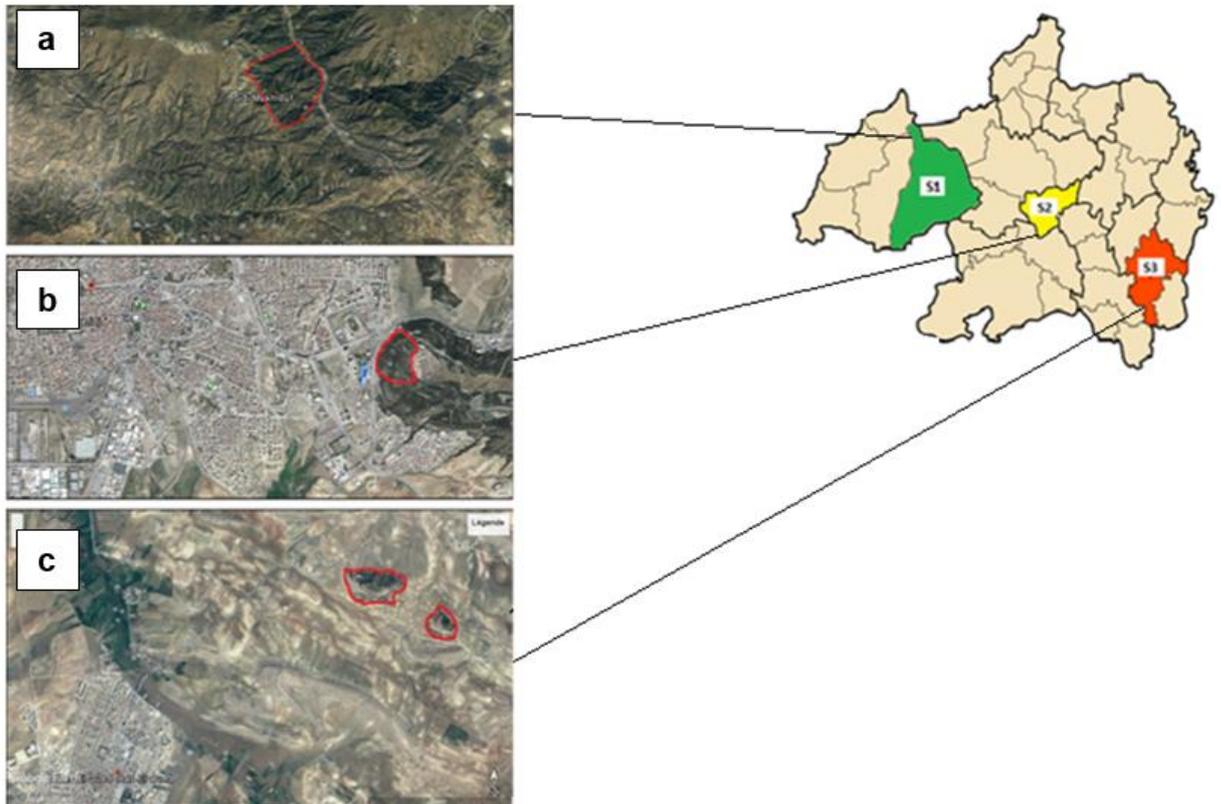


Figure 2.6. Vue satellitaire des trois stations d'études

(a) : la forêt de sidi Makhelouf-Mansoura ; (b) : la forêt de Boumergued-Djehaifa ; (c) : la forêt de Karim Essaid-Ras El Oued

- Site de Ras El Oued (forêt de Karim Essaid) (S3) : Elle se situe à l'Est de la wilaya de Bordj Bou Arreridj, environ de 5 km de la ville de Ras El-Oued, occupe une superficie de 53 ha, son altitude est de 1123 m, recouvre quasi totalement par le pin d'Alep (Figure 2.6 c).

2.2. Modèle biologique

Le modèle biologique retenu pour notre étude est la chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff., au stade L₂ et L₃. Plusieurs raisons ont présidé à ce choix : il s'agit d'un insecte redoutable du pin d'Alep, responsable des

ralentissements de la croissance de l'arbre ainsi que d'une vulnérabilité plus forte de ces arbres aux maladies et autres ravageurs des forêts, elle constitue également un problème de santé publique.

2.2.1. Observation du cycle biologique

2.2.1.1. Piégeage des adultes

Le piégeage lumineux et à phéromone sexuelle des adultes s'effectue à partir de la mi-juin pour les altitudes de 1200 m, du début juillet en moyenne altitude à partir de 800 m et du début août en basse altitude. Les résultats quotidiens et cumulés du piégeage obtenus pour un reboisement donnée permettent par extrapolation de déterminer à l'avance et à quelques jours près la date de ponte, de début et de fin des éclosion et des stades larvaires L₁, L₂ et L₃. Ainsi on aura : le début du stade L₁, 35 jours après la première capture, le début du stade L₂ 47 (35+12) jours après la première capture, et le début du stade L₃, 62 (47+15) jours après la première capture [302].

2.2.1.2. Éclosion des pontes et phénologie larvaire

Pour affiner les dates prédéterminées par le piégeage des adultes, nous avons procédé dans les stations choisis à des observations des rythmes d'éclosion des pontes entre la mi-août et le début septembre.

Ainsi il s'agit de récolter 100 pontes (Figure 2.7) à compter de la date où 50% des paillions ont été capturés, de les conditionner sous abri extérieur et de noter les éclosions jusqu'à 100% [23] (Annexe A). Cette observation été jumelée par un échantillonnage des pontes sur le terrain. En effet, dans chacune des stations, 10 arbres ont été choisis et repéré par des numéros sur toutes les pontes qui seront décelées.

Les relevés hebdomadaires ont été faits du début d'éclosion jusqu'au stade L₃. Les résultats des relevés (Annexe B) pour chacune des stations et la synthèse pour toute la forêt permettent de confirmer les données prédites sur le développement des différents stades de la chenille à partir du piégeage des adultes.

2.2.2. Enquête sur les infestations

L'estimation des taux d'infestation peut être estimée sur la base des dénombrements de pontes et/ou de nids d'hiver [302] (Annexe C). Les nids d'hiver de processionnaire sont recensés, après l'hiver pour chaque cycle, selon un échantillonnage au hasard stratifié [303].

L'échantillonnage a été mené selon la méthode des transects proposé par Frontier [304] dans les trois sites considérés. Nos parcelles d'étude sont situées au milieu

de chaque site, de sorte à éviter les effets de bordure et des agglomérations. Nous avons retenu 3 transects dont chacun contient 10 arbres sains et 10 arbres infestés. Nous avons opté à l'échantillonnage des arbres de taille moyenne (entre 1.50m et 3m), ce qui nous facilite la mesure des tailles d'arbres et aussi le comptage et l'observation des nids.



Figure 2.7: Les manchons des pontes récoltés sur aiguilles (a) et sur rameaux (b) (Photographie originale).

2.3. Échantillonnage sur terrain

Les observations et les dénombrements des nids d'hiver (Figure 2.8), la mesure de la hauteur des arbres, la prise de l'orientation cardinale des nids sur chaque arbre, la collecte des aiguilles du pin pour les dosages phytochimiques et le prélèvement des individus de cette chenille pour les tests d'évaluation de la toxicité des huiles essentielles étudiés ont été effectués dans chaque station.



Figure 2.8 Pré-nid et Nid d'hiver (Photographie originale, 2017).

La hauteur est la caractéristique la plus importante à mesurer ou à estimer en vue de déterminer le volume et la structure verticale d'un peuplement forestier. A titre propre et sous certaines conditions, elle joue un rôle essentiel dans la caractérisation de la productivité des milieux forestiers [305]. La mesure de la hauteur totale d'un arbre consiste à mesurer la longueur du segment de droite qui joint le pied de l'arbre et son bourgeon terminal.

Des mesures de la hauteur individuelle des arbres ont été effectuées dans chaque site pour les 30 arbres sélectionnés. La méthode recommandée par Rondeux [305] a été adoptée pour ces mesures en utilisant une perche de longueur connue (2 à 3 m) et placée verticalement contre l'arbre à mesurer. L'utilisation d'une perche de 3 à 5 m est préconisée pour une précision maximale. Le comptage des nids de la chenille processionnaire a été réalisé systématiquement sur les trente (30) arbres sélectionnés dans les trois sites étudiés, tout en prenant en considération le positionnement des nids par rapport à la direction cardinale.

La récolte du matériel végétal a été effectuée dans les trois stations, des quantités d'aiguilles du pin d'Alep ont été récoltées à partir de chaque arbre sélectionné, sains et infestés. La récolte du matériel biologique a été également effectuée par le triage des chenilles de 10 colonies par station pour les deux stades larvaires étudiés (L₂ et L₃) (Figure 2.9).



Figure 2.9: triage des chenilles selon le stade larvaire
(Photographie originale, 2017).

2.4. Mesures réalisées et méthodes d'analyses au laboratoire

2.4.1. Elevage du modèle biologique

Les chenilles sont élevées au laboratoire dans des gobelets en plastiques transparents recouverts par un tissu perforé afin de permettre d'une part, l'aération pour ces individus et d'autre part, la facilité d'application des différents traitements. Ces gobelets sont placés par la suite dans une pièce où les conditions climatiques sont 28°C avec une alternance lumière/obscurité de 12h/12h. Elles sont nourries avec des feuilles de pin d'Alep et les individus sont prélevés en fonctions des besoins des expériences (Figure 2.10).



Figure 2.10. Elevage des larves de la chenille processionnaire du pin
(Photographie originale 2016).

(a) : Les feuilles de pin d'Alep infestés par la chenille processionnaire, (b): Gobelets contenant les chenilles.

2.4.2. Préparation des différents types de traitements appliqués

2.4.2.1. Extraction des huiles essentielles

Le matériel végétal utilisé dans cette étude, comprend trois plantes aromatiques récoltés de la région de Bordj Bou Arreridj. Le thym (*Thymus pallescens* Noé.), le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) et l'Armoise blanche (*Artemisia herba alba* Asso.) (Annexe D). Nous avons procédé par le séchage du matériel végétal à l'air libre, à l'abri de lumière et d'humidité et à la température ambiante du laboratoire. Devenus secs, les échantillons sont conservés dans des sacs en papier au laboratoire à température ambiante et à l'abri de la lumière.

Les huiles essentielles peuvent être extraites des plantes par divers procédés dont l'entraînement à la vapeur d'eau et l'hydrodistillation [306 ; 307] et la pression mécanique à froid [308 ; 309 ; 310].

Dans notre étude, l'extraction des huiles essentielles des trois plantes considérées a été réalisée par hydrodistillation des échantillons dans un appareil de type Clevenger [311] Au niveau du laboratoire de la Biologie végétale du département d'Agronomie de l'Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimy de Bordj Bou Arreridj. La distillation de 100 g de chaque échantillon découpés en morceaux de 3 cm environ dure trois heures après l'apparition de la première goutte de distillat à la sortie du tube de condensation de la vapeur (Figure 2.11). L'hydrodistillation obtenue contient une phase aqueuse (hydrolat) ainsi qu'une phase organique (l'huile essentielle). L'huile essentielle est récupérée et séchée avec du sulfate de sodium anhydre. Ces huiles essentielles sont conservées et stockées à 4°C à l'obscurité dans des tubes opaques en verre à une température comprise 0°C et 6°C.

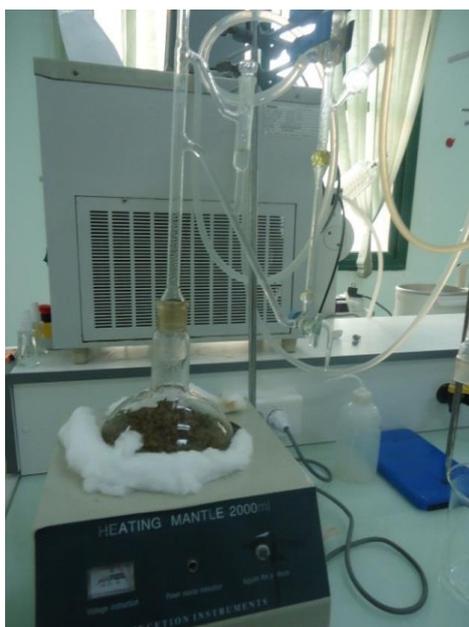


Figure 2.11: Dispositif d'extraction par hydrodistillation (Appareil de type Clevenger) (Photographie originale, 2016).

2.4.2.2. Caractérisation des huiles essentielles étudiées par GC-MS

Les analyses GC ont été réalisées avec un instrument HP-5890 Séries II équipé de colonnes capillaires HP-GC 7890 / SM 5975 -VF WAX et HP-5 (60 m x 0,25 mm, épaisseur de film de 0,25m), fonctionnant de la manière suivante programme de température : 60°C pendant 6 min, rampe de 2°C / min. Après 20 minutes d'attente à 250 °C. De l'hélium He (23 psi / SM - 30 psi / FID) a été utilisé comme gaz porteur à un débit de 0,8 ml / min. Les proportions relatives des constituants de l'huile essentielle étaient des pourcentages obtenus par la normalisation de la surface de pic du FID. Les analyses GC-MS ont été effectuées avec une colonne FID GC 6890: VF WAX (polaire) (60 mx 0,25 mm, épaisseur de film 0,5 um). Des échantillons de 1 µl d'une solution à 10% dans l'hexane ont été injectés par dédoublement. Les masses ont varié de m / z 30 à 350 amu (unité de masse atomique) Les composés sont identifiés par une recherche combinée des temps de rétention (selon la bibliothèque du laboratoire Pyrenessences) et des spectres de masse (bibliothèque NKS, 75 000 entrées). Calculé à partir des zones de pic données par le GC / FID, sans utiliser de facteur de correction. L'identification des constituants a été basée sur la comparaison des temps de rétention avec ceux des échantillons authentiques, en comparant leur LRI à la série des n-hydrocarbures et sur l'appariement par ordinateur des spectres de masse commerciaux (NIST 98 et ADAMS) et de la bibliothèque de fabrication artisanale, construits à partir de substances pures et de composants d'huiles connues et de données de littérature MS [312].

2.4.2.3. Dilutions des huiles essentielles étudiées et présentation du témoin positif

- Phytopréparations à base d'huiles essentielles

Trois doses de concentrations ascendantes ont été préparées pour les trois huiles essentielles étudiées. Les doses préconisées pour la phytopréparation formulée des feuilles de *Thymus palleescens* sont comme suite : (D1 : 0,25%, 0,5%, 1%), pour *Pinus halepensis* (1%, 1,5%, 2%) et (0,5%, 1%, 1,5%) pour *Artemisia herba alba*. L'effet biocide des différentes dilutions est comparé à un témoin négatif (Tween 80 à 3%+ H₂O distillé).

- Témoin positif (Lambda-cyhalothrine 5%)

L'insecticide conventionnel utilisé dans cette étude qui est une préparation commerciale contenant 5% de la matière active lambda-cyhalothrine (Figure 2.12); du groupe chimique des pyréthrinoïdes ont été retenu comme insecticide à l'étude. Les pyréthrinoïdes sont neurotoxiques et affectent à la fois le système nerveux central et périphérique [32]. Ce sont des insecticides résiduels de contact ce qui signifie que le résidu conserve la propriété insecticide et pénètre à travers la cuticule de l'insecte [32]. Les pyréthrinoïdes agissent sur le système nerveux en

inhibant la conduction du Na^+ et du K^+ dans les cellules nerveuses bloquant ainsi la transmission de l'influx. Ce sont des insecticides ayant un haut niveau d'activité contre une grande variété d'insectes. Ils agissent rapidement à tous les stades de croissance et particulièrement contre les larves [313]. Leur haute activité permet l'application de petites quantités soit environ 100 grammes à 1 hectare (g/ha). Les pyréthrinoïdes sont considérés comme très toxiques pour les invertébrés aquatiques et pour la plupart des poissons [313]. La dose préconisée pour la Lambda-cyhalothrine est celle prescrite sur l'étiquette du produit (dose homologuée).



Figure 2.12 : L'insecticide conventionnel (Lambda-cyhalothrine 5%) (Photographie originale, 2016).

2.4.2.4. Application des traitements

Les tests d'évaluation des potentialités larvicide des phytopréparations à base des huiles essentielles de *Thymus palleescens*, *Pinus halepensis* et *Artemisia herba alba* à l'égard des larves du 2^{ème} et 3^{ème} stade larvaire de *Thaumetopoea pityocampa* ont été conduits comme suit :

Les expérimentations ont été réalisées dans des gobelets de 5 cm de diamètre, avec des lots de 20 larves. Ces dernières ont été pulvérisées par les différents types de traitement avec leurs différentes doses. Nous avons appliqués les doses retenus pour chaque huile essentielle formulée et la dose homologuée pour l'insecticide conventionnel. Pour le témoin, nous avons pulvérisé les individus de cette chenille par un mélange de Tween⁸⁰ à 3% et l'eau.

Pour chaque dose testée, trois répétitions ont été effectuées. Le taux de mortalité est calculé après 24 heures, 48 heures, 72 heures et une semaine du traitement (Figure 2.13).

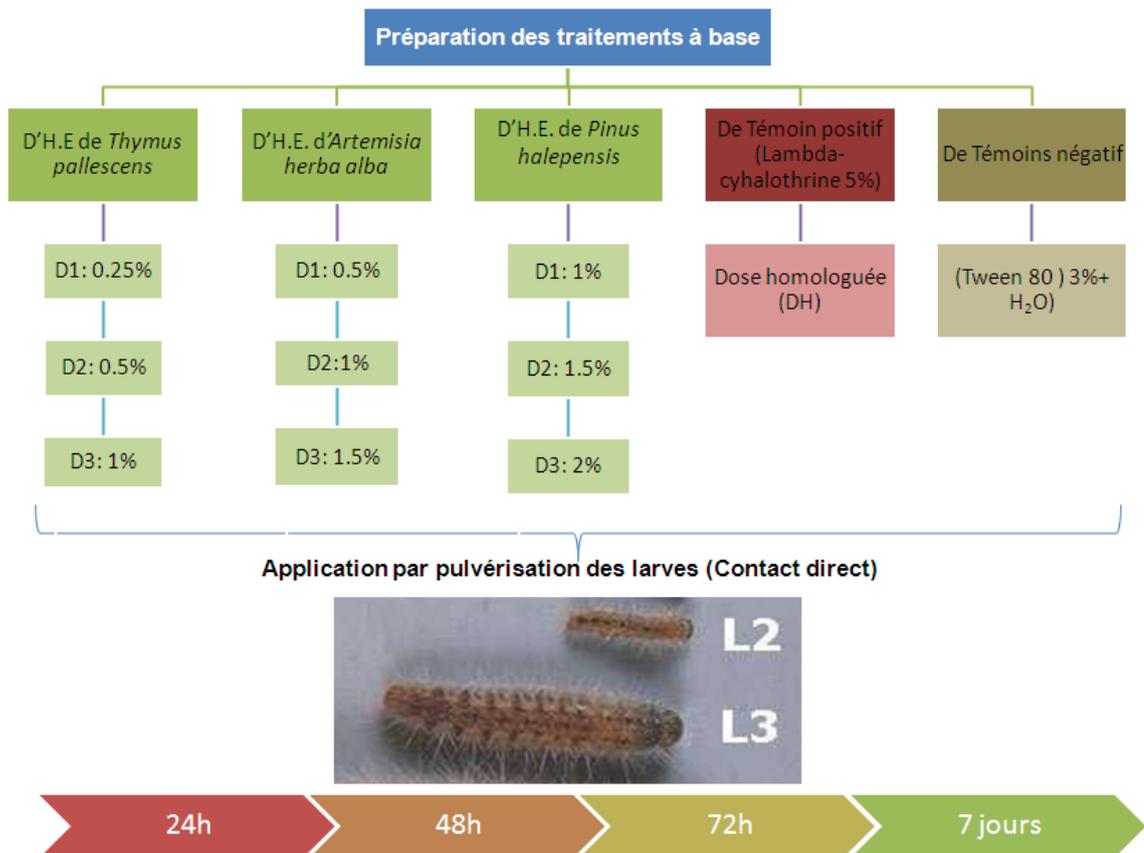


Figure 2.13 : Schéma récapitulatif de la logique des traitements appliqués sur les larves de *Thaumetopoea pityocampa*.

2.5. Méthodes d'estimation de certains paramètres populationnels

2.5.1. Estimation du taux de mortalité

Selon Marmonier *et al.* [314], le taux de mortalité est le taux de disparition d'individus dans des conditions d'environnement données (varient en fonction de la population considérée et des facteurs du milieu). Il est donné par la diminution de la population par mortalité/variation du temps.

2.5.1.1. Calcul du pourcentage de la mortalité observée

Le pourcentage de mortalité observée chez les individus témoins et testé été estimé par la formule suivante :

$$\text{Mortalité observée} = \frac{\text{Nombre d'individus morts}}{\text{Nombre total des individus}} \times 100$$

2.5.1.2. Calcul du pourcentage de la mortalité corrigée

Le nombre d'individus dénombrés morts dans une population traitée par un toxique n'est pas le nombre réel d'individus tués par ce toxique. Il existe, en fait

dans toute population traitée une mortalité naturelle qui vient s'ajouter à la mortalité provoquée par ce toxique, les pourcentages de mortalité doivent être corrigés par la formule d'Abbott [315].

$$\text{Mortalité corrigée} = \frac{M2 - M1}{100 - M1} \times 100$$

Avec :

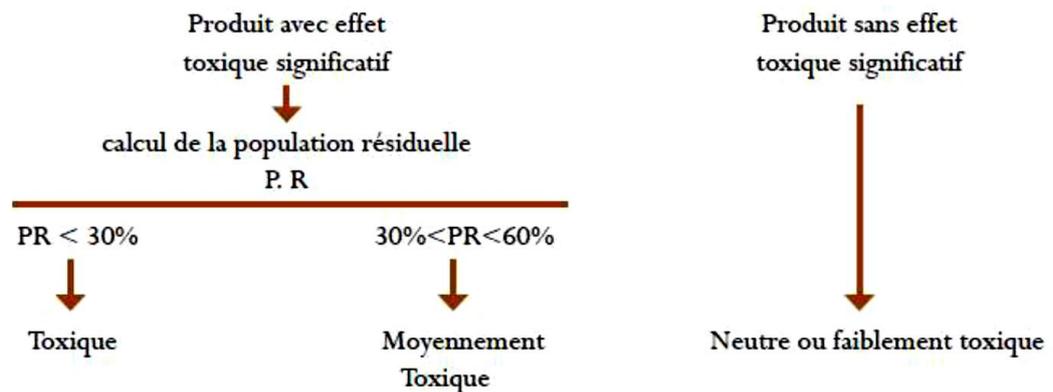
M1 : pourcentage de mortalité dans le témoin

M2 : pourcentage de mortalité dans le lot traité

Si la mortalité du témoin dépasse 20% le test est annulé

2.5.1.3. Calcul du pourcentage des populations résiduelles

L'évaluation de l'effet toxique des huiles essentielles formulées et de l'insecticide a été réalisée par le calcul de la population résiduelle (P.R) selon le Test de Dunnett [316].



$$PR = \frac{\text{Nb de formes mobiles (NFM) par traitement} \times 100}{\text{Nb de formes mobiles par témoin (eau)}}$$

P.R < 30% molécule toxique

30% < P.R < 60% molécule moyennement toxique

P.R > 60% molécule neutre ou faiblement toxique

2.6. Calcul des DL₅₀

L'efficacité d'une substance toxique se mesure par sa DL₅₀ qui définit la quantité de substance toxique entraînant la mort de 50% des individus de la population traitée. En effet, le nombre d'individus morts dans une population traitée par une substance toxique n'est pas le nombre réel d'individus tués par cette substance. Il existe dans toute population une mortalité naturelle qui s'ajoute à la mortalité provoquée par la substance appliquée. Les pourcentages de mortalité doivent être corrigés par la formule d'Abbott [315].

La méthode de calcul de la DL₅₀ et de ses limites de confiance était décrite par Miller et Trainer [317] et Muhammad [318]. Elle consiste à porter sur du papier Log *Probit*, le pourcentage de mortalité en fonction du log de la dose.

2.7. Dosages biochimiques chez les chenilles

2.7.1. Dosages des protéines

Lors du traitement des échantillons, ceux-ci sont conservés dans la glace, afin de ne pas altérer la qualité des spécimens. Le broyage des échantillons s'effectue dans un tampon Tris-HCl de 0,01M à pH 7. Le volume de tampon est ajusté en fonction de la masse de tissus frais, à raison de 50 mg de tissus par mL de tampon utilisé. Pour broyer l'échantillon, trois billes en inox de 3 mm de diamètre sont placées dans chaque échantillon, qui est ensuite positionné dans un broyeur (Retsch) pour 2 minutes de broyage à une fréquence de 30 Hz. Les billes sont retirées et l'homogénat est vortexé avant de prélever les 20 µL nécessaires au dosage des protéines totales

Les concentrations en protéines sont déterminées selon la méthode de Bradford [319]. Une dilution de l'échantillon est effectuée respectivement au 1/5 et au 1/3 pour déterminer les concentrations en protéines totales et cytosoliques de chaque échantillon. Vingt microlitres de cette dilution sont placés dans un eppendorf et 1 ml de liquide de Bradford est ajouté. Le mélange est vortexé et placé à l'obscurité 30 minutes. La densité optique de l'échantillon est alors mesurée au spectrophotomètre (Cary 50, Varian) à une longueur d'onde de 595 nm. Une gamme étalon est réalisée parallèlement à partir de 4 concentrations de sérum d'albumine bovine (BSA) à 125, 250, 500 et 750 µg/ml afin de déterminer les concentrations de protéines présentes dans l'échantillon et exprimées en mg/ml. Des blancs sont également réalisés en remplaçant le volume d'échantillon par un volume de tampon de broyage Tris-HCl.

2.7.2. Dosage des lipides et des glucides

Au cours de ces dosages, les quantités de lipides, de glycogène et de sucres libres sont déterminées de manière individuelle pour chaque organisme et généralement 10 larves sont dosées par condition testée. Les protocoles suivants sont une adaptation des méthodes de Van Handel [320 ; 321] et de Plaistow et *al.* [322].

Le traitement des échantillons s'effectue dans la glace par souci d'homogénéité de température au cours des manipulations. Le broyage des chenilles est réalisé dans 800 µl de méthanol pour 2 minutes. Chaque échantillon ainsi homogénéisé est divisé en deux volumes identiques (A et B) consacrés respectivement au dosage des lipides et à celui des sucres libres et du glycogène.

2.7.2.1. Dosage des lipides

Dans l'homogénat (A) de chaque échantillon est ajouté 200 µl de chloroforme afin de solubiliser les lipides totaux, puis les échantillons sont vortexés et placés durant 20 minutes à 4°C. Après cette période, les homogénats sont de nouveau vortexés puis 100 µl de ces solutions sont transférés dans des tubes en pyrex (16x100mm). Les tubes sont placés dans un bain-marie à 95°C durant 5 minutes jusqu'à complète évaporation du solvant. Puis 200 µl d'acide sulfurique (95%) sont ajoutés dans chaque échantillon avant d'être de nouveau placés dans le bain-marie à 95°C pendant 10 minutes. Finalement, les tubes sont sortis du bain puis stockés dans un bain glacé où 5 ml de réactif vanilline-acide phosphorique sont additionnés. Après 25 minutes d'attente, la densité optique du mélange est mesurée à 525 nm à l'aide du spectrophotomètre (Cary 50, Varian). La quantité de lipides dans les échantillons est déterminée en utilisant une courbe de calibration basée sur une solution standard d'huile d'olive (Sigma-Aldrich) (1g/l) solubilisée dans du chloroforme.

2.7.2.2. Dosage des sucres

La totalité des sucres présents dans les échantillons (glycogène et sucres libres) sont déterminés en utilisant l'homogénat B. Afin de séparer les deux types de sucres, 200µl de sulfate de sodium (2%) sont ajoutés aux homogénats. Durant 20 minutes à 4°C le glycogène est adsorbé et précipite avec le sulfate de sodium. Puis les échantillons sont centrifugés à 4°C pendant 4 minutes à 2000g ceux-ci afin d'obtenir un culot de glycogène. Ainsi, le surnageant (solution 1) et le culot sont analysés séparément.

Pour mesurer le glycogène facilement, le culot obtenu est remis en suspension dans 400 µl d'eau distillée (solution 2) à l'aide de trois billes en inox et d'une minute de broyage à 30 Hz (Mixer Mill MM 400, Retsch, Haan, Germany). Après avoir vortexé chaque fraction d'échantillon, le surnageant contenant les sucres libres (solution 1) et le culot suspendu contenant le glycogène (solution 2), 300 µl de chaque solution sont transférés respectivement dans un tube en pyrex (16x100 mm). Puis 5 ml de réactif d'anthrone sont ajoutés à chaque échantillon avant d'être placé dans un bain-marie à 95°C pendant 17 minutes. Enfin les tubes sont sortis du bain et placés dans un bain d'eau glacé durant 10 minutes pour arrêter la réaction. La densité optique de chaque échantillon est lue à 630 nm avec le spectrophotomètre (Cary 50, Varian). Les résultats ont été exprimés en µg. g⁻¹ MF à partir d'une courbe de calibration réalisée à partir d'une solution standard de glucose (1 g/l) solubilisée dans de l'eau distillée.

2.8. Dosages phytochimiques des aiguilles du Pin d'Alep

Les aiguilles du Pin d'Alep issus des arbres attaqués et non attaqués par la chenille processionnaire du pin ont été séchées à l'étuve à 70°C pendant 24 h

puis à 100°C pendant 24 h. Elles ont ensuite été broyées grossièrement avec un mixeur puis réduites en poudre fine et homogène à l'aide d'un broyeur (Retsch ZM 200, Allemagne) muni d'un tamis de porosité 0,05 mm. Tous les dosages phytochimiques ont été réalisés au Laboratoire de Biochimie de l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimy de Bordj Bou Arreridj.

Les composés phénoliques sont des métabolites secondaires synthétisés par la plante quand elle est en état de stress participant dans les mécanismes de défense. Afin de mettre en évidence la présence ou l'absence de certains composés appartenant aux familles chimiques des métabolites secondaires, nous avons réalisé des analyses phytochimiques (les polyphénols, flavonoïdes, les tanins et les sucres totaux) pour comparer leurs concentrations chez les arbres sains et infestés.

2.8.1. Extraction et dosage des polyphénols

Pour extraire les polyphénols par macération, nous avons opté pour le protocole décrit par Romani et *al.*, [323], 30 g de la poudre végétale, macérée à température ambiante pendant deux heures et demie avec 100 ml de méthanol à 70 % v/v. Après filtration sur un tissu mousseline, les filtrats sont centrifugés pendant 20 min à 4000 t/min à température ambiante, filtrés sur papier filtre N° 1 et conservés à 4°C jusqu'à utilisation.

Le dosage des polyphénols totaux a été effectué selon la méthode de Folin-Ciocalteu (FC) [324], l'extrait de macération est mélangé avec 500 µl du réactif FC et 400 µl de Na₂CO₃ à 7,5 % (m/v). Le mélange est agité et incubé à l'obscurité et à température ambiante pendant 10 min et l'absorbance est mesurée à 760 nm par un spectrophotomètre UV (Perkin Elmer). Les résultats sont exprimés en mg équivalent acide gallique/g de matière végétale sèche (mg GAE/g) en se référant à la courbe d'étalonnage de l'acide gallique (Annexe E).

2.8.2. Extraction et dosage des flavonoïdes

Les flavonoïdes, constituent le groupe le plus représentatif des composés phénoliques, l'estimation quantitative des flavonoïdes contenus dans les extraits du pin d'Alep, est réalisée suivant une méthode colorimétrique du trichlorure d'aluminium AlCl₃ [325], en y apportant des modifications légères, on met 1 ml d'extrait méthanolique préparé et on ajoute 1 ml d'AlCl₃ à 10%, puis le mélange est vigoureusement agité, l'ensemble est incubé à l'ombre à la température ambiante pendant 10 minutes, l'absorbance est lue à 430 nm en utilisant un spectrophotomètre UV (Perkin Elmer).

Le dosage de flavonoïdes a été réalisé selon la méthode colorimétrique décrite par Dehpour et *al.* [326]. Les résultats sont exprimés en milligramme d'équivalent de Quercétine par gramme de matière sèche (mg EQ/gMS) (Annexe E).

2.8.3. Extraction et dosage des Tanins condensés

Les tanins condensés sont déterminés par la méthode de la vanilline en milieu acide décrite par Ba et *al.* [327], le réactif de vanilline a été préparé en mélangeant à volume égal : HCl à 8% (v/v), le méthanol à 37% (v/v) et 4% de vanilline dans du méthanol (m/v). Le mélange a été maintenu à 30 °C avant le dosage.

200 µl de chaque extrait à analyser ont été ajoutés à 1000 µl de réactif de vanilline; le mélange a été agité puis incubé à l'obscurité à 30°C pendant 20 min. L'absorbance est mesurée à 500 nm par un spectrophotomètre UV (Perkin Elmer) contre un blanc constitué d'un mélange de méthanol (37%) et de HCl (8%) à volume égal. Les résultats sont exprimés en mg équivalent catéchol/g de matière végétale sèche en se référant à la courbe d'étalonnage de l'acide gallique (Annexe E).

2.8.4. Extraction et dosage des Sucre totaux

La quantité de Sucre totaux est déterminée par spectrophotométrie. La méthode utilisée est celle décrite par Dubois et *al.*, [328], les sucres simple, oligosaccharides et polysaccharides et leur dérivés réagissent avec le phénol et l'acide sulfurique concentré et donnent une coloration jaune–orange. La réaction est sensible, la coloration reste stable pendant plusieurs heures. Pour les margines, 1 ml de l'échantillon (extrait méthanolique) est mélangé à d'une solution phénolique (5%) et d'acide sulfurique concentré (97%).

Après agitation, les tubes sont conservés à l'obscurité pendant 10 min puis passés au bain marie à 30°C pendant 30 min. La densité optique est mesurée à 488 nm, les valeurs obtenues sont traduites en concentration par référence à une courbe étalonnage de D-glucose préalablement établie de concentrations allant de 0 à 60 µg/ml (Annexe E).

2.9. Analyses statistique

Les résultats sont soumis à une série de tests statistiques :

- Analyse de la variance (ANOVA pour ANalysis Of VAriance), à un facteur de variation, avec le test de Tukey au seuil de 9% ($P < 0.05$) pour identifier les groupes homogènes,
- l'analyse en composantes principales (ACP). Le principe de cette analyse est de représenter un phénomène multidimensionnel par un graphique à deux ou plusieurs dimensions.
- Test de corrélation croisée (Cross correlation). Ce test a été utilisé pour comparer les moyennes de différents paramètres au cours de la saison et estimer

s'il existe ou non des décalages (lag) de réponse entre les paramètres. Les décalages sont exprimés en semaines avec une probabilité associée.

- Corrélations-régressions : Afin de prévoir l'abondance de des différentes formes biologiques de la chenille processionnaire du pin à partir de combinaisons linéaires des variables quantitatives, des analyses ont été effectuées en utilisant une régression multiple standard. En raison du décalage entre plusieurs paramètres, toutes les variations hebdomadaires ont été synchronisées. Lorsque 2 variables quantitatives varient conjointement, on doit mesurer la significativité du coefficient de corrélation. En conditions paramétriques, il s'agit du coefficient r de Pearson et en conditions non paramétriques, du coefficient ρ de Spearman. L'équation de la droite de régression est calculée lorsque les distributions sont en accord avec la normalité et que le coefficient de Pearson est significatif.

Pour enlever l'effet d'une variable quantitative C corrélée à une variable d'intérêt V , on calcule l'équation de la droite de régression ($y = ax + b$) puis les résidus de cette régression. Ces résidus sont calculés en retranchant les valeurs réelles (V_i) de la variable d'intérêt aux valeurs prédites par l'équation de la droite : Résidu (i) = $V_i - (a \times C_i + b)$.

- Barycentre : L'ordre d'arrivée écologique des formes biologiques de *Thaumetopoea pityocampa* a été calculé en se basant sur les barycentres. Les barycentres ou abondances maximales des variations temporelles des espèces et / ou des familles ont été calculés selon Djazouli *et al.* [329], avec la formule suivante : $B = \sum (R_{Gi} \times A_{Bi}) / \sum A_{Bi}$ avec R_{Gi} = rang du mois i de l'année et A_{Bi} = abondance de l'espèce au mois i .

Les tests statistiques ont été traités par le logiciel PAST version 3.1 [330]. Le seuil de 5% a été retenu pour tous les tests. Nous avons également eu recours au logiciel XLSTAT vers. 9 [331].

CHAPITRE 3

RESULTATS

Les résultats sont présentés en deux grandes parties :

- i. *La dynamique des populations, l'ordre d'arrivée écologique des formes biologiques et l'impact de certains paramètres abiotiques des forêts sur la fréquence et l'intensité des attaques de la chenille processionnaire *Thaumetopoea pityocampa* Schiff.* Cette partie s'est focalisée sur l'évaluation de certains paramètres abiotiques (les directions cardinaux et l'altitude ainsi que l'influence des facteurs climatiques) pour déterminer la stratégie de choix de l'emplacement des nids d'hiver de la chenille processionnaire *T. pityocampa*. D'autre part, Nous nous sommes intéressés à l'étude des *relations plante hôte et ravageur*. Cette partie de l'étude nous permettra de mettre en évidence l'incidence des attaques de la chenille sur la composition phytochimique de la plante hôte *Pins halepensis* entre autres la qualité des composés terpéniques.

- ii. *L'activité larvicide des huiles essentielles sur les deux stades larvaires (L_2 et L_3) de *Thaumetopoea pityocampae* Schiff.* Le but principal est de mettre en valeur les espèces spontanées du tiroir et de rationaliser l'utilisation des bioproduits. Dans cette optique, l'activité insecticide et la toxicité (DL_{50}) des huiles essentielles de *Thymus palleescens*, *Artemisia herba alba* et *Pinus halepensis* en comparaison avec un insecticide conventionnel ont été évalués sur les populations de la chenille processionnaire du pin. Également, Nous nous sommes intéressés à la stabilité écologique de la cohorte larvaire par estimation *des traits de vie biochimiques*, notamment les réserves énergétiques, par l'analyse de leurs remaniements en fonction des types et des doses des traitements.

3.1. Dynamique temporelle des formes biologique de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff.

Le suivi durant deux campagnes (2015-2016 et 2016-2017) de l'abondance globale des individus de la chenille *Thaumetopoea pytiocampae* Schiff évoluant sur *Pinus halepensis* dans trois stations classés dans l'étage bioclimatique semi-aride, et qui se trouvent à différentes altitudes, nous a permis de cerner la fluctuation temporelle des formes biologiques de cette chenille.

La dynamique des populations de la processionnaire du pin apparaît très différente dans les trois stations étudiées, avec un nombre d'individus très variables d'une station à l'autre et entre les deux campagnes d'investigation (Figure 3.1).

La lecture individualisée de la fluctuation de l'abondance globale de *Thaumetopoea pityocampa* fait ressortir, le facteur station comme élément de restriction de l'évolution des densités du bioagresseur. Ce constat est confirmé par la probabilité globale calculée par le test d'ANOVA, qui stipule l'existence d'une différence très hautement significative ($p=0,0008$) entre les abondances enregistrées dans les trois stations pour la campagne 2016-2017 et une différence non significative ($p= 0,155$) pour la campagne 2015-2016 (Figure 3.1).

Dans l'esprit de mieux visualiser la dynamique temporelle des formes biologique de *Thaumetopoea pityocampa* par rapport au facteur campagne, nous avons été conduits à tracer la courbe moyenne de l'abondance globale pour chaque campagne. Cette dernière, nous a permis de constater que l'abondance globale des individus de la chenille processionnaire *T. pityocampa*, semble avoir une différence notable entre les deux campagnes et qui se manifestent dès le mois d'août et se maintient jusqu'au mois de novembre (Figure 3.1).

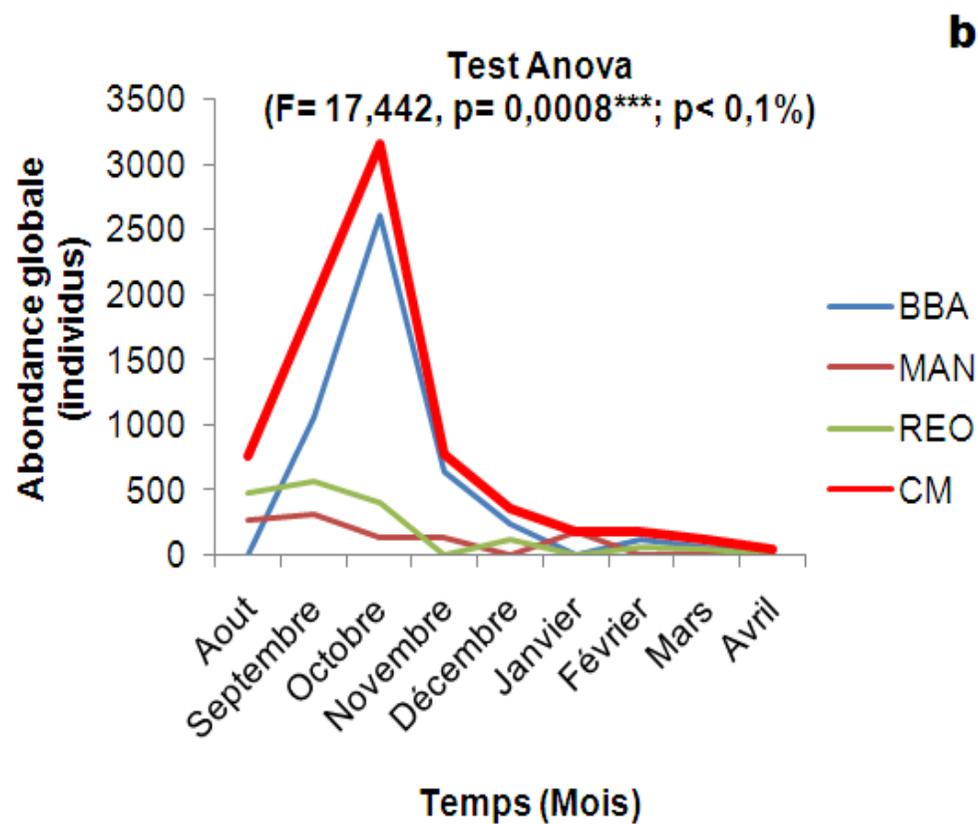
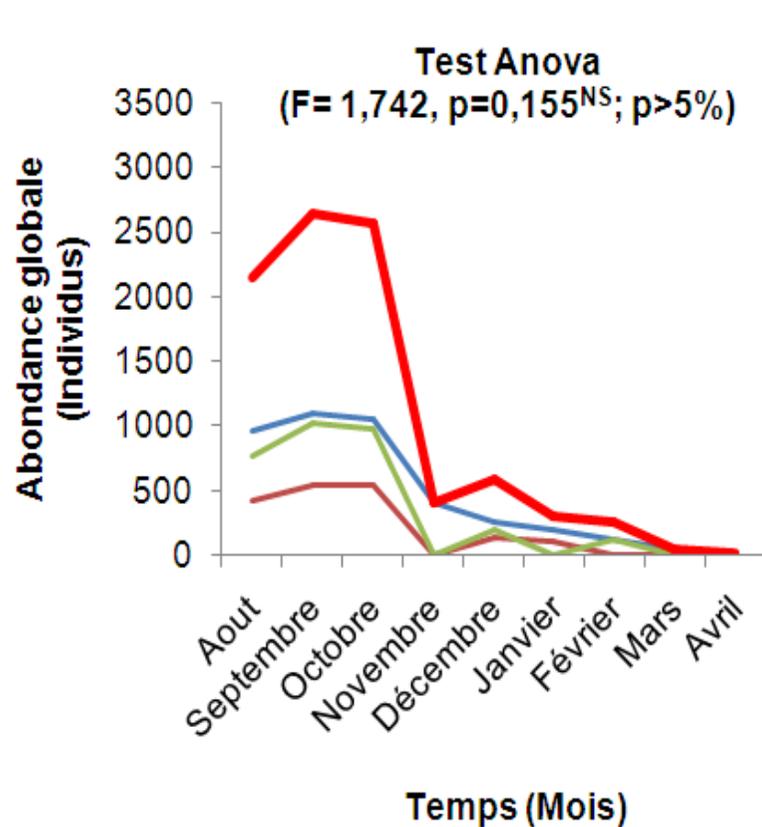


Figure 3.1: Evolution temporelle de l'abondance globale des différentes formes biologique de *Thaumetopoea pityocampa* dans les stations étudiées pour deux campagnes
(a) : Campagne (2015-2016) ; (b) : Campagne (2016-2017) ; BBA : Bordj Bou Arreridj (Djehaifa); MAN : Mansoura ; REO : Ras EL oued ; CM : Courbe moyenne.

Ce constat est confirmé par la probabilité globale calculée par le test d'ANOVA, qui stipule l'existence d'une différence très significative ($p=0,002$; $p<1\%$). La tendance de démarcation des différents groupes doit être vérifiée statistiquement. Un test de variance ANOVA associé au test de Tukey, a permis de visualiser les abondances mensuelles moyennes des individus de la chenille processionnaire du pin pour chaque campagne (Tableau 3.1) d'une part, et d'autre part, les groupes homogènes de l'abondance globale des individus de la CPP dans chaque station durant les deux campagnes, comme indiqué dans le tableau 3.2.

Tableau 3.1 : Résultat du test ANOVA associé au test de Tukey (Groupes homogènes) concernant les abondances mensuelles moyennes des individus durant les deux campagnes, avec un intervalle de confiance à 95%

Mois	Moyennes des abondances (Campagne 2015-2016)	Moyennes des abondances (Campagne 2016-2017)
Octobre	1055,000	881,000 a
Septembre	652,000	851,000 a
Novembre	258,000	716,333 a
Aout	254,000	193,000 b
Décembre	120,667	136,333 b
Janvier	62,333	98,000 b
Février	62,333	83,000 b
Mars	40,667	15,000 b
Avril	16,667	6,667 b
<i>F</i>	1,813	11,852
<i>p</i>	1,157 ^{NS}	0,0001 ^{***}

Selon les résultats du tableau 3.2, l'abondance globale des individus présents dans la station de Mansoura et de Ras El Oued sont presque similaires durant les deux campagnes d'études. Concernant la station de Bordj Bou Arreridj (Djehaifa), cette dernière qui a été classée dans le même groupe homogène que les autres stations pour la campagne 2015-2016, ce retrouvant dans un groupe différent durant la campagne 2016-2017.

Tableau 3.2 : Résultat du test ANOVA associé au test de Tukey (Groupes homogènes) concernant l'abondance globale dans les trois stations durant les deux campagnes de suivi, avec un intervalle de confiance à 95%

Mois	Moyennes des abondances (Campagne 2015-2016)	Moyennes des abondances (Campagne 2016-2017)
Bordj Bou Arreridj (Djehaifa)	530,889	460,333 a
Mansoura	118,111	240,444 b
Ras El Oued	121,556	193,667 b
<i>F</i>	1,227	18,927
<i>p</i>	0,3113 ^{NS}	0,0001 ^{***}

Les estimations des niveaux de population dans chaque station durant deux campagnes de suivi sont rapportées sur la figure 3.2. La répartition temporelle des formes biologiques de la chenille processionnaire du pin, présente une structure plus équilibrée durant la campagne 2015-2016 comparé à la campagne 2016-2017. L'abondance globale du premier stade de développement de ce bioagresseur (stade œufs) est plus importante dans la station de Bordj Bou Arreridj par rapport aux autres stations. La femelle adulte semble effectuée sa ponte durant la période estivale qui couvre le mois d'août pour la campagne 2015-2016, alors que pour la deuxième campagne, la ponte est signalée durant le laps temporel (août-septembre). Ce décalage est enregistré uniquement dans la station de Bordj Bou Arreridj (Figure 3.2 a, b).

Concernant l'éclosion des œufs, l'apparition des larves (L_1) de la chenille processionnaire du pin, avec une abondance globale maximale est en faveur de la station de Bordj Bou Arreridj par rapport à la station de Mansoura et Ras El Oued. L'apparition des larves (L_1) se manifeste uniquement durant le mois de septembre dans les trois stations pendant la campagne 2015-2016, mais s'étale jusqu'au mois d'octobre pour la station de Bordj Bou Arreridj.

Le deuxième et le troisième stade larvaire (L_2 et L_3), se montrent présents dans les trois stations étudiées le long de la période automno-hivernale, avec des abondances en gradation positive dont le pic de disponibilité est enregistré entre les mois d'octobre et novembre. Le déclin progressif des stades L_2 et L_3 laisse place au quatrième stade (L_4) qui s'affiche discrètement dès le mois de décembre au niveau des deux stations Bordj Bou Arreridj et REO, avec une abondance marquée au profit de la station de Bordj Bou Arreridj durant les deux campagnes. Le même stade se retraite au niveau de la station de Mansoura dès le mois janvier pour la campagne 2016-2017 (Figure 3.2.b). Le dernier stade larvaire L_5 se présente en mois de février dans les trois stations pendant la campagne 2016-2017. Durant la campagne 2015-2016, ce stade larvaire se manifeste tardivement (Mars) dans la station de REO en comparaison avec les autres stations (Figure 3.2 a).

3.1.1. Effet des températures et du rayonnement solaire sur les fluctuations annuelles de *Thaumetopoea pityocampa*

La dynamique des populations de la chenille processionnaire du pin apparait très différente durant ces deux années d'études avec une disponibilité variable et une activité et latence, selon que le climat est plus ou moins favorable au ravageur, et des pics de gradation parfois fortement décalés d'une année à l'autre (Figure 3.3) De 2016 à 2017, la dynamique d'activité de la chenille processionnaire du pin sur le Pin d'Alep au niveau de trois pineraies de la wilaya de Bordj Bou Arreridj se caractérise par une même tendance évolutive répartie sur deux périodes distinctes. En général, la première période (plus importante) s'étale entre mi-juillet et mi-novembre et coïncide avec la saison automnale.

Durant les deux années d'étude (2016 et 2017), au cours de la période automnale, les pics d'abondance des différentes formes biologiques de la chenille ont été enregistrés en octobre avec des valeurs minimales des températures de 13,4 et 10,2°C et des valeurs maximales de 26,2 et 23,1°C. La seconde période englobe la période automno-hivernale. Cette période est caractérisée par des populations moins denses avec un pic d'abondance observé entre janvier et mi-février durant les deux années d'investigation. Durant les deux années d'étude, le rayonnement solaire mensuel augmente de l'hiver à l'été, dont le mois de décembre est le mois le moins ensoleillé (2016 : 7,9 MJm⁻²j⁻¹ ; 2017 : 6,9 MJm⁻²j⁻¹) et juillet le mois le plus ensoleillé (26,4 MJm⁻²j⁻¹) pour les deux années.

L'année 2016, bien qu'elle soit favorable à la processionnaire, elle ne présente pas des conditions climatiques optimales pour ce défoliateur, du fait des très fortes chaleurs estivales. L'insecte s'est adapté par une sortie tardive des papillons et réalise ainsi la totalité de son développement larvaire sur la période la plus froide, ce qui est possible grâce aux températures hivernales douces (moyennes des températures minimales de janvier supérieures à 1°C) et au très bon ensoleillement (plus de 2300 heures par an, et plus de 7 kWh/m²/j d'irradiation solaire quotidienne en octobre).

L'année 2017, apparait comme la plus favorable à la processionnaire, car elle est suffisamment ensoleillée pour compenser les froids hivernaux (1900 à 2800 heures de soleil par an et plus de 8,6 kWh/m²/j d'irradiation solaire quotidienne en octobre) sans être aussi chaud en été que l'année 2016. Il semblerait que les températures minimales et maximales ont joué défavorablement sur les populations de la chenille. Nous avons en effet enregistré entre les mois d'août et octobre des deux années, des valeurs minimales moyennes de 10,6 et 10,4°C et des températures maximales moyennes très élevées de 36,5 et 36,9°C. L'apparition de températures hivernales plus douces a permis la survie et le développement des stades larvaires, ce qui explique le développement hivernal de *Thaumetopoea pityocampa*. Le déclin d'activité des chenilles de mai à septembre,

serait dû à l'effet de la température moyenne mensuelle qui dépasse 25°C. Les températures létales minimales (-16°C) n'ont pas été observé durant ces deux années d'études, dont les pluies pourraient être à l'origine d'une diminution très sensible des populations de février jusqu'au début du mois de juillet.

3.1.2. Modèle d'ajustement et d'optimisation relative aux formes biologique de la chenille processionnaire du pin en fonction des facteurs climatiques étudiés

Les résultats de la régression multiple (Tableau 3.4 et 3.5), nous ont permis d'obtenir plusieurs modèles de prévision de la fluctuation numérique de *Thaumetopoea pityocampa* par rapport aux facteurs climatiques étudiés par station durant deux campagnes de suivi (2015-2016/2016-2017). Les équations polynomiales ont été arrêtées après vérification de l'importance des probabilités associées à chaque variable explicative. Le coefficient de détermination a également affirmé les valeurs du degré élevé de corrélation entre les valeurs observées et prédites. Alors que, les coefficients de corrélation indiquent le haut degré d'asociabilité entre les variables explicatives (facteurs climatiques de chaque station durant deux campagnes) et la variable expliquée (Abondance des formes biologiques).

Le facteur température semble influencer l'abondance de différentes formes biologiques de la chenille processionnaire dans les trois stations étudiées durant les deux campagnes de suivi (Tableau 3.4 et 3.5). Les températures minimales et maximales influencent positivement l'abondance des œufs de *Thaumetopoea pityocampa* dans les trois stations considérées durant les deux campagnes étudiées. Contrairement, aux abondances du stade larvaire L₄ pendant la campagne 2016-2017 et L₄ ; L₅ de la campagne 2015-2016 qui sont influencé négativement par ces facteurs climatiques.

Tableau 3.4 : Présentation des équations d'estimation des abondances formes biologique de la chenille processionnaire du pin en fonction des facteurs climatiques durant la campagne 2015-2016.

Station	Formes biologiques	r Pearson	p	R ²	Equation de régression
BBA	œufs	0,415	0,179	0,172	$Y_{\text{œufs}} = 0,08T_{\text{min}} + 9,744$
		0,406	0,189	0,165	$Y_{\text{œufs}} = 0,013T_{\text{max}} + 22,48$
	L ₃	0,300	0,246	0,132	$Y_{L_3} = -0,02RS + 18,08$
		0,363	0,344	0,089	$Y_{L_3} = -0,022T_{\text{max}} + 24,30$
	L ₄	0,317	0,314	0,100	$Y_{L_4} = -0,024T_{\text{min}} + 10,95$
		-0,374	0,321	0,140	$Y_{L_4} = -0,045T_{\text{max}} + 24,49$
L ₅	-0,449	0,144	0,201	$Y_{L_4} = -0,040RS + 18,24$	
	0,366	0,241	0,134	$Y_{L_5} = -0,059T_{\text{min}} + 11,03$	
MAN	œufs	-0,328	0,298	0,107	$Y_{L_5} = -0,082T_{\text{max}} + 24,37$
		0,415	0,180	0,172	$Y_{\text{œufs}} = 0,019T_{\text{min}} + 9,744$
	L ₄	0,406	0,190	0,165	$Y_{\text{œufs}} = 0,029T_{\text{max}} + 22,48$
	L ₄	-0,317	0,314	0,100	$Y_{L_4} = -0,046T_{\text{min}} + 10,95$

		-0,374	0,230	0,140	$Y_{L4} = -0,084T_{max} + 24,49$
		-0,449	0,143	0,201	$Y_{L4} = -0,075RS + 18,24$
L ₅		-0,366	0,241	0,134	$Y_{L5} = -0,069T_{min} + 11,03$
		-0,328	0,298	0,107	$Y_{L5} = -0,082T_{max} + 24,37$
œufs		0,415	0,180	0,172	$Y_{œufs} = 0,10T_{min} + 9,744$
		0,406	0,190	0,165	$Y_{œufs} = 0,016T_{max} + 22,48$
REO	L ₄	0,317	0,315	0,100	$Y_{L4} = -0,033T_{min} + 10,95$
		-0,374	0,321	0,140	$Y_{L4} = -0,061T_{max} + 24,49$
		-0,448	0,144	0,201	$Y_{L4} = -0,040RS + 18,24$
	L ₅	-0,309	0,327	0,096	$Y_{L5} = -0,048T_{min} + 10,94$

BBA : Bordj Bou Arreridj, MAN : Mansoura, REO : Ras El Oued

Tableau 3.5 : Présentation des équations d'estimation des abondances formes biologique de la Chenille processionnaire en fonction des facteurs climatiques durant la campagne 2016-2017

Station	Formes biologiques	r Pearson	p	R ²	Equation de régression	
BBA	L ₁	0,362	0,247	0,131	$Y_{L1} = -0,011RS + 18,73$	
	L ₂	0,362	0,247	0,131	$Y_{L2} = -0,011RS + 18,73$	
	L ₃	0,473	0,153	0,193	$Y_{L3} = -0,017RS + 18,9$	
	L ₄		-0,364	0,271	0,119	$Y_{L4} = -0,035T_{min} + 11,14$
			-0,429	0,164	0,184	$Y_{L4} = -0,061T_{max} + 24,14$
MAN	œufs	-0,473	0,120	0,224	$Y_{L4} = -0,050RS + 18,9$	
		0,452	0,139	0,204	$Y_{œufs} = 0,039T_{min} + 9,531$	
		0,402	0,195	0,162	$Y_{œufs} = 0,049T_{max} + 21,78$	
	L ₂	0,362	0,247	0,131	$Y_{L2} = -0,067RS + 18,73$	
	L ₃	-0,439	0,153	0,93	$Y_{L3} = -0,049RS + 18,9$	
REO	L ₄	-0,149	0,175	0,175	$Y_{L4} = -0,090T_{min} + 11,29$	
		-0,461	0,131	0,213	$Y_{L4} = -0,14T_{max} + 24,23$	
	œufs	0,452	0,139	0,204	$Y_{œufs} = 0,022T_{min} + 9,531$	
		0,402	0,194	0,162	$Y_{œufs} = 0,028T_{max} + 21,78$	
	L ₂	0,362	0,247	0,131	$Y_{L2} = -0,044RS + 18,73$	
L ₃		-0,439	0,153	0,93	$Y_{L3} = -0,045RS + 18,73$	
		-0,345	0,270	0,119	$Y_{L4} = -0,067T_{min} + 11,14$	
		-0,429	0,164	0,184	$Y_{L4} = -0,116T_{max} + 24,14$	
	L ₄	-0,474	0,119	0,224	$Y_{L4} = -0,096RS + 18,97$	

BBA : Bordj Bou Arreridj, MAN : Mansoura, REO : Ras El Oued

Quel que soit la station étudiée, la précipitation présente un facteur de sensibilité pour l'abondance des œufs durant la campagne 2015-2016. Au contraire, l'abondance des individus du stade larvaire L₅ présent dans la station de REO pendant l'année 2015-2016, ainsi que les individus du stade larvaire L₄ pour l'année 2016-2017b sont favorisés par ce facteur climatique. En fin, le facteur rayonnement solaire semble avoir un effet significatif sur l'abondance des différents stades larvaire de la chenille processionnaire du pin à savoir : L₃ et L₄ pour l'année 2015-2016 et les stades L₁, L₂, L₃ et L₄ durant la campagne 2016-2017.

3.2. Stratégie de choix de l'emplacement des nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin

3.2.1. Effet des facteurs abiotique sur l'abondance des nids d'hiver

Les résultats des dénombrements des nids d'hiver, des mesures de la hauteur des arbres et la hauteur des nids par rapport à la hauteur de l'arbre, la prise de l'orientation cardinale des nids sur chaque arbre sont illustrés dans le tableau 3.6. Le résultat du comptage des nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin effectué dans les trois stations d'étude, montre que les valeurs moyennes du nombre de nids enregistré dans la station de Djehaifa (Bordj Bou Arreridj), Ras El Oued et Mansoura sont presque similaires avec respectivement une moyenne de $1,7\pm 0,59$; $1,6\pm 0,27$ et $1,5\pm 0,23$ nids /arbre.

Les données recueillis sur la hauteur des arbres, montrent que les arbres se trouvant dans la station de Mansoura et Djehaifa (Bordj Bou Arreridj) présentent la même moyenne de la hauteur (2,54 m) par rapport à celles de la station de Ras El Oued (2 m).

Tableau 3.6: Valeurs moyennes de la hauteur des arbres, le nombre de nids d'hiver, position des nids par rapport à la hauteur de l'arbre et l'orientation cardinale des nids.

Localité	Altitude (m)	Hauteur de l'arbre (m)	Hauteur de nids/ hauteur de l'arbre (m)	Nombre de nids et orientation				Moyenne de la hauteur	Nombre de nids total/station
				Nord	Sud	Est	Ouest		
Ras El Oued	1077	2±0,22	1,1±0,14	-	-	1	-	2	15
		2±0,35	1,7±0,21	-	-	1	-		
		1,65±0,35	1,35±0,32	-	1	-	-		
		1,65±0,57	1,65±0,42	-	1	-	-		
		2,3±0,08	2,15±0,56	1	-	-	-		
		1,8±0,23	1,8±0,28	-	-	1	-		
		1,7±0,17	1,6±0,11	-	-	1	-		
		2,1±0,26	1,65±0,1	-	-	1	-		
		2,1±0,52	1,75±0,23	-	-	1	-		
		1,85±0,14	1,6±0,54	-	1	1	-		
		1,85±0,19	1,5±0,32	-	-	1	-		
		1,7±0,56	1,1±0,14	-	-	1	-		
		2,7±0,38	2,5±0,34	-	-	1	-		
2,3±0,42	1,5±0,15	1	-	-	-				
2,3±0,33	1,9±0,25	-	-	1	-				
Mansoura	698	2,15±0,19	0,8±0,36	-	1	-	-	2,54	16
		1,95±0,28	1,4±0,18	-	1	-	-		
		1,95±0,56	1,6±0,37	-	-	1	-		
		2,33±0,38	1,23±0,46	-	1	-	-		
		2,33±0,36	1,59±0,61	-	1	-	-		
		3±0,40	1,9±0,22	-	-	1	-		
		3±0,17	1,9±0,21	-	1	-	-		
		3±0,22	1,7±0,42	-	-	1	-		
2,9±0,23	2,4±0,35	-	1	-	-				

		2,6±0,11	2,55±0,13	1	-	-	-		
		2,6±0,64	2±0,22	-	1	-	-		
		2,95±0,31	2,7±0,35	-	-	1	-		
		3,23±0,25	2,14±0,56	-	-	1	-		
		2,1±0,44	2,1±0,27	1	-	-	-		
		2,1±0,41	1,7±0,18	-	1	-	-		
		2,45±0,28	2,4±0,38	1	-	-	-		
		2±0,09	1,8±0,46	-	-	1	-		
		2,2±0,26	2±0,34	-	-	1	-		
		2,2±0,21	2,15±0,17	-	-	-	1		
		2,9±0,52	2,2±0,25	1	-	-	-	2,54	17
		2,9±0,27	2,4±0,31	-	1	-	-		
		1,65±0,33	1,6±0,42	-	-	1	-		
		2±0,29	1,85±0,33	-	1	-	-		
Bordj Bou		2±0,11	1±0,19	-	1	-	-		
Arreidj	928	2±0,18	1,5±0,25	-	-	1	-		
(Djehaifa)		3±0,22	1,8±0,31	-	1	-	-		
		3±0,24	1,8±0,44	-	1	-	-		
		3±0,23	2,3±0,48	-	1	-	-		
		2,7±0,42	2,5±0,46	-	1	-	-		
		2,7±0,46	2,4±0,40	-	1	-	-		
		3±0,29	1,65±0,16	-	-	1	-		
		3±0,22	2,65±0,19	-	1	-	-		
		3±0,25	2,5±0,11	-	1	-	-		
Total				6	20	21	1		48

3.2.1.1. Influence des stations sur la disponibilité des nids d'hiver

L'évaluation de la disponibilité des nids d'hiver dans les stations étudiés révèle que les trois parcelles présentent une disponibilité différente et qui varie d'une parcelle à une autre, La figure 1a, montre que le taux de présence des nids d'hiver sur les arbres de pin d'Alep dans le station de Ras El Oued et de Djehaifa (Bordj Bou Arreidj) est de 84,44 et 84,18%respectivement, Dans le station de Mansoura, la disponibilité des nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin présente un taux moindre mais qui n'est pas loin du pourcentage des deux stations suscité avec 75,32% (Figure 3.4a).

Le graphique Box-Plot indique par référence aux médianes que la disponibilité des nids d'hiver parait ne pas être conditionnée par l'effet station, Cette similarité est confirmée par le test ANOVA One Way, qui signale la présence d'une différence non significative ($p > 5\%$), Le graphique des boites à moustache, indique un pourcentage similaire de la disponibilité des nids d'hiver dans les trois stations étudiés du faite que la médiane se rapproche du troisième quartile (Q_3) (Figure 3.4b).

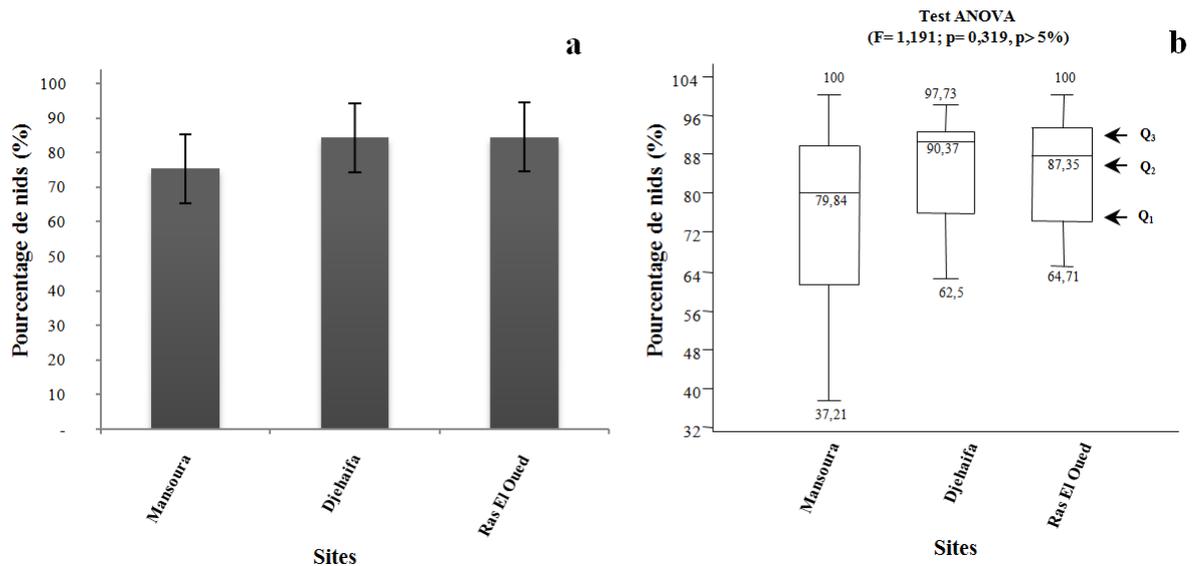


Figure 3.4. Nombre de nids de la chenille processionnaire chez *Pinus halepensis* dans les trois stations étudiées.

(a): Disponibilité des nids d'hiver en pourcentage, (b) : Disponibilité des nids d'hiver par référence aux médianes.

3.2.1.2. Effet de l'altitude sur le nombre de nids

Le graphe de la figure 3a présente le nombre de nids d'hiver de la chenille processionnaire par arbre dans les trois stations étudiés par rapport à leur altitude. Le nombre de nids d'hiver semble ne pas avoir été affecté par l'effet de l'altitude, cette similarité de l'effet altitude sur le nombre de nids d'hiver est confirmée par le test d'ANOVA One Way, qui signale la présence d'une différence non significative (F=0,208 ; p=0,814, p> 5%) (Figure 3.5 b).

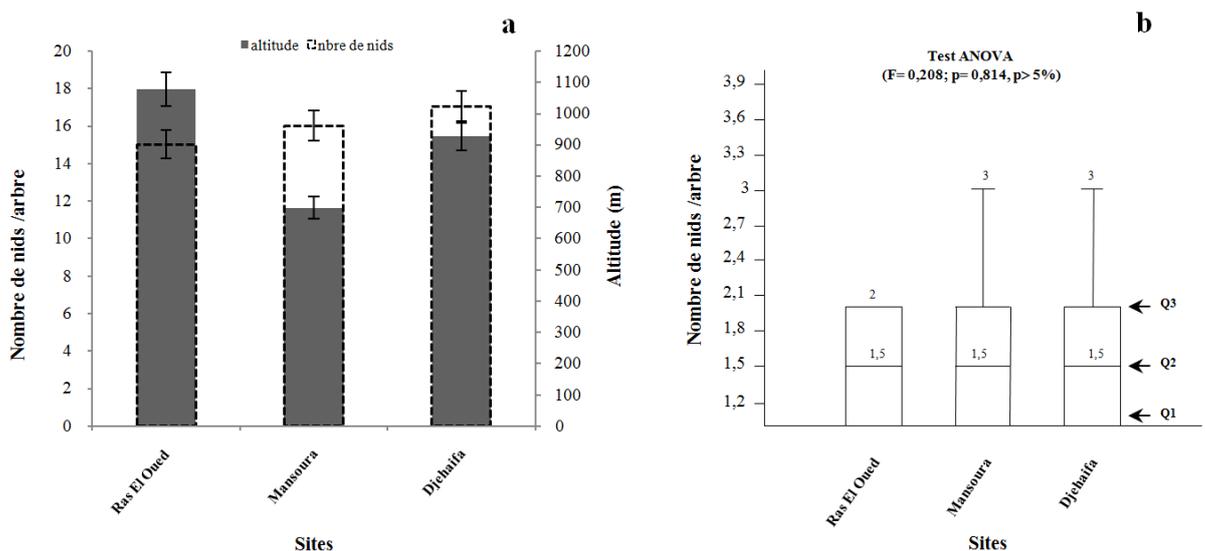


Figure 3.5. : Nombre de nids de la chenille processionnaire chez *Pinus halepensis* par arbre par rapport à l'altitude.

(a) : nombre de nids d'hiver de la chenille processionnaire par arbre dans les trois stations étudiés par rapport à leur altitude, (b) : Analyse par Test Anova One Way du nombre de nids d'hiver par arbre par rapport à l'altitude des trois stations étudiés.

3.2.1.3. Tendance de l'abondance et positionnement des nids d'hiver selon les directions cardinaux

Les données de l'abondance et de l'orientation des nids d'hiver de *T. pityocampa* ont été soumises à une ACP (Analyse en Composantes Principales). L'analyse est satisfaisante pour l'ensemble des paramètres étudiés dans la mesure où plus de 80% de la variance est exprimée sur les deux premiers axes (Figure 3.6). La projection des variables relatives à l'abondance des nids d'hiver dans chaque station étudié à travers l'axe 1 (86,81%), montre que les arbres du pin d'Alep présentent le même niveau d'infestation par les nids d'hiver de la chenille de *T. pityocampa* dans les différentes régions étudiées.

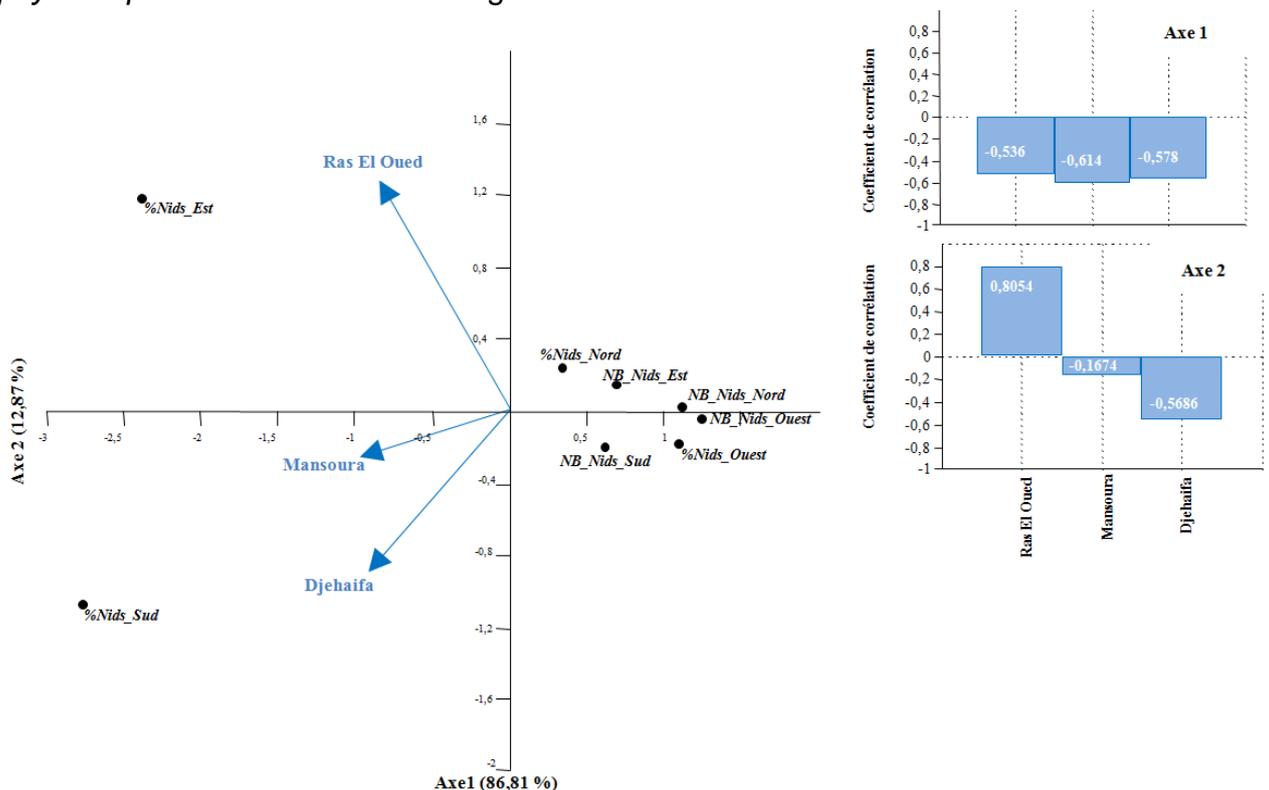


Figure 3.6: Projection des abondances des nids d'hiver selon les directions cardinaux sur les deux axes de l'ACP

En se référant aux coefficients de corrélation enregistrée, cette similitude est confirmée (Figure 3.6 Axe 1). La projection estime que les chenilles de *T. pityocampa* s'attaquent aux essences du pin d'Alep *P. halepensis* quel que soit la région et l'altitude, car ces nids d'hiver sont présent dans les trois stations étudiés avec leur différence altitudinale.

En revanche, la projection des abondances et des orientations cardinaux sur l'axe 2 (12,87%) démontre que le site de Ras El Oued est caractérisé par un positionnement des nids d'hiver aux points cardinaux Est et Nord. Les deux autres sites à savoir Mansoura et Djehaifa sont caractérisés par un positionnement des nids aux points cardinaux Sud et Ouest des nids d'hiver. La corrélation négative

enregistrée confirme cette discrimination de l'effet positionnement (Figure 3.6 Axe 2). La projection estime que les chenilles de *T. pityocampa* installent ses nids d'hiver dans la direction cardinale Sud et Ouest à une altitude de 698 à 928 m et au-delà de cette altitude le positionnement des nids change vers le côté Est et Nord comme c'est le cas du site de Ras El Oued (1077m).

3.2.2. Tendance de la disponibilité des nids d'hiver de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff sous l'effet des facteurs climatiques

On a essayé de faire ressortir les corrélations qui peuvent exister entre l'abondance des nids d'hiver de *T. pityocampa* et le facteur station à travers les caractéristiques climatiques. Le recours au calcul des valeurs du coefficient de Pearson nous a permis de renseigner cette tendance. Le tableau 3.7 exprime les valeurs du coefficient de corrélation de Pearson et les probabilités associées.

Tableau 3.7 : Relation entre les facteurs climatiques et l'abondance des nids d'hiver de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff

Compagne	Facteurs climatiques	Nids d'hiver					
		BBA		MAN		REO	
		<i>r</i> Pearson	p	<i>r</i> Pearson	p	<i>r</i> Pearson	p
2015-2016	T.Min	-0,614	0,033*	-0,485	0,109 ^{NS}	-0,507	0,092*
	T.Max	-0,559	0,058*	-0,523	0,083*	-0,579	0,048*
	RS	-0,442	0,149 ^{NS}	-0,607	0,036*	-0,675	0,016*
2016-2017	T.Min	-0,595	0,041*	-0,555	0,060	-0,505	0,093*
	T.Max	-0,590	0,043*	-0,657	0,021*	-0,582	0,047*
	RS	-0,258	0,410 ^{NS}	-0,566	0,054*	-0,733	0,006**

BBA : Bordj Bou Arreridj, MAN : Mansoura, REO : Ras El Oued, Tmin : Température minimale, Tmax : Température maximale, RS : Rayonnement solaire * : Significative à 5%, ** : Significative à 1%, NS : Non significative.

On constate à première lecture, l'établissement de certaines affinités entre les facteurs climatiques et l'abondance des nids d'hiver. Cette affinité diffère d'une station à l'autre.

Selon les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, nous signalons l'existence d'une corrélation négative entre l'abondance des nids d'hiver et les températures minimales et maximales dans la station de Bordj Bou Arreridj est cela pendant les deux campagnes de suivi avec respectivement ($r=-0,614$, $p=0,033$, $p\leq 0,05$ et $r=-0,559$, $p=0,058$, $p\leq 0,05$). Pour la même station, il existe une corrélation positive entre l'abondance des nids d'hiver et les précipitations durant la campagne 2016-2017 ($r=0,664$, $p=0,018$, $p\leq 0,05$).

On note aussi, la présence d'une corrélation négative entre l'abondance des nids d'hiver et l'ensemble des facteurs climatiques étudiés dans la station de Mansoura

pendant la période 2016-2017. Cependant, les facteurs climatiques étudiés n'enregistrent pas les mêmes corrélations durant la campagne 2015-2016. Car, seuls les températures minimales et le rayonnement solaire sont corrélés négativement avec le nombre de nids ($r=-0,507$, $p=0,092$, $p\leq 0,05$; $r=-0,579$, $p=0,048$, $p<0,05$ et $r=-0,733$, $p=0,006$, $p\leq 0,05$). Concernant la station de Ras El Oued, l'abondance des nids d'hiver est corrélée négativement avec les températures minimales, températures maximales et le rayonnement solaire ($r=-0,523$, $p=0,083$, $p\leq 0,05$ et $r=-0,607$, $p=0,036$, $p\leq 0,05$) pendant les deux campagnes étudiées.

3.3. Incidence de la composition en composés phénoliques de la plante hôte *Pinus halepensis* sur les attaques de la chenille *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Dans les trois stations étudiées

D'après les résultats de Ternaïre, on constate l'existence d'une variation dans les teneurs des Polyphénols et des flavonoïdes des deux catégories d'arbres (sains et attaqués) au niveau des trois sites étudiés. Nous remarquons que les Polyphénols représentent des teneurs plus importantes dans les aiguilles des arbres sains par rapport aux aiguilles issues des arbres attaqués dans les trois sites étudiés. Inversement, les teneurs en flavonoïdes enregistrent des taux les plus élevés chez les arbres attaqués par rapport aux arbres sains (Figure 3.7).

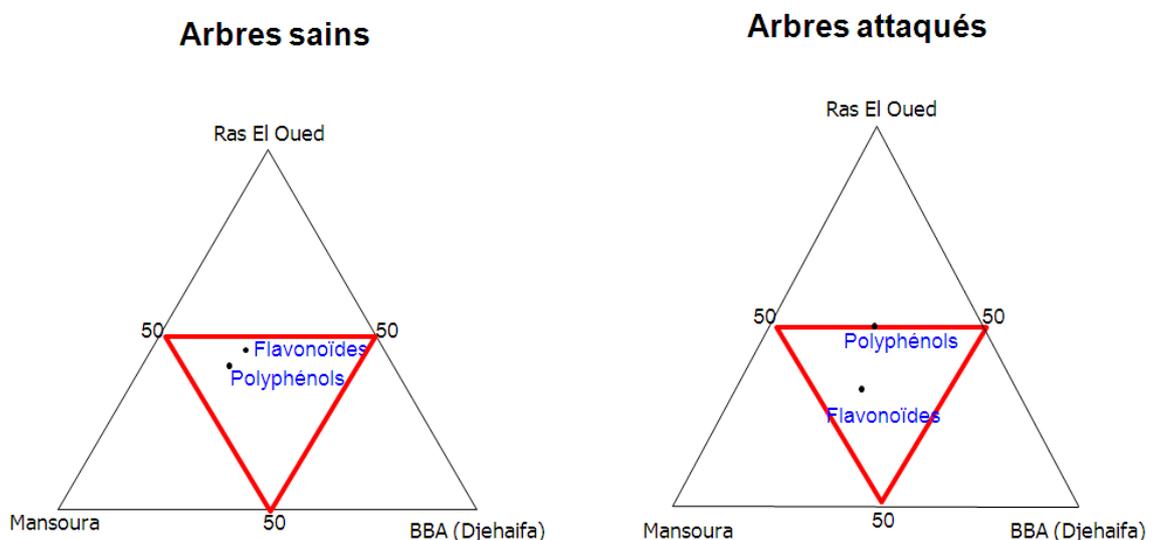


Figure 3.7 : Projection des composés phénoliques du pin d'Alep *Pinus halepensis* selon l'état phytosanitaire

Les résultats de la qualité des composés phénoliques des aiguilles de *Pinus halepensis* en Polyphénols et en flavonoïdes au niveau des trois sites étudiés selon l'état phytosanitaire en rapport avec l'incidence de *T. pityocampa* sont reportés dans le tableau 3.8. Ce dernier, démontrent que les taux des Polyphénols révèlent la présence d'une différence significative marginale (F ratio=5,213 ; $p=0,089$; $p<9\%$), suivant un gradient quantitatif descendant relatif aux stations

Ras El Oued<Mansourah< Bordj Bou Arreridj. Cependant, les teneurs en flavonoïdes des arbres de *P. halepensis* des trois sites étudiés, montrent l'absence d'une différence non significative (F ratio=1,759 ; p=0,255 ; p>5%).

Le tableau ci-dessous (Tableau 3.8) indique que le facteur station révèle l'existence d'une différence significative sur l'accumulation des Polyphénols des aiguilles des arbres de *Pinus halepensis* Mill dans chaque station considérée. Tandis que le facteur station n'interfère guère sur l'accumulation des flavonoïdes du pin d'Alep.

Tableau 3.8:Les teneurs moyennes de l'accumulation des Polyphénols et flavonoïdes des aiguilles des arbres de *Pinus halepensis* Mill. dans les trois stations étudiées.

Stations	Polyphénols	Flavonoïdes
Ras El Oued	0,135±0,009 a	0,516±0,004 a
Mansourah	0,107±0,035 b	0,498±0,052a
Bordj Bou Arreridj	0,074±0,010 c	0,383±0,032a
F-ratio	5,213	1,759
p	0,089*	0,255 ^{NS}

Par ailleurs, le test de Tukey au seuil de 9% (Tableau3.9), montre qu'il existe d'une part, une différence très hautement significative (F ratio=18,612 ; p=0,000 ; p< 0,1%) entre les arbres sains (groupe a) les arbres attaqués (groupe b) en termes d'accumulation des polyphénols, et d'autres part, il n'indique aucune différence significative entre les arbres sains et les arbres attaqués en termes d'accumulation des flavonoïdes (F ratio=0,082 ; p=0,969 ; p> 5%).

Tableau 3.9 : Test de Tukey appliqué aux teneurs moyennes des Polyphénols et flavonoïdes des aiguilles des arbres sains et attaqués de *Pinus halepensis* Mill. dans les trois stations étudiées.

Métabolites	Etat des arbres	Ras El Oued	Mansourah	Bordj Bou Arreridj	F-ratio	p
Polyphénols	sains	0,145±0,006 a	0,146±0,006 a	0,078±0,004 a	18,612	0,000***
	attaqués	0,125±0,005 b	0,071±0,005 b	0,069±0,001 b		
Flavonoïdes	sains	0,150±0,003	0,118±0,011 a	0,078±0,008a	0,082	0,969 NS
	attaqués	0,115±0,002 a	0,139±0,005 a	0,113±0,003a		

3.3.1. Incidence des attaques de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff sur la composition phytochimique des aiguilles de la plante hôte *Pinus halepensis* dans la station de Bordj Bou Arreridj

Le test de Tukey au seuil de 9% (Tableau 3.10), signale la présence d'une différence très hautement significative entre les arbres sains (groupe a) et les arbres attaqués (groupe b) en termes d'accumulation des tanins (F ratio=24,308 ; p=0,008 ; p< 0,1%) et des sucres totaux (F ratio=28,187 ; p=0,003 ; p< 0,1%). Le même test, désigne une différence marginalement significative pour les polyphénols concernant les arbres sains et attaqués (F ratio=6,182 ; p=0,084 ; p<9%). En revanche, le test n'indique aucune différence significative entre les arbres sains et les arbres attaqués en termes d'accumulation des flavonoïdes (F ratio=1,759 ; p=0,255 ; p> 5%).

Tableau 3.10 : Test de Tukey appliqué aux teneurs moyennes des Polyphénols, flavonoïdes, tanins et sucres totaux des aiguilles des arbres sains et attaqués de *Pinus halepensis* Mill. dans la station de Bordj Bou Arreridj.

Etat	Polyphénols	Flavonoïdes	tanins	Sucre totaux
Arbres sains	0,144±0,004a	0,091±0,001	0,242±0,007a	13,79±0,030a
Arbres attaqués	0,157±0,002b	0,095±0,002	0,453±0,042b	25,81±0,093b
F-ratio	6,182	1,759	24,308	28,187
p	0,084*	0,255 ^{NS}	0,008**	0,003**

3.3.2. Incidence des attaques de la chenille *Thaumetopoea pityocampa* Schiff sur la qualité des composés terpéniques (huiles essentielles) des aiguilles de la plante hôte *Pinus halepensis* dans la station de Bordj Bou Arreridj

Les huiles essentielles obtenues par hydrodistillation des aiguilles du Pin d'Alep issues des arbres sains et des attaqués par la chenille processionnaire du pin ont été caractérisées par analyse CG-CM. Une quantification individuelle des composants des deux huiles essentielles a été établie.

D'après le tableau 3.11, on constate que les composées majoritaires de l'huile essentielle de *Pinus halepensis* sont les Monoterpènes et les Sesquiterpènes. Cependant, la composition chimique de l'huile essentielle des arbres attaqués est dominée par la présence des monoterpènes (75,57%), avec des teneurs moindre en sesquiterpènes (16,90%). Tandis que ces deux composées majoritaires sont présentes avec des teneurs très proches chez les arbres sains (42,39 et 38,27%).

D'après ces résultats présentés dans le tableau 3.12, il paraît que l'huile essentielle du *Pinus halepensis* obtenue à partir des aiguilles des arbres attaqués est caractérisée par la dominance des monoterpènes. Les composants majeurs de cette huile sont : α -Pinène (28,32%), β -pinène (6,64%), Limonène (6,27%) β - et Myrcene (6,15%).

L'huile essentielle de *Pinus halepensis* issue des arbres sains est caractérisée par la dominance des sesquiterpènes qui sont le β -Caryophyllène (28,43%) et l' α -Humulène (4,99%). Les monoterpènes sont aussi présents avec les composants suivants : β -Myrcène (12,51%), α -Pinène (12,47%), Terpinolène (6,12%), et Sabinène (4,29%).

3.3.3. Estimation de la mortalité observée sur les larves L₂ et L₃ de *Thaumetopoea pityocampa*

La variation temporelle de la mortalité observée chez le deuxième et le troisième stade larvaire de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff., le sous l'effet des traitements appliqués à base des huiles essentielles testées, montre un effet larvicide plus important selon le degré de concentration des dilutions utilisées, obéissant à un gradient positif D₁<D₂<D₃ pour les huiles essentielles de *Thymus palleescens* Noé, *Pinus halepensis* Mill., et *Artemisia herba alba* Asso. La mortalité signalée sous l'effet des différents traitements se détache nettement de la mortalité signalée chez le témoin (Figure 3.9).

Cet effet s'étale sur une période de 24h à 7 jours. Cependant, l'effet des différentes doses appliquées lors des traitements montre que l'huile essentielle de *Thymus palleescens* s'est démarquée des autres substances. L'huile essentielle du thym à la dose D₃ se révèle efficace et atteint son efficacité maximum (100%) dès les 24h, jusqu'à 7 jours d'application sur les larves L₂. Egalement, substance révèle une forte toxicité vis-à-vis la chenille processionnaire au stade L₃, car la dose D₂ et D₃ se révèle efficace au bout de 24h, s'accroît à 48h et n'atteint son efficacité maximum (100%) qu'au bout du 72h d'application. L'huile essentielle du thym a donc cette substance révèle une forte toxicité vis-à-vis la chenille processionnaire au stade L₂ et L₃.

Concernant les huiles essentielles de *Pinus halepensis* Mill. et *Artemisia herba alba* Asso., ces dernières enregistrent un taux de mortalité variable en fonction des doses et du temps d'exposition. L'huile essentielle du pin d'Alep à la dose D₃ se révèle efficace au bout de 24h, cet effet reste constant jusqu'au 7^{ème} jour sur les larves L₂. Pour les larves L₃, les trois doses (D₁, D₂ et D₃) de l'huile essentielle du pin d'Alep se révèle efficace au bout de 24h, et cet effet reste presque constant jusqu'au 7^{ème} jour d'application. L'huile essentielle d'armoise blanche aux trois doses (D₁, D₂ et D₃) se révèle faiblement efficace après 24h, s'accroît à 48h et atteint son efficacité maximum qu'au 7^{ème} jour (80%) sur les larves L₂. Concernant l'effet de cette huile sur les larves L₃, un effet toxique a été enregistré qui est similaire à celui du Pin d'Alep. Les trois doses (D₁, D₂ et D₃) se révèle efficace au bout de 24h, et cet effet reste presque constant jusqu'au 7^{ème} jour d'application.

L'armoise et le pin d'Alep ont un effet toxique tardif sur les larves L₂ par rapport aux larves du stade L₃ avec une augmentation de taux de mortalité en fonction de

la dose, contrairement à l'huile essentielle de thym qui a un effet de choc sur les individus des deux stades larvaires étudiés de cette chenille. Il semble que le mode d'action d'huile essentielle du pin d'Alep est similaire à celui de l'armoise blanche qui reste presque constant pour les trois doses et enregistre un taux de mortalité variant 70 à 80%

3.3.4. Evolution temporelle de la mortalité corrigée des larves L₂ de *Thaumetopoea pityocampa* sous l'effet des différents types de traitements à base des huiles essentielles de thym, d'armoise et de pin comparé à un insecticide chimique

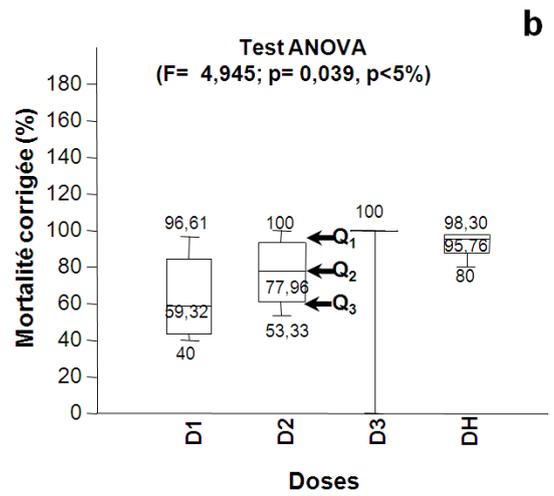
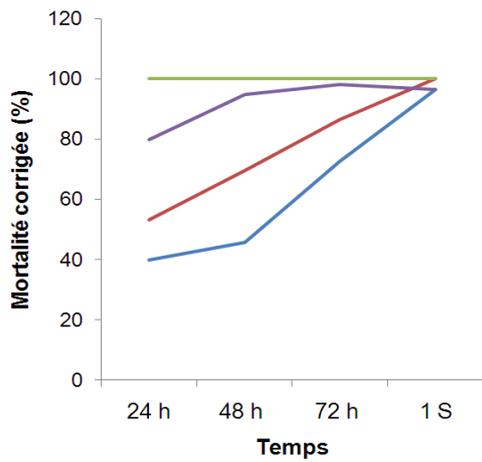
La fluctuation temporelle des mortalités corrigées suit la même tendance de celle signalée chez l'évolution temporelle de la mortalité observée (Figure 3.10).

Les larves L₂ de *Thaumetopoea pityocampa* enregistrent des taux de mortalité plus imposant selon le degré de concentration des dilutions utilisées, obéissant à un gradient positif $D1 < D2 < D3 < DH$ pour l'huile essentielle d'*Artemisia herba alba* Asso (Figure 3.10 c). Concernant le taux de mortalité due à l'application de l'huile essentielle de *Thymus palleescens* Noé. (Figure 3.10 a) et de l'huile essentielle *Pinus halepensis* Mill. (Figure 3.10 e), la gradation de la toxicité et comme suit $D1 < D2 < DH < D3$. Le taux de mortalité signalé de sous l'effet de l'huile essentielle de *Thymus palleescens* Noé et *Pinus halepensis* Mill. (Figure 3.10 a et e) se détache nettement du taux de mortalité signalé sous l'effet de l'huile essentielle d'*Artemisia herba alba* Asso (Figure 3.10 c) en termes d'importance.

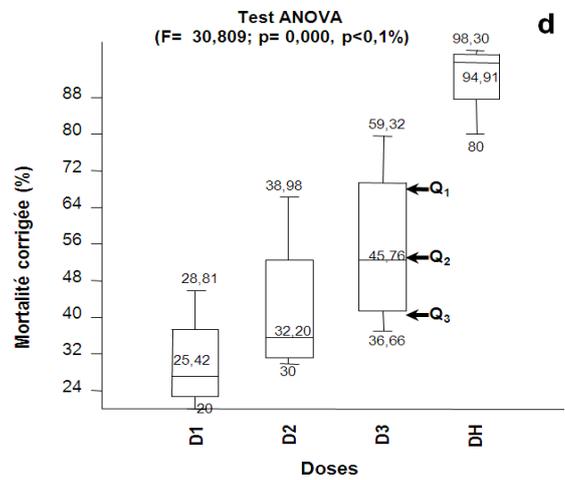
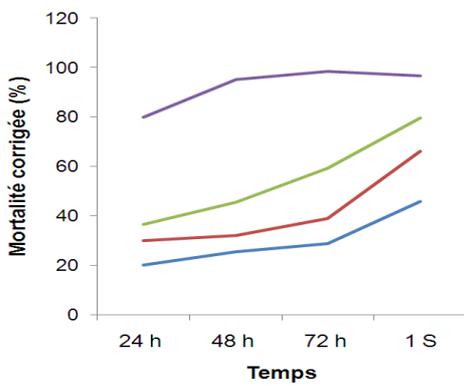
L'efficacité des phytopréparations et de l'insecticide apparaît dès 24h d'exposition des larves L₂ pour l'ensemble des traitements (Figure 3.10a, c et e), l'activité larvicide du principe actif s'accroît graduellement dans le temps, Elle est affichée des mortalités importantes après 48h et 72h d'exposition (Figure 3.10 a, e). En revanche, sous l'effet de l'huile essentielle de l'armoise blanche, la mortalité la plus importante est signalée des 48h d'exposition aux fortes doses (Figure 3.10c).

Les boîtes graphiques en Box-Plot montrent que le taux de mortalité corrigée sous l'effet des fortes doses de l'huile essentielle de *T. palleescens* (Thym D3 : $Q_1=100$, $Q_2=100$, $Q_3=100$) et l'huile essentielle de *P. halepensis* formulé (PinD3 : $Q_1=90$, $Q_2=96,61$, $Q_3=100$) se rapproche de l'effet de la dose homologuée de l'insecticide chimique (DH: $Q_1=80$, $Q_2=95,96$, $Q_3=98,30$) (Figure 3.10b et f). Cependant, le taux de mortalité corrigée sous l'effet la forte dose (D3) de l'huile essentielle d'*Artemisia herba alba* Asso. (Armoise D3 : $Q_1=36,66$, $Q_2=45,76$, $Q_3=59,32$) se tend pour se rapprocher de l'effet de la dose faible de l'huile essentielle de *T. palleescens* (Thym D1 : $Q_1=40$, $Q_2=59,32$, $Q_3=96,61$) (Figure 3.10 d).

Thymus pallescens



Artemisia herba alba



Pinus halepensis

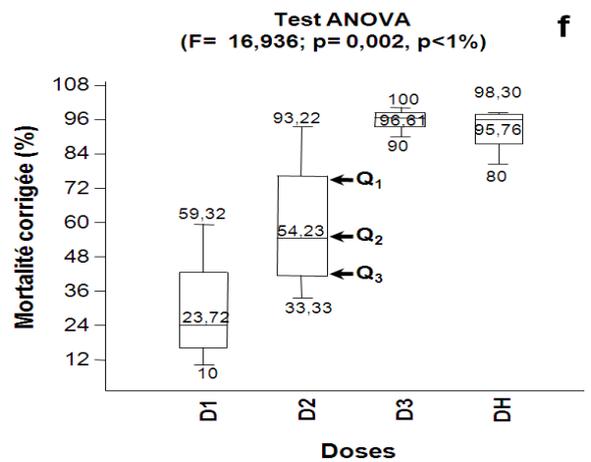
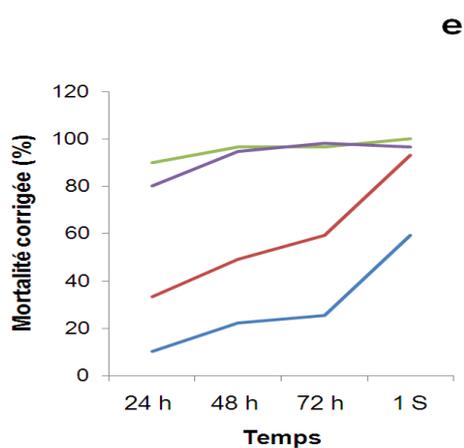


Figure 3.10: Variation de la mortalité corrigée des larvesL₂ de *Thaumetopoea pityocampa* sous l'effet des différentes huiles essentielles appliquées à trois doses en comparaison avec un insecticide conventionnel
D1 : Dose 1, D2 : Dose 2, D3 : Dose 3 ; DH : Dose homologuée

La fluctuation temporelle des mortalités corrigées suit la même tendance de celle signalée chez l'évolution temporelle de la mortalité observée (Figure 3.11).

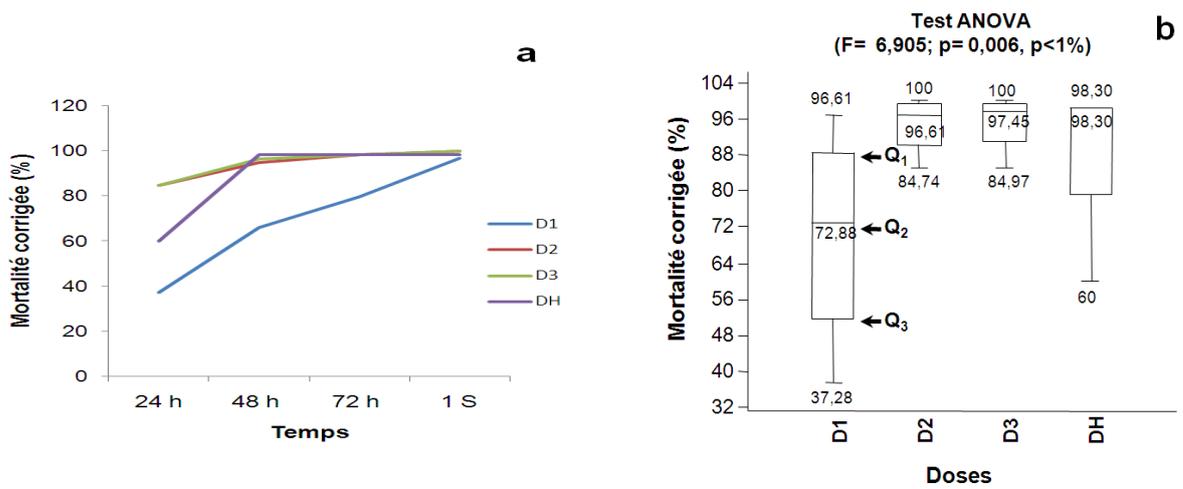
Les larves L₃ de *Thaumetopoea pityocampa* enregistrent des taux de mortalité plus imposant selon le degré de concentration des dilutions utilisées, obéissant à un gradient positif $D1 < D2 < D3$ pour les trois huiles essentielles étudiées (Figure 3.11 a, c, e).

Le taux de mortalité signalé de sous l'effet de l'huile essentielle de *Thymus palleescens* Noé à la D2 et D3 (Figure 3.11a) se détache nettement du taux de mortalité signalé sous l'effet de l'huile essentielle *Pinus halepensis* Mill. et d'*Artemisia herba alba* Asso (Figure 3.11c et e) en termes d'importance.

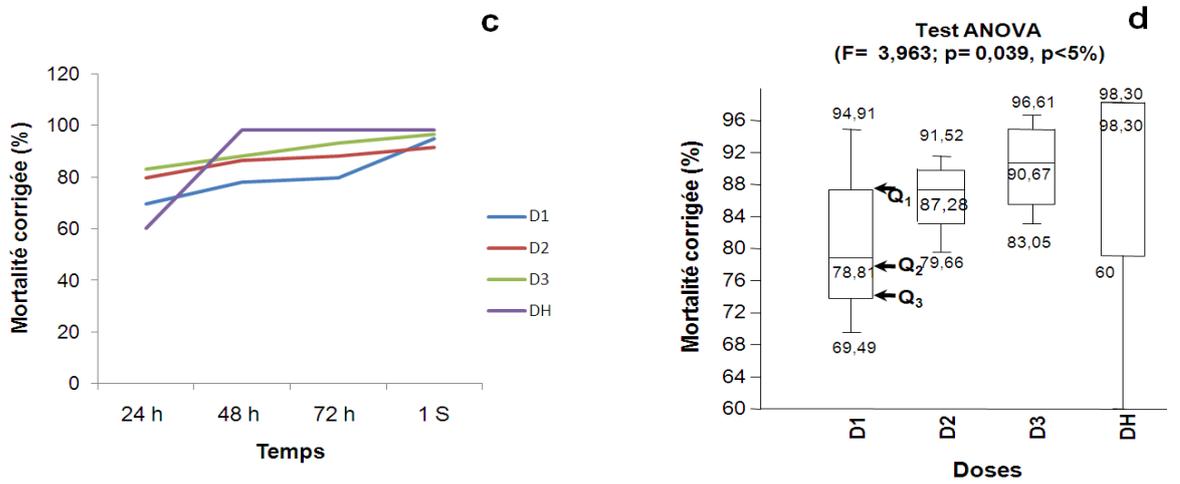
L'efficacité des huiles essentielles et de l'insecticide apparait dès 24h d'exposition des larves L₃ pour l'ensemble des traitements (Figure 3.11 a, c et e), l'activité larvicide du principe actif s'accroît graduellement dans le temps, Elle est affiché des mortalités importantes après 48h et 72h d'exposition (Figure 3.11 a, c, e).

Les boîtes graphiques en Box-Plot montrent que le taux de mortalité corrigée sous l'effet des fortes doses de l'huile essentielle de *T. palleescens* (Thym D3 : Q₁=84,97, Q₂=97,45, Q₃=100) et l'huile essentielle de d'*Artemisia herba alba* Asso (Armoise D3 : Q₁=83,05, Q₂=90,67, Q₃=96,61) se rapproche de l'effet de la dose homologuée de l'insecticide chimique (DH: Q₁=80, Q₂=95,96, Q₃=98,30) (Figure, 3.11 b et d). Cependant, le taux de mortalité corrigée sous l'effet la forte faible dose (D1) de l'huile essentielle de *P. halepensis* (Pin D1 : Q₁=72,88, Q₂=85,59, Q₃=93,) se tend pour se rapprocher de l'effet des forte doses (D3) des l'huiles essentielles de *T. palleescens* et d'*Artemisia herba alba* Asso (Figure 3.11f).

Thymus pallescens



Artemisia herba alba



Pinus halepensis

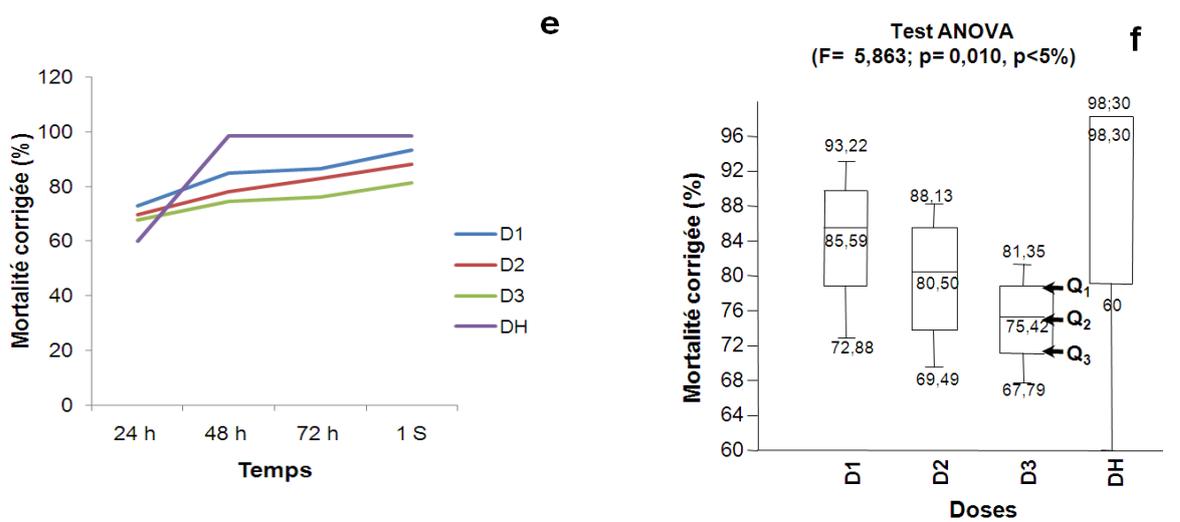


Figure 3.11: Variation de la mortalité corrigée des larves L₃ de *Thaumetopoea pityocampa* sous l'effet des différentes huiles essentielles appliquées à trois doses en comparaison avec un insecticide conventionnel
 D1 : Dose 1, D2 : Dose 2, D3 : Dose 3 ; DH : Dose homologuée

3.3.5. Détermination de la DL₅₀ après 24h d'exposition aux huiles essentielles étudiées

Les résultats obtenus ont permis de déterminer à partir des tableaux d'analyses des probabilités, les valeurs de la DL₅₀ des différentes huiles essentielles étudiées. Les résultats montrent que les huiles essentielles testées sont toxiques sur les individus de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff au stade L₂ et L₃.

L'examen des valeurs des DL₅₀ après 24h d'exposition des chenilles au stade larvaire L₂ et L₃ aux différents traitements, nous permet de déduire que les huiles essentielles appliquées possèdent une toxicité variable vis-à-vis des chenilles de la processionnaire aux stades larvaires L₂ et L₃ et la mortalité dépend de la dose appliquée.

Les huiles essentielles de *Thymus pallescens* et de *Pinus halepensis* ont entraîné une mortalité larvaire de 90 % chez les larves L₂ à la dose la plus élevée (Tableau 3.17). Parmi les huiles essentielles appliquées sur les larves L₃ *Thymus pallescens* est plus efficace que les autres et a entraîné la mortalité à la dose la plus élevée (96,7%) et l'huile essentielle de *Pinus halepensis* était moins efficace sur ce stade larvaire de la chenille processionnaire et atteint 75% de mortalité. Parmi les autres huiles essentielles appliquées *A. herba alba* a été relativement efficace et a permis une mortalité de 83,3 % sur les larves L₃. Cependant, cette huile était moins efficace et n'atteignait que 36,7% à la dose la plus élevée sur les larves L₂.

L'huile essentielle la plus efficace est celle extraite de *Thymus pallescens* avec une DL₅₀ de 2683,79 ppm. Les HE extraites de *Pinus halepensis* Mill. et d'*Artemisia herba alba* sont moins toxiques, avec une DL₅₀ de 16979,83 ppm, 34095,70 ppm respectivement. La même chose pour les chenilles de stade L₃, l'huile essentielle la plus efficace est celle extraite de *Thymus pallescens*, avec une DL₅₀ de 10135,99 ppm, qui est un peu élevée que celle de chenilles du deuxième stade larvaire (Plus la DL₅₀ est plus faible, plus que l'HE est toxique). Les H.E. extraites de *Pinus halepensis* Mill et d'*Artemisia herba alba* sont moins toxiques, avec des DL₅₀ de 41039,30 ppm et 51670,60 ppm respectivement (Tableau 3.17).

Selon les résultats l'huile essentielle de *Thymus pallescens* a montré une activité larvicide élevée 2683,79 ppm, suivie de l'huile essentielle de *Pinus halepensis*. L'autre l'huile essentielle d'*Artemisia herba alba* était inactive. Sur la base des valeurs de la DL₅₀ l'ordre de toxicité est le suivant : *Thymus pallescens* > *Pinus halepensis* > *Artemisia herba alba*.

A partir des résultats, on peut déduire que deuxième stade larvaire (L₂) de *T. pityocampa* est le stade le plus sensible avec des DL₅₀ faibles des différentes H.E. étudiées.

Tableau 3.17. Activité larvicide des huiles essentielles de *Thymus pallescens*, *Pinus halepensis*, *Artemisia herba alba* et de l'insecticide chimique sur les larves L₂ et L₃ de *Thaumetopoea pityocampa* après 24h d'exposition (mortalité moyenne (%) ±SE).

Stade larvaire	Substance active	Doses testés			DL ₅₀ (ppm)
		D1	D2	D3	
L ₂	H.E. <i>T. pallescens</i>	40,0±5,8	53,3±3,3	90,0±5,7	2683,79
	H.E. <i>P. halepensis</i>	15,0±2,9	33,3±3,3	90,0±10,0	16979,83
	H.E. <i>A. herba alba</i>	20,0±2,9	30,0±5,8	36,7±6,7	34095,70
	Insecticide	80,0±5,8	80,0±5,8	80,0±5,8	4,1×10 ⁻⁶
L ₃	H.E. <i>T. pallescens</i>	30,0±2,9	85,0±5,0	96,7±3,3	10135,99
	H.E. <i>P. halepensis</i>	73,3±1,7	70,0±1,5	75,0±7,6	41039,30
	H.E. <i>A. herba alba</i>	71,7±1,6	80,0±5,0	83,3±7,3	51670,60
	Insecticide	60,0±5,8	60,0±5,8	60,0±5,8	4,1×10 ⁻⁶

(Thym : D1=2500 ppm, D2= 5000 ppm, D3= 10000 ppm; Pin : D1= 10000 ppm, D2= 15000 ppm, D3= 20000 ppm; Armoise : D1=5000 ppm, D2= 10000 ppm, D3=15000 ppm ; L'insecticide= Lambda-cyhalothrin 5%).

3.4. Effet des huiles essentielles appliquées sur la stratégie évolutive des larves de *Thaumetopoea pityocampa* traduite par la fluctuation de ses allocations énergétiques

3.4.1. Intersection en réserves énergétiques des larves de *T. pityocampa* sous l'effet des huiles essentielles étudiées

Le remaniement des réserves métaboliques des larves L₂ et L₃ de *T. pityocampa* ont été évaluées sous l'action des huiles essentielles de *Thymus pallescens*, *Artemisia herba alba* et *Pinus halepensis*. D'après les résultats de Ternaire la comparaison des quantités en métabolites énergétiques fait ressortir les potentialités intrinsèques des trois huiles essentielles étudiées. Car on a constaté que les huiles essentielles de *T. pallescens*, *A. herba alba* et *P. halepensis* influencent grandement le budget énergétique des larves L₂ et L₃ accumulant ainsi des teneurs très importante en réserves protéiques, glyco-géniques et lipidiques (Figure 3.13).

Ce dernier est nettement plus important suite à l'application de l'huile essentielle de *T. pallescens* par rapport aux deux autres huiles essentielles. En revanche, nous signalons que les teneurs des réserves glucidiques sont influencés par le témoin négatif (H₂O et Tween⁸⁰) chez les L₂, et par le traitement insecticide chez les larves L₃ (Figure 3.13).

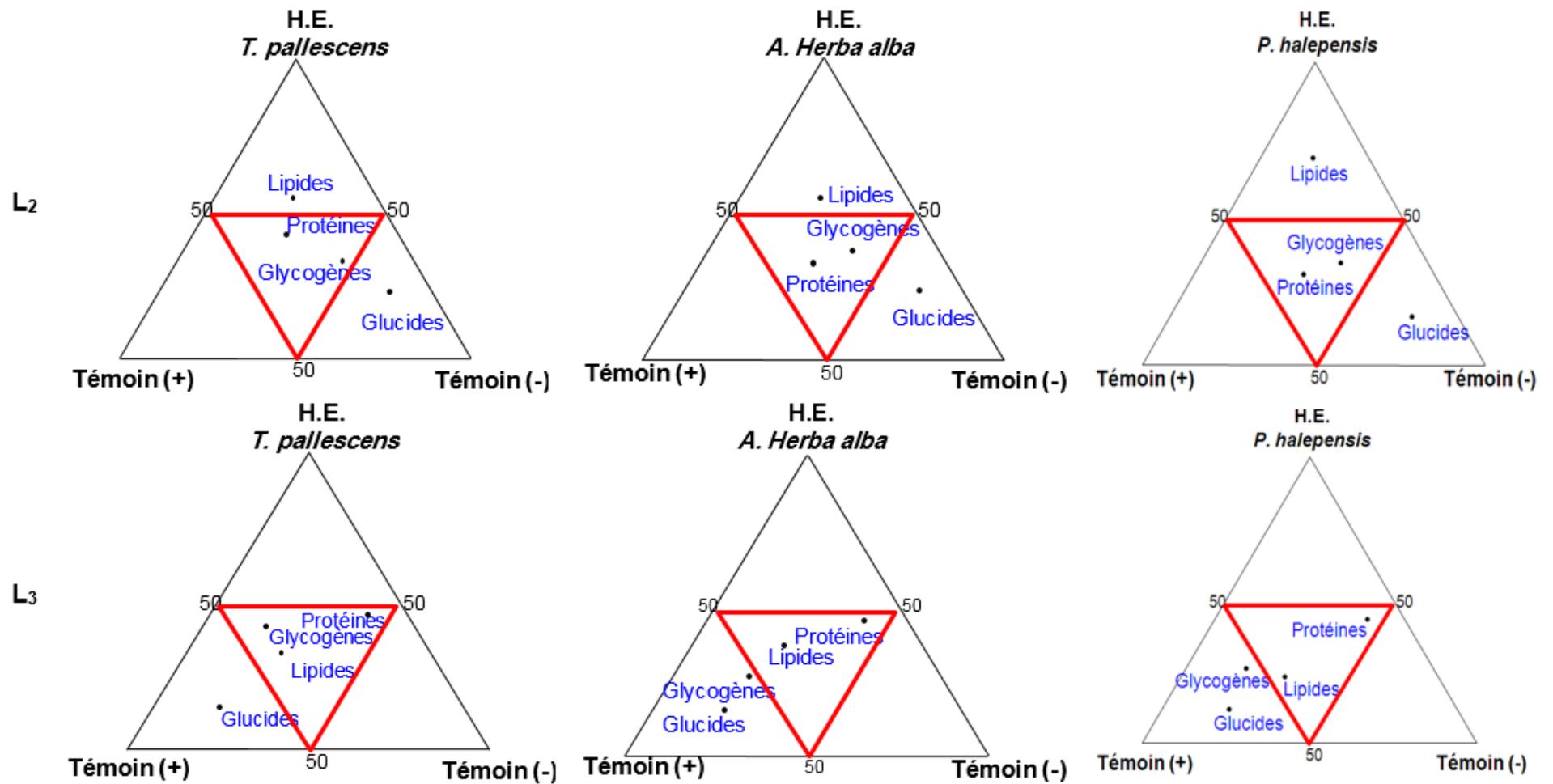


Figure 3.13 : Projection des réserves énergétiques des larves L₂ et L₃ de *Thaumetopoea pityocampa* sous l'effet des huiles essentielles étudiées

3.4.2. Fluctuation des réserves énergétiques des deux stades larvaires de *Thaumetopoea pityocampa* sous l'effet des huiles essentielles étudiées

Pour appréhender le degré d'affinité entre la toxicité des huiles essentielles de *T. pallescens*, *A. herba alba* et *P. halepensis* et l'allocation des réserves énergétiques des larves *T. pityocampa* (L₂, L₃), nous avons par la suite appliqué le modèle général linéaire (G.L.M.), aux différents traitements appliqués par stade larvaire, de manière à étudier la différence qualitative et quantitative entre les différents métabolites énergétiques (Figure 3.14).

Nous nous sommes intéressés d'entrevoir la fluctuation des réserves biochimiques énergétiques des larves *T. pityocampa* (L₂, L₃) sous l'effet des huiles essentielles et de l'insecticide appliquées à raison d'évaluer leur impact en terme de capitalisation du budget énergétique. La modulation des réserves énergétiques lipidiques a été soumise à une analyse de la variance type G.L.M. Les résultats expriment une variation quantitative hautement significative des réserves lipidiques pour les deux stades larvaires L₂ et L₃ avec les valeurs respectives (F-ratio =9,483 ; p=0,006 ; p< 0,1%), (F-ratio =7,444 ; p=0,001 ; p< 0,1%) sous l'influence des traitements appliqués. Les résultats montrent clairement que les lipides varient de manière très significative en fonction des traitements et des stades larvaires. De même, les taux des réserves lipidiques se distinguent significativement chez les larves L₂ de *T. pityocampa* par rapport aux larves du stade larvaire L₃. Il est intéressant de constater aussi que ces quantités en réserves lipidiques diffèrent très significativement entre type de traitement, avec des quantités plus importantes pour l'huile essentielle du pin d'Alep chez les larves L₂, or que les larves du stade L₃ manifeste des variations des teneurs lipidiques presque semblable suite à l'application des différents traitements (Figure 3.14 a).

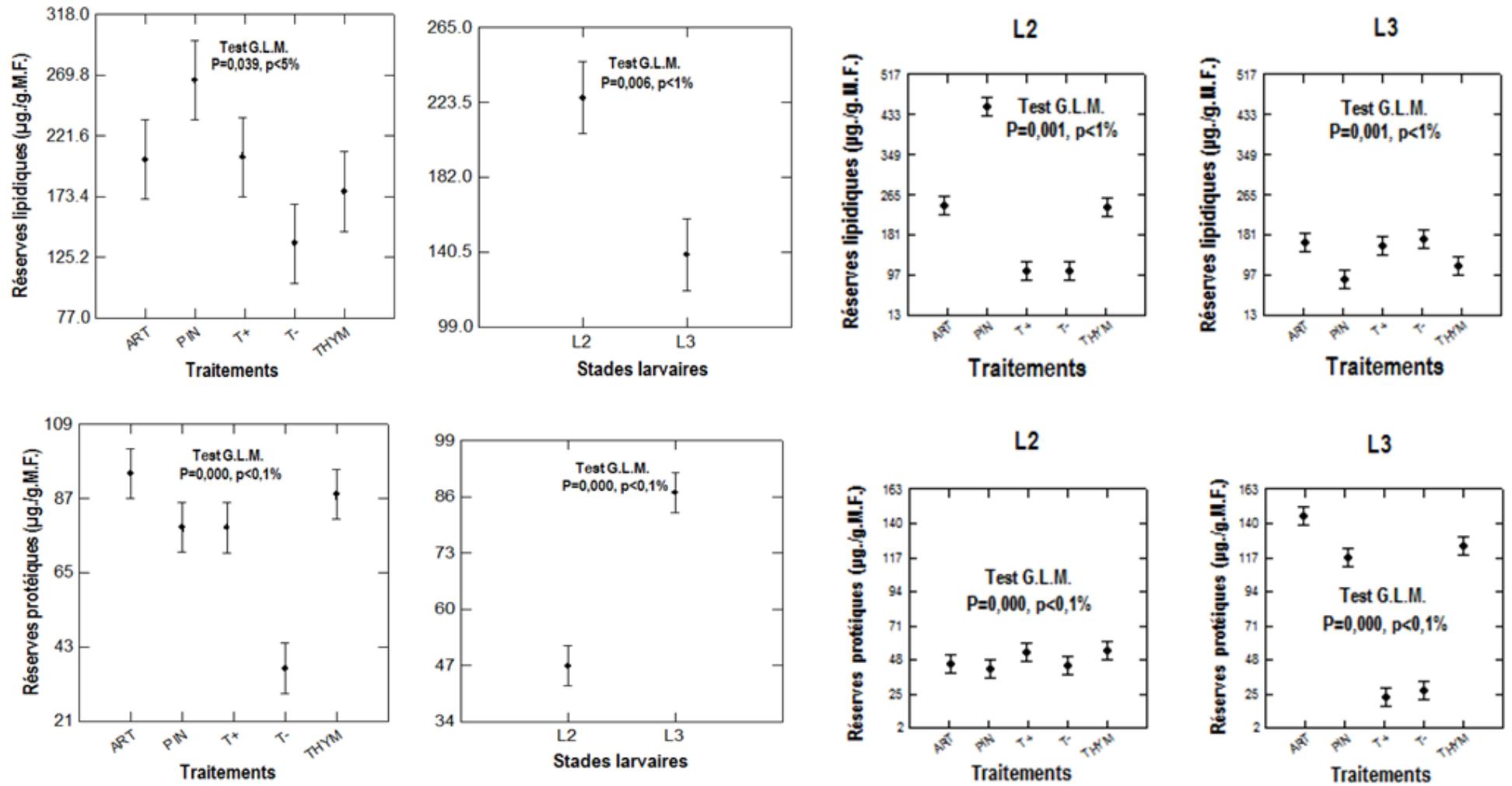


Figure 3.14 a : Variation des taux des réserves lipidiques et protéiques chez les larves L₂ et L₃ de *Thaumetopoea pityocampa*

Le même test a été adopté pour évaluer la fluctuation des réserves protéiques. Les résultats montrent nettement une différence quantitative très hautement significative des protéines par rapport aux types de traitements appliquées (F-ratio =14,387 ; p=0,000 ; p< 1%) et aux stades larvaires (F-ratio =36,607 ; p=0,000 ; p<1%). Les différents huiles essentielles appliquées exercent un effet différent sur teneurs des réserves énergétiques avec une forte accumulation protéiques très significative chez les larves L₃ par rapport aux larves L₂ traitées par les huiles essentielles de *T. palleescens*, *A. herba alba* et *P. halepensis* (Figure 3.14 a).

L'évaluation des teneurs des glucidiques et des glycogènes (Figure 3.10 b), des larves L₂ et L₃ de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff, exposées aux différentes huiles essentielles étudiées ne présentent aucune variation significative par rapport au facteur stade larvaire (F-ratio =0,063 ; p=0,805 ; p>5% ; F-ratio =0,040 ; p=0,844 ; p>5%). Au contraire, le facteur traitement signale une divergence très hautement significative par rapport aux teneurs des glucidiques et des glycogènes chez les deux stades larvaires étudiés (L₂ et L₃) (F-ratio =21,278 ; p=0,000 ; p<1% ; F-ratio =10,677 ; p=0,000 ; p<1%).

En ce qui concerne l'action du produit chimique (Lambda-cyhalothrin) sur les réserves énergétiques des larves de *T. pityocampa* le modèle G.L.M. montre nettement une différence très importante pour les accumulations des réserves lipidiques chez les deux stades larvaires comparés au témoin négatif et aux huiles essentielles appliquées. Son effet sur la teneur des réserves énergétiques s'avère faibles comparé aux huiles essentielles chez les L₂ et L₃.

L'effet comparé entre traitements à base d'huile essentielle et le produit chimique nous permis de dire que les huiles essentielles de *T. palleescens*, *A. herba alba* et *P. halepensis* ont une action perturbatrice très importante à l'égard du conditionnement des traits de vie biochimiques s'il est comparé aux perturbations engendrées par le produit chimique (Figure 3.14 a et b).

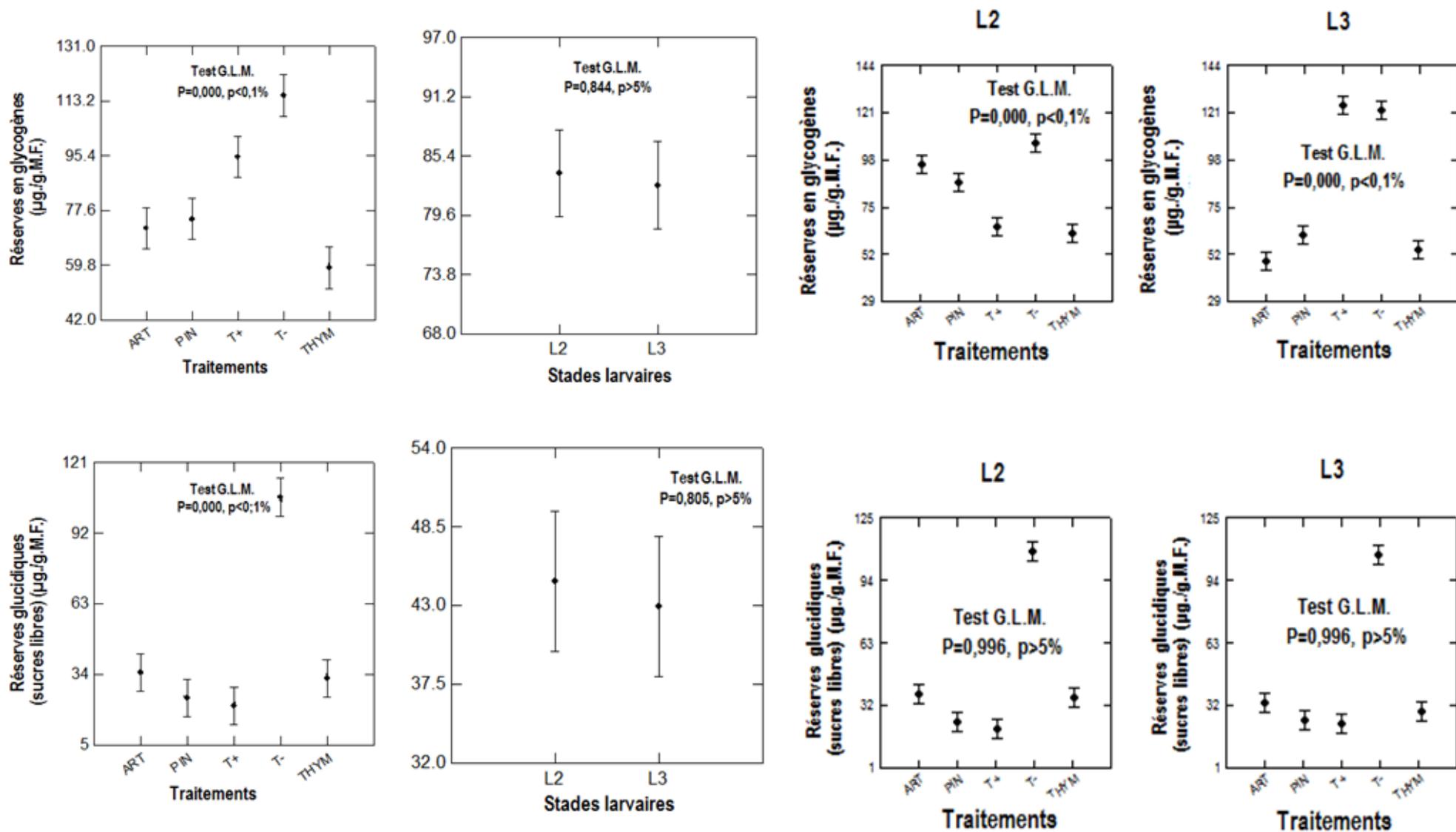


Figure 3.14 b : Variation des taux des réserves glucidiques et glycogéniques chez les larves L₂ et L₃ de *Thaumetopoea pityocampa*

CHAPITRE 4

DISCUSSION GÉNÉRALE

Le changement climatique est au cœur des préoccupations en écologie à l'heure actuelle, du fait des profondes modifications qu'il induit dans le fonctionnement des écosystèmes et des risques qui en découlent pour la conservation des espèces [333 ; 334]. En augmentation rapide depuis la fin du 19^{ème} siècle, le réchauffement climatique aura donc un impact profond sur les milieux et donc sur les espèces qui l'occupent, Il pourra non seulement favoriser l'installation d'espèces ayant des contraintes thermiques particulières et affectera le cycle biologique et la distribution géographique des espèces occupant ce [187]. L'un des impacts du réchauffement climatique sur les communautés qui a été bien étudié est la modification de la phénologie des espèces, principalement représentées par la précocité des événements printaniers. Ce facteur peut toucher aussi bien des espèces végétales qu'animales [335 ; 336 ; 337].

Le changement climatique affecte les insectes phytophages, comme le démontent plusieurs articles scientifiques sur les principaux ravageurs forestiers [338]. En effet, les températures hivernales élevées influencent non seulement la survie de ces insectes [17], mais leur fécondité [339]. Plusieurs études ont montré l'impact du réchauffement climatique sur le déplacement des limites d'aires de répartition des espèces [336 ; 340] et plus particulièrement des lépidoptères [341], comme c'est le cas de la chenille processionnaire de pin *Thaumetopoea pityocampa* (Denis et Schiff.) [17]. En effet, les températures hivernales élevées influencent non seulement la survie de ces insectes [17 ; 187], mais aussi leur fécondité [339 ; 187].

Les arbres étant des espèces longévives, rencontrent donc plus de changements environnementaux et notamment des événements climatiques extrêmes au cours de leur vie que des espèces possédant une plus courte durée de vie [342 ; 343]. De plus, la question quant à leur capacité d'adaptation face à des changements globaux rapides se pose pour ces espèces possédant des temps de générations longs [344 ; 345]. En effet, de nombreux événements de mortalité de populations d'arbres causés, entre autres, par une augmentation des températures et une diminution des précipitations ont, d'ores et déjà, été recensés à travers le monde [346]. Choat *et al.* [347] ont montré que 70% de 226 espèces d'arbres forestiers étudiés risquent une diminution de leur productivité et de leur survie face à des causes similaires.

Les entomologistes forestiers reconnaissent depuis longtemps que des conditions météorologiques atypiques, telles que la sécheresse, des précipitations excessives

ou des températures exceptionnellement chaudes ou froides, ont un impact majeur sur les insectes forestiers [348 ; 349]. Les mécanismes par lesquels le temps agit sur les populations d'insectes sont toutefois divers et rarement compris en détail [350 ; 333 ; 351]. La compréhension des effets du climat sur les processus écologiques est devenue de plus en plus importante dans les recherches entomologiques sur les forêts en raison du réchauffement planétaire, qui semble affecter les étendues géographiques [352 ; 17 ; 253] et la dynamique des populations d'espèces [355 ; 356].

La relation entre *T. pityocampa* et le climat fait l'objet d'une attention particulière à la suite des récentes expansions altitudinales et latitudinales [352 ; 17]. Il existe déjà une certaine compréhension des liens mécanistiques entre les variables climatiques et les processus physiologiques de *T. pityocampa* à la limite nord de son aire de répartition géographique, où l'espèce est confrontée à des conditions extrêmes. Les larves ne survivent que si la température moyenne minimale de l'air au cours de la période la plus froide de l'hiver (de décembre à février) est supérieure à -6°C et que le minimum absolu ne descend jamais en dessous de -16°C [16 ; 219 ; 19]. En outre, les larves se nourrissent et se développent uniquement si la température à l'intérieur du nid est supérieure à 9°C pendant la journée, suivie d'une température de l'air supérieure à 0°C pendant la nuit. Lorsque ces conditions ne sont pas remplies, il se produit un arrêt de développement pouvant durer plusieurs semaines, augmentant la mortalité larvaire et sa durée [17 ; 219 ; 19]. Ainsi, dans les limites altitudinales et septentrionales de sa distribution, les températures en hiver sont liées à la survie larvaire [219] et à la défoliation [352].

Dans ce sens, des études ont été portées sur les données climatologiques recouvrant deux périodes l'une de trentaine d'années (de 1987 à 2017) et l'autre pour deux campagnes (2015-2016 / 2016-2017). L'indice d'EMBERGER réalisé sur ces deux périodes a permis de classer la région d'étude à l'étage bioclimatique semi aride supérieur à hiver frais pour les trois décennies de 1987 à 2017 et à l'étage bioclimatique semi aride moyen pour les années 2015-2016 et 2016-2017. On assiste à un déclassement de la région d'étude de la l'étage bioclimatique aride supérieur durant les trois décennies de 1987 à 2017 à 'étage bioclimatique semi aride moyen pour les années 2015-2016 et 2016-2017 avec une tendance de rapprochement vers l'étage bioclimatique semi aride inférieur pour la campagne 2016-2017. En effet, nos résultats concordent avec l'étude menée par Zenzane [357] où il a montré que la région de Bordj Bou Arreridj est classée à l'étage bioclimatique semi aride inférieur. Selon Chourghal [288], le climat de la région de Bordj Bou Arreridj est projeté de devenir encore plus aride dans le contexte du changement climatique.

4.1. Variables climatiques, dynamique temporelle et ordre d'arrivée écologiques des formes biologiques de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff.

La dynamique des populations de la chenille processionnaire du pin apparait très différente durant ces deux années d'études, avec un nombre variable d'activité et de latence selon que le climat est plus ou moins favorable au ravageur, et des pics de gradation parfois fortement décalés d'une année à l'autre.

De 2016 à 2017, la dynamique d'activité de la chenille processionnaire du pin sur le Pin d'Alep au niveau de trois pineraies de la wilaya de Bordj Bou Arreridj se caractérise par une même tendance évolutive répartie sur deux périodes distinctes. En général, la première période (plus importante) s'étale entre mi-juillet et mi-novembre et coïncide avec saison automnal. Durant les deux années d'étude (2016 et 2017), au cours de la période automnale, les pics d'abondance des différentes formes biologiques de la chenille ont été enregistrés en octobre avec des valeurs minimales des températures de 13,4 et 10,2°C et des valeurs maximales de 26,2 et 23,1°C. La seconde période, englobe la période automno-hivernale, cette période est caractérisée par des populations moins denses avec un pic d'abondance observé entre janvier et mi-février les 2 années de suivi. Durant les deux années d'étude, le rayonnement solaire mensuel augmente de l'hiver à l'été, avec décembre le mois le moins ensoleillé (2016 : 7,9 MJm⁻²j⁻¹ ; 2017 : 6,9 MJm⁻²j⁻¹) et Juillet le mois le plus ensoleillé (26,4 MJm⁻²j⁻¹) pour les deux années. L'année 2016, quoique favorable à la processionnaire, ne présente pas un climat optimal pour ce défoliateur, du fait des très fortes chaleurs estivales. L'insecte s'est adapté par une sortie tardive des papillons et réalise ainsi la totalité de son développement larvaire sur la période la plus froide, ce qui est possible grâce aux températures hivernales douces (moyennes des températures minimales de janvier supérieures à 1°C) et au très bon ensoleillement (plus de 2300 heures par an, et plus de 7 kWh/m²/j d'irradiation solaire quotidienne en octobre). L'année 2017, apparait comme la plus favorable à la processionnaire car elle est suffisamment ensoleillée pour compenser les froids hivernaux (1900 à 2800 heures de soleil par an et plus de 8,6 kWh/m²/j d'irradiation solaire quotidienne en octobre) sans être aussi chaud en été que l'année 2016. Il semblerait que les températures minimales et maximales ont joué défavorablement sur les populations de la chenille. Nous avons en effet enregistré entre août et octobre de ces 2 années, des valeurs minimales moyennes de 3,8 et 1,1°C et des températures maximales moyennes très élevées de 36,5 et 36,9°C. L'enregistrement de températures hivernales plus douces a permis la survie et le développement des stades larvaires, ce qui explique le développement hivernal de *Thaumetopoea pityocampa*. Le déclin de l'activité des chenilles de mai à septembre serait dû à l'effet de la température moyenne mensuelle qui dépasse 25°C. Les températures létales minimales (-16°C) n'ont pas été observé durant ces deux années d'études et que les

pluies pourraient être à l'origine d'une diminution très sensible des populations de février jusqu'à début juillet.

La station de Bordj Bou Arreridj (Djehaifa) située dans la forêt de Boumergued, présentait les niveaux d'attaque les plus élevées au cours des trois dernières années, ce qui concorde avec la caractérisation des services forestiers de la wilaya de Bordj Bou Arreridj, selon laquelle, cette zone a été sujette aux épidémies de *T. pityocampa*. Cette station présentait également la période de développement la plus longue, avec l'apparition des larves en mois de septembre en même temps que la station de Mansoura et Ras El Oued et qui s'étale jusqu'à deux semaines plus tard que la station de Mansoura et Ras El Oued. Le deuxième et le troisième stade larvaire (L₂ et L₃), se montrent présents dans les trois stations étudiées le long de la période automno-hivernale. Le déclin progressif des stades L₂ et L₃ laisse place au quatrième stade (L₄) qui s'affiche discrètement dès le mois de décembre sur les deux stations Bordj Bou Arreridj et Ras El Oued avec une abondance au profit de la station de Bordj Bou Arreridj. Le même stade larvaire, se retraite sur la station de Mansoura jusqu'au mois Janvier. Le dernier stade larvaire L₅ se présente en mois de février dans les trois stations pendant la campagne 2016-2017. Durant la campagne 2015-2016, ce stade larvaire se présente tardivement (Mars) dans la station de Ras El Oued en comparaison avec les autres stations.

Nous avons également constaté une variation substantielle d'une année à l'autre sur le taux de croissance démographique de la chenille processionnaire du pin dans la station la plus infestée, où une augmentation des taux d'arbres atteints par *T. pityocampa* de 2015-2016 à 2016-2017 a coïncidé avec des précipitations faibles pendant plusieurs années consécutives et des températures estivales chaudes. Ce qui a conduit à un phénomène de sécheresse qui s'est déclaré dans la région, qui peut avoir des répercussions sur le développement du Pin d'Alep et sur activités biologiques des larves de la chenille processionnaire. Aussi, les moyennes des minimas du mois le plus froid sont enregistrées au mois de février avec une température de 3,8°C pour la période 2015-2016 alors que pendant la campagne 2016-2017 une température de 1,1°C a été enregistrée durant le mois de janvier.

Thaumetopoea pityocampa est une espèce strictement univoltine et ne semble pas être très limitée dans le temps en raison de contraintes saisonnières car les larves ont évolué pour se développer dans la partie la plus froide de l'année, étant adaptées pour survivre à de très basses températures [17]. Bien que des études antérieures aient clairement indiqué que les basses températures en hiver ont des effets négatifs sur la performance des insectes [228 ; 17 ; 219]. Nos analyses n'ont montré aucun effet évident des basses températures sur la dynamique de la population à l'échelle régional. Nous avons constaté que, même si les fortes précipitations automnales et

les hivers frais influent négativement sur le taux de croissance démographique, les étés chauds et les fortes précipitations printanières avaient généralement un effet positif sur la croissance démographique. Nos résultats corroborent avec ceux de Pimentel et *al.* [358] et Hódar et *al.* [359], qui confirment que la température minimale hivernale à l'effet positif de sur la croissance larvaire de *T. Pityocampa* au Portugal et il était associé à un rayonnement plus élevé. Ainsi, les larves de *T. pityocampa* peuvent s'adapter à une diminution des températures environnementales simplement en augmentant le temps de développement, en éclosant plus tôt et en se nymphosant plus tardivement [360]. Les effets directs de la hausse des températures sur les insectes herbivores devraient être généralement positifs du fait de la survie accrue en hiver, des taux de développement plus rapides et, parfois, du nombre accru de générations par an [213 ; 215]. Indirectement, le climat peut influencer sur la dynamique de la population des herbivores en modifiant la qualité de la plante hôte [220 ; 221] et les impacts de l'ennemi naturel [22 ; 358.]

La présente étude souligne toutefois l'importance potentielle des précipitations sur la dynamique de la population de *T. pityocampa*. Une pluviométrie abondante pendant les mois de février jusqu'au début juillet, semblaient avoir des effets positifs sur le taux de croissance de la population. Les précipitations printanières ont eu un effet positif sur la population de papillons nocturnes. Les précipitations pendant cette période d'alimentation intensive pourraient avoir des effets indirects en limitant l'activité des parasitoïdes larves-nymphes [361] sans affecter les chenilles plus vigoureuses des quatrième et cinquième stades. Inversement, les précipitations entravent physiquement les mouvements des larves, affectant ainsi le taux de croissance individuel [358 ; 359]. Une deuxième explication est qu'une humidité élevée, associée à une diminution de la résistance des infections aux larves due à une alimentation limitée, peut favoriser les infections par des agents pathogènes, tels que les champignons et les virus [362]. De plus, les précipitations automnales peuvent affecter négativement la survie des pupes, par augmentation de l'humidité du sol [201] et altérer l'apparition des papillons pendant l'été [363].

La combinaison de la température et du rayonnement solaire a souvent été invoquée pour expliquer la répartition et l'abondance des insectes à diverses échelles spatiales [364 ; 365]. Le rayonnement solaire peut affecter les performances des insectes herbivores en augmentant la température corporelle des larves d'insectes [205 ; 17 ; 206]. Le rayonnement hivernal influence les performances de croissance des larves par l'augmentation de leurs tolérance aux basses températures [325 ; 359] et génère une variation appréciable de la croissance larvaires et de la fécondité [358]. Egalement, ce facteur joue un rôle important pour la digestion des aliments pendant la journée [17 ; 212]. Malgré cela, le rayonnement solaire peut affecter négativement ces performances en altérant la qualité de la plante-hôte par la modification de son système de défense chimique [366 ; 367 ; 368 ; 369 ; 370]. Le rayonnement solaire

varie considérablement avec le microhabitat, en particulier dans les écosystèmes structurellement complexes tels que les forêts [207]. En effet, les insectes semblent ajuster leur comportement thermorégulateur en sélectionnant des microhabitats afin de maximiser leur croissance [208]. Battisti et *al.*, [212] révèlent à travers leurs résultats qu'une diminution du rayonnement solaire réduit davantage le taux de croissance ainsi que le taux de développement, et ils concluent que ce facteur joue un rôle important dans la détermination de la performance des larves d'insectes et une influence potentielle sur la préférence de l'habitat [271 ; 372 ; 206] et la dynamique des populations [367 ; 369].

L'appréciation de la tendance de l'ordre d'arrivée écologique des formes biologiques de *T. Pityocampa* est confirmée statistiquement par le Test cross-corrélation. Ce dernier démontre qu'il existe une perturbation dans la distribution temporelle des différents stades de développement, principalement pour la période de ponte et pour les trois premiers stades larvaires. D'après nos résultats, la période de ponte a eu lieu le mois de septembre dans la station de Bordj Bou Arreridj et le mois d'août dans les deux autres stations, donc on assiste à un décalage d'un mois. Le stade larvaire L₁ suit le stade œufs dans son ordre d'apparition, car il existe un décalage d'un mois entre la station Bordj Bou Arreridj et Mansoura et aucune différence temporelle pour l'apparition des L₁ dans les autres stations. Concernant le stade larvaire L₁ et L₂, le test affiche un décalage dans l'ordre d'arrivée écologique approximative d'un mois pour L₁ et les L₂ et un décalage de deux mois pour les individus du troisième stade larvaire (L₃). En fin, nous n'avons enregistré aucun décalage temporel pour les derniers stades (L₄ et L₅) de développement de cette chenille. Parmi les caractéristiques de la biologie de *T. pityocampa* qui ne sont pas bien cernées, figure la relation entre la température, le taux de croissance et la durée du développement larvaire. Ces traits sont généralement liés entre eux chez les lépidoptères [373 ; 374]. Les conditions environnementales rencontrées par les larves de *T. pityocampa* sont connues pour déterminer le temps passé à ce stade de la vie [375 ; 376 ; 360]. Des études antérieures ont toutefois portées sur la relation entre les retards de développement et la survie des larves avec les facteurs climatiques [198 ; 17; 219 ; 377 ; 359], ignorant les effets potentiels sur la croissance larvaire et la fécondité, qui peuvent également avoir une incidence sur la dynamique de la population [378 ; 374].

En conditions naturelles, les espèces exposées à divers facteurs abiotiques et biotiques dont les variations peuvent affecter leurs croissances. Ces changements "conditions de stress" chez les plantes peuvent moduler leurs interactions avec consommateurs primaire et par conséquent, elles peuvent montrer des effets bénéfiques ou néfastes sur les insectes phytophages. Des variations saisonnières ou interannuelles de l'appétence ou de la concentration en composés de défenses des tissus végétaux influent également sur la dynamique des populations d'insectes

herbivores [379 ; 380]. Ces variations sont susceptibles de se produire à plusieurs échelles, notamment sur un même individu pour les espèces arborées longévives à structure complexe [381 ; 382 ; 383 ; 384 ; 385, 386].

La tendance générale de l'abondance et l'ordre d'arrivée écologique des formes biologiques de *Thaumetopoea pityocampa* au cours de notre période d'étude ne peut toutefois pas être expliquée par les facteurs climatiques évalués, et il est évident que des facteurs au-delà de la portée de la présente étude contribuent aux profils spatio-temporels de *T. pityocampa*. Il reste à déterminer si les facteurs climatiques expliquent plus ou moins la dynamique de la population à travers l'incidence de certains facteurs sur la variation de la composition de la phytochimie de la plante hôte par rapport aux stratégies de choix du positionnement sur le nombre de nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin. Cangussu et Zucoloto [387] expliquent que la plante comme source d'énergie, influence directement le temps de développement, ainsi le pourcentage d'adultes émergents, la taille des individus à l'émergence, et la quantité d'énergie corporelle stockée se trouvent grandement affectés. Les mêmes auteurs, signalent aussi que les producteurs affectent différemment la partition énergétique des insectes holométaboles et hétérométaboles.

4.2. Stratégie de choix du positionnement des nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin

L'estimation de la taille d'une population de ravageurs est d'une grande importance, La croissance d'une population donnée peut être liée à une variété de problèmes biologiques tels que l'adaptation écologique, la constitution génétique, évolution de la sélection naturelle...etc. Les stades tels que les pupes, les œufs ou larves sont généralement utilisés pour surveiller les fluctuations de la densité des insectes à long terme [388]. Les mesures prises à partir des programmes de surveillance des forêts, dont l'objectif de l'échantillonnage des populations consiste uniquement à classer la population au-dessus ou au-dessous d'un seuil critique plutôt que d'estimer la densité de la population peuvent être utilisés comme substituts de la densité de la population à condition qu'une relation existe [388]. Différentes études ont démontré une forte corrélation entre la densité de population au début du cycle nuisible et la défoliation [389 ; 390 ; 391 ; 392 ; 393]. De telles relations permettent d'anticiper les dégâts causés aux arbres et sont donc cruciaux pour guider la gestion des ravageurs forestiers.

Le choix des sites d'oviposition pour la chenille processionnaire du pin n'est pas seulement dû à la «silhouette» de ces arbres [198, 394, 22, 395], mais aussi à la présence de métabolites secondaires volatils dans les arbres hôtes [396,397]. La biologie de l'insecte, le type de substrat consommé et l'intensité du stress hydrique

sont des facteurs clés qui expliquent la réponse différentielle des insectes phytophages forestiers à la fois à la modification d'état de leur hôte et au climat [398, 399], et de ce fait, les conséquences démographiques et évolutives de l'herbivorie pour la plante diffèrent selon que l'insecte affecte la survie ou la reproduction ou qu'il ne prélève de la plante qu'une partie de ses tissus [400].

Des études menées par Demolin [198] ont montré qu'au niveau du même peuplement de pin, la taille des arbres joue un rôle prépondérant dans l'attraction de l'insecte lors de la ponte. Khoudja [401] a signalé que la fréquence et l'intensité des attaques sont étroitement liées à la hauteur des arbres de pin d'Alep. Le choix d'un profil d'arbres bien particulier par les femelles pondeuses se dirigent en vol vers les arbres se découpant en silhouette sur fond clair [394 ; 395], et montrent ainsi une attraction très nette vers les arbres isolés ou de crêtes. L'arrêt de la femelle gravide et féconde effectue un choix sélectif à l'intérieur du peuplement et ce choix ne pourra avoir lieu que si elle rencontre un pin, seul végétal offrant le support recherché: diamètre des aiguilles, une structure rugueuse permettant l'insertion optimale des griffes de l'insecte [198].

Le choix du positionnement des nids d'hiver par femelles de la chenille processionnaire du pin, ne semble pas être affecté par la taille (la hauteur) des arbres infestés du pin d'Alep, car selon nos résultats, les arbres se trouvant dans les sites étudiés et qui présentent une hauteur moyenne de 2 à 2,54 m ont enregistré un nombre de nids presque similaires avec respectivement une moyenne de $1,7 \pm 0,59$; $1,6 \pm 0,27$ et $1,5 \pm 0,23$ nids/arbre. Contrairement à ce qu'il a été avancé par Sghaier et al., [402] qui ont montré qu'en tenant compte de la hauteur des arbres et la variabilité de la provenance (origine) du point de vue intensité d'infestation (nombre de nids) permet de constater que la taille des arbres joue un rôle prépondérant dans l'attaque par la chenille processionnaire du pin. Egalement, nos résultats ont révélés une ressemblance dans la disponibilité des nids d'hiver par rapport à l'altitude des trois sites considérés. Cette similitude paraît ne pas être conditionnée par l'effet site et altitude (Ras El Oued 84,44% et de Djehaifa 84,18 % et Mansoura 75,32%). Nos résultats sont analogues à ceux de Battisti et al [375], qui ont montré que la distribution de *T. pityocampa* dans les Alpes italiennes a avancé qu'une altitude de 1150 m en 1975 à 1380 m en 2004, soit l'équivalent de 70,1 m par décennie. Ainsi, *T. pityocampa* entre dans de nouvelles zones bioclimatiques et bioécologiques où il pourrait affecter la faune résidente par le biais. Par exemple, de nouvelles interactions compétitives pour le pin ressources, effets indirects sur la qualité de l'hôte, effets indirects en cascade parasitoïdes et transmission de virus/maladies. De tels effets sont peu connus chez les insectes en expansion et sont peu documentés en tant qu'espèces envahissantes [223].

Du fait que les pineraies étudiées attireraient de la même manière les chenilles de l'espèce *Thaumetopoea*, cela pourrait être probablement expliqué par le fait que les trois sites présentent les mêmes conditions environnementales car les trois sites sont classés dans le même étage bioclimatique qui est semi-aride. Actuellement, la chenille processionnaire du pin, se rencontre dans tous les pays de la méditerranée occidentale et se répand actuellement dans les latitudes supérieures probablement en réponse au changement climatique avec des températures hivernales croissantes [16 ; 375 ; 218].

Les données de l'abondance et le positionnement selon les directions cardinales des nids d'hiver de *T. pityocampa*, montrent que les arbres du pin d'Alep présentent le même niveau d'infestation dans les différentes régions étudiées. La projection des variables relatives à l'abondance des nids d'hiver estime que les chenilles de *T. pityocampa* installent ses nids d'hiver dans la direction cardinal Sud et Ouest à une altitude de 698 à 928 m et au delà de cette altitude le positionnement des nids change vers le côté Est et Nord comme c'est le cas du site de Ras El Oued (1077m). Nos résultats, cependant, ont révélé une relation entre la densité de la population et le choix de l'orientation cardinale et que les orientations Sud et Ouest sont les plus attaquées par la chenille processionnaire du pin. Les stratégies adoptées par les chenilles de *T. pityocampa* pour le choix du positionnement des nids d'hiver sur la plante sont insuffisamment étudiés. Néanmoins, il est généralement établi que le comportement de ponte et du choix de l'hôte peut permettre d'identifier le type de dynamique des populations des insectes herbivores. Un comportement sélectif permet aux femelles de contrôler le nombre d'œufs pondus en fonction de l'état de la plante hôte et de la présence d'autres individus afin que les ressources ne soient pas surexploitées. D'un autre côté, une absence de sélectivité ne permet pas une connaissance rapide de l'interaction entre une ressource alimentaire détériorée et la natalité et peut traduire une dynamique active des populations [403]. Les chenilles processionnaires du pin sont capables de s'adapter afin de compenser d'éventuelles variations climatiques, comme l'illustre la construction et l'orientation du nid d'hiver, permettant d'allier effet de masse (atténuation de fortes variations de température par regroupement de nombreux individus) et insolation maximale [225], La zone de distribution potentielle de *T. pityocampa* est délimitée par plusieurs seuils de températures hivernales [16 ; 375, 219]. Dans l'ensemble, les faibles corrélations peuvent être attribuées principalement à des facteurs climatiques déterminant la survie des larves après l'échantillonnage pendant l'hiver [198 ; 375, 219 ; 358 ; 359]. Battisti et al. [17] et Robinet et al. [218] qui ont trouvés que les populations de cet insecte d'hiver d'origine méditerranéenne se développent vers des latitudes et des altitudes plus Europe du Sud et de l'Ouest.

4.3. Evaluation de l'effet toxique des huiles essentielles et de l'insecticide chimique appliqué sur les traits de vie biochimiques des larves de *Thaumetopoea pityocampa*

Lorsqu'un organisme est soumis à un stress et qu'il ne peut pas l'éviter, il peut mettre en place des mécanismes pour ne pas rester en contact avec l'origine du stress, et réduire les dommages causés par ce stress [564 ; 565].

Le biomarqueur toxicologique serait la réponse biologique (biochimique, cellulaire, physiologique ou comportementale) qui, dans un tissu, dans les liquides corporels ou au niveau d'un organisme dans son ensemble, donne une mesure d'exposition à un toxique et/ou d'effets produits par un ou plusieurs molécules. Les biomarqueurs sont des outils importants en toxicologie. Ils permettent d'améliorer l'évaluation du risque d'altérations cellulaires résultant d'une exposition à des xénobiotiques. Beaucoup de molécules intracellulaires ont été proposées ou utilisées comme biomarqueurs. Par exemple, les enzymes cytochrome P450, les métallothionéines et les enzymes antioxydants, qui ont pour fonction de complexer ou de métaboliser des composés nocifs, appartiennent à la catégorie des biomarqueurs d'exposition. Ils indiquent la présence de xénobiotiques plutôt que leur toxicité [566].

De nombreux travaux suggèrent qu'un stress toxique, en favorisant l'activation de certaines voies métaboliques, se traduit par une réduction des réserves énergétiques d'un organisme [567 ; 568]. Ces réserves énergétiques fournissent des explications évolutives sur les traits d'histoire de vie, interprètent la diversité et la complexité du cycle de vie d'une espèce, et élucident le mécanisme d'allocation des ressources destinées à la croissance au maintien des fonctions somatiques et aux performances reproductrices "effort de reproduction" [569 ; 570 ; 571].

Les protéines, les lipides (triglycérides) et les glucides (glycogène) constituent les ressources énergétiques des insectes [572 ; 573]. La majeure partie de ces réserves énergétiques se trouve sous forme de lipides [574] 90 % de ces lipides consistent en des triglycérides qui possèdent un pouvoir calorique par unité de poids supérieur à celui du glycogène [575]. En revanche, les réserves en glycogènes sont mobilisées au cours des cycles de mues et de la métamorphose [576].

Chez les insectes, chaque stade biologique présente une allocation énergétique spécifique selon ses besoins et selon que l'insecte est holométabole ou hétérométabole. Chez les lépidoptères, les réserves à l'éclosion sont suffisantes pour permettre le développement des larves. Au moment de la nymphose, les réserves de la larve suffisent à assurer la métamorphose. La biomasse structurelle de la larve est ainsi convertie en réserves d'énergie pour la nymphe [85].

Les réserves énergétiques fournissent des explications évolutives sur les traits d'histoire de vie et élucident le mécanisme d'allocation des ressources destinées à la croissance, au maintien des fonctions somatiques et à l'effort de reproduction [571].

Nous nous sommes intéressé à entrevoir la fluctuation des réserves biochimiques énergétiques des larves *T. pityocampa* (L₂, L₃) sous l'effet des huiles essentielles et de l'insecticide appliquées à raison d'évaluer leur impact en terme de capitalisation du budget énergétique. Ainsi, nous voulons montrer le rôle des biomarqueurs énergétiques dans la compréhension des stratégies comportementales ou physiologiques qui permettent à *T. pityocampa* de contourner partiellement ou totalement les matières actives biologique ou de synthèse. Les résultats que nous avons obtenus sont discutés par rapport à la littérature de façon à proposer des perspectives de lutte.

La présente étude expose la réaction métabolique et le remaniement des réserves énergétiques (les lipides, les protéines, les glycogènes et les glucides) des larves L₂ et L₃ de *T. pityocampa* qui a été évaluées sous l'action des huiles essentielles de *Thymus pallescens*, *Artemisia herba alba* et *Pinus halepensis* ainsi qu'un insecticide chimique. Cette variabilité se manifeste par une différence quantitative important entre les différents biomarqueurs énergétiques étudiés où les réserves lipidiques sont très distinguées par rapport aux autres réserves énergétiques. De plus, il est très important de mettre en diapason les fortes corrélations positives existant entre le remaniement des réserves lipidiques et le traitement chimiques (dose homologuée).

Les résultats de la comparaison des quantités en métabolites énergétiques fait ressortir les potentialités intrinsèques des trois huiles essentielles étudiées. Car on a constaté que les huiles essentielles de *T. pallescens*, *A. herba alba* et *P. halepensis* influencent grandement le budget énergétique des larves L₂ et L₃ accumulant ainsi des teneurs très importante en réserves protéiques, glycogéniques et lipidiques. Ce dernier est nettement plus important suite à l'application de l'huile essentielle de *T. pallescens* par rapport aux deux autres huiles essentielles. Cependant, les réserves glucidiques expriment une affinité très marquée aux traitements témoins. Les résultats montrent clairement que les lipides varient de manière très significative en fonction des traitements et des stades larvaires. Car les taux des réserves lipidiques se distinguent significativement chez les larves L₂ de *T. pityocampa* par rapport aux larves du stade larvaire L₃. Aussi, les différentes huiles essentielles appliquées provoquent une forte accumulation protéique chez les larves L₃ par rapport aux larves L₂. L'évaluation des teneurs des glucidiques et des glycogènes ne présentent aucune variation significative par rapport au facteur stade larvaire.

Les lipides jouent un rôle important comme réserves énergétiques chez de nombreux groupes d'animaux, incluant les arthropodes en général [577] et spécialement les insectes [578], pour lesquels ils sont d'une importance vitale [579]. Les réponses les plus souvent décrites dans la littérature veulent que les lipides s'accumulent généralement chez les organismes exposés à des contaminants organiques [580] ou à des situations de contamination multiples [581, 381]. Dont une augmentation des métabolites lipidiques, favorisant ainsi le stockage du toxique [582 ; 583]. L'importance des teneurs en lipides par rapport à celles des glucides aussi bien chez la processionnaire du pin. Il semblerait que les chenilles investissent cette accumulation des lipides au profit du rétablissement de l'homéostasie ainsi que leur rôle dans la formation des ovocytes [584]. L'utilisation des lipides comme source d'énergie induit un phénomène de lipolyse permettant aux organismes de les dégrader afin de produire l'énergie nécessaire à leur métabolisme de base (réaction enzymatique, synthèse moléculaire,...) [585].

Les réserves glucidiques étant des fonds d'énergies facilement métabolisés pour les tâches de mobilité, de vol, les fonctions somatiques et autres, vont être sollicités alors que, la disponibilité des lipides et du glycogène semble être le résultat d'une balance entre la prise de nourriture et les demandes de réserves pour la croissance et la reproduction [586]. En revanche, les lipides présentent une importance vitale pour la survie de l'espèce, et pour cause, étant la source d'énergie prédominante pendant le développement embryonnaire des insectes, une quantité suffisante de lipides doit être mise en réserve dans les ovocytes en développement pendant l'ovogenèse. C'est pour cette raison que le ratio glucides/Lipides est toujours en faveur des réserves lipidiques [577, 587]. Les biomarqueurs glucidiques sont très faibles mais stables ce qui laisse supposer que la faible quantité du taux des sucres est relative à l'action de détoxification. Les glucides étant la principale source d'énergie pour les insectes [588], ces derniers doivent synchroniser leurs activités avec la période où la plante se trouve dans l'optimum de ses constituants phytochimiques en termes de quantité et de qualité. Ils ne disposent pas en conséquence de beaucoup de temps pour stocker les glucides qui vont être rapidement oxydés. La transition du repos au travail chez de nombreux insectes implique souvent une très grande augmentation dans la vitesse d'utilisation de l'énergie [74].

La diminution statistiquement significative des réserves en glucides pourrait être expliquée par une augmentation de l'activité larvaire, Par ailleurs, les taux infimes en teneurs glucidiques observés peuvent être expliqués par le fait que, la présence de telles molécules entraîne rapidement la mise en route des systèmes biochimiques de détoxification ; dont le rôle est de rendre hydrosolubles ces composés dangereux, afin de faciliter leur excrétion [589]. Gluth et Hanke (1985) [590] ont aussi observé une réponse de la concentration en glucides en deux phases dans le muscle de carpes

(*Cyprinus carpio*) exposées à différents contaminants chimiques, avec tout d'abord une augmentation de la concentration en glycogène observée après 24 heures d'exposition, suivi d'une diminution de cette concentration après 72 heures d'exposition ce qui n'est pas en accord avec nos résultats.

Toutefois, les résultats de la littérature mettent en évidence une diminution du glycogène en présence d'un stress toxique chez *Chironomus riparius* [591], chez *Lymnea acuminata* [592] ou bien chez *Gammarus roeseli* [593] ce qui corroborent résultats avec nos résultats. Chez les animaux, les principales formes de stockage de l'énergie sont représentées par le glycogène (et autres polysaccharides de structure voisine) et les lipides. Lorsque les besoins en énergie sont importants, par exemple en période de reproduction ou à la suite d'un stress, ces réserves énergétiques sont mobilisées [105].

Le glycogène constitue, en effet, une réserve importante d'énergie pour les phases de mue et de métamorphose ainsi que pour le stade adulte, au cours duquel le chironome ne s'alimente pas [261]. Afin que l'espèce puisse assurer sa reproduction, il est par conséquent indispensable que la larve présente, au 4^{ème} et dernier stade, un niveau suffisant de glycogène.

Les protéines ont également été quantifiées dans cette étude, les résultats montrent que leurs teneurs sont moyennement faibles pour les deux stades larvaires de *Thaumatococcus panyocampa*, ce qui prouve que ces réserves sont généralement les dernières utilisées en cas de stress. En effet, le catabolisme des protéines peut fournir de l'énergie lors d'une forte demande énergétique [123]. Plusieurs études ont montré qu'une diminution de la concentration en protéines pouvait être considérée comme une adaptation physiologique pour venir compenser le stress induit par les pesticides [125 : 594].

Selon De Coen et Janssen [84]. les réserves sous forme de protéines et de glycogène ne seraient affectées que pour des concentrations d'exposition élevées. Rathore et al., [595] notent chez *Chironomus tentans* une diminution du contenu protéique en présence de cadmium et [595] en présence de metolachlore, un herbicide qui agirait en bloquant la synthèse protéique. De même, Ortel [597] observent cet effet chez un hyménoptère alimenté avec une nourriture dopée à 50 mg/kg de plomb. De plus, Graney et Giesy [598] montrent, chez *Gammarus pseudolimnaeus*, qu'une exposition à long terme au pentachlorophénol (insecticide) entraîne la mobilisation des réserves protéiques. En revanche, les observations de Choi et al. [591] et Ha et Choi [599] chez *Chironomus riparius* exposé pendant quatre jours à un insecticide, le fenitrothion, ne relèvent aucune variation du contenu protéique.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les écosystèmes évoluent tout en subissant des impacts environnementaux suite à des activités anthropiques. Les plantes et les insectes réagissent et s'adaptent à ces différentes perturbations qui les affectent. La plante, source de nutrition, fournit à un organisme (ravageurs et auxiliaires) les composés chimiques nécessaires qui sont convertis en réserves énergétiques d'une importance capitale dans la survie, le maintien et la reproduction des insectes. Les insectes nuisibles constituent une menace majeure pour de nombreuses forêts dans le monde. La qualité nutritionnelle et/ou défensive de la plante hôte (Pin d'Alep) est à l'origine de changements de comportement, des traits d'histoire de vie (démographie) et des particularités physiologiques (biomarqueur énergétiques) des ravageurs.

En se plaçant dans le contexte général des interactions plantes-insectes, ce travail de thèse s'est focalisé sur les interactions pin d'Alep-chenille processionnaire qui ont une importance écologique, économique, sociétale et scientifique qui nécessitent d'étudier à la fois les caractéristiques du pin d'Alep couplés à la biologie et à la dynamique des populations de son défoliateur afin de comprendre les facteurs qui prédisposent cette essence aux attaques, la réponse des arbres face à ces attaques soit par une résistance ou un dépérissement et les stratégies développées par l'insecte pour exploiter au mieux les arbres et se maintenir dans l'environnement.

La première partie de ce travail a été de chercher à comprendre d'une part, l'incidence de certains paramètres abiotiques des forêts sur la dynamique des populations, l'ordre d'arrivée écologique des formes biologiques et la stratégie de choix de l'emplacement des nids d'hiver sur la fréquence et l'intensité des attaques de la chenille processionnaire *Thaumetopoea pityocampa* Schiff et d'autres part, l'incidence des attaques de la chenille à travers l'analyse des constituants phytochimiques des aiguilles du Pin d'Alep *Pins halepensis* entre autres la qualité des composés phénoliques et terpéniques.

La dynamique des populations de la chenille processionnaire du pin apparaît très différente durant ces deux années d'études, avec un nombre variable d'activité et de latence selon que le climat est plus ou moins favorable au ravageur, et des pics de gradation parfois fortement décalés d'une année à l'autre. De 2015 à 2017, la dynamique d'activité de la chenille processionnaire du pin sur le Pin d'Alep au niveau de trois pineraies de la wilaya de Bordj Bou Arreridj se caractérise par une même tendance évolutive répartie sur deux périodes distinctes. En général, la première période (plus importante) s'étale entre mi-juillet et mi-novembre et coïncide avec

saison automnal. La seconde période, englobe la période automno-hivernale, cette période est caractérisée par des populations moins denses avec un pic d'abondance observé entre janvier et mi-février les 2 années de suivi.

L'année 2016, quoique favorable à la processionnaire, ne présente pas un climat optimal pour ce défoliateur, du fait des très fortes chaleurs estivales. L'insecte s'est adapté par une sortie tardive des papillons et réalise ainsi la totalité de son développement larvaire sur la période la plus froide, ce qui est possible grâce aux températures hivernales douces (moyennes des températures minimales de janvier supérieurs à 1°C) et au très bon ensoleillement (plus de 2300 heures par an, et plus de 7 kWh/m²/j d'irradiation solaire quotidienne en octobre). L'année 2017, apparaît comme la plus favorable à la processionnaire car elle est suffisamment ensoleillée pour compenser les froids hivernaux (1900 à 2800 heures de soleil par an et plus de 8,6 kWh/m²/j d'irradiation solaire quotidienne en octobre) sans être aussi chaud en été que l'année 2016. L'enregistrement de températures hivernales plus douces a permis la survie et le développement des stades larvaires, ce qui explique le développement hivernal de *Thaumetopoea pityocampa*. Le déclin de l'activité des chenilles de mai à septembre serait dû à l'effet de la température moyenne mensuelle qui dépasse 25°C. Les températures létales minimales (-16°C) n'ont pas été observé durant ces deux années d'études et que les pluies pourraient être à l'origine d'une diminution très sensible des populations de février jusqu'à début juillet.

L'appréciation de la tendance de l'ordre d'arrivée écologique des formes biologiques de *T. Pityocampa* est démontre qu'il existe une perturbation dans la distribution temporelle des différents stades de développement, principalement pour la période de ponte et pour les trois premiers stades larvaires. La tendance générale de l'abondance et l'ordre d'arrivée écologique des formes biologiques de *Thaumetopoea pityocampa* au cours de notre période d'étude ne peut toutefois pas être expliquée par les facteurs climatiques évalués, et il est évident que des facteurs au-delà de la portée de la présente étude contribuent aux profils spatio-temporels de *T. pityocampa*. Il reste à déterminer si les facteurs climatiques expliquent plus ou moins la dynamique de la population à travers l'incidence de certains facteurs sur la variation de la composition de la phytochimie de la plante hôte par rapport aux stratégies de choix du positionnement sur le nombre de nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin.

Le choix du positionnement des nids d'hiver par la chenille processionnaire du pin, paraît ne pas être conditionné par l'effet site, altitude et par la taille (la hauteur) des arbres infestés du pin d'Alep. Cela pourrait être probablement expliqué par le fait que les trois stations d'études présentent les mêmes conditions environnementales car les trois sites sont classées dans le même étage le bioclimatique qui est semi-

aride. Cependant, les stratégies adoptées par les chenilles de *T. pityocampa* pour le choix du positionnement des nids hiver sur la plante par rapport aux orientations cardinales ont révélés qu'il existe une relation entre la densité de la population et les orientations Sud et Ouest qui sont les plus attaquées par la chenille processionnaire du pin.

En ce qui concerne l'incidence des attaques de la chenille à travers l'analyse des constituants phytochimiques des aiguilles du Pin d'Alep *Pins halepensis* entre autres la qualité des composés phénoliques et terpéniques. Les résultats de notre étude ont montrés que les modifications de la qualité des aiguilles après la défoliation étaient en général très maigres en termes d'accumulation composés phénoliques. Outre l'augmentation de la teneur en Polyphénols des sucres totaux et des tanins après la défoliation, les Flavonoïdes ont présentés des variations nulles, ce qui suggère que l'augmentation des phénols et des tanins ressemble à une véritable défense induite contre la défoliation. L'un des résultats les plus nets de notre expérience est la présence de réponse des composés terpéniques chez *P. halepensis*. Cependant, les concentrations de monoterpènes enregistrent une augmentation significative entre les aiguilles issues d'arbres attaqués contrairement aux teneurs en sesquiterpènes qui étaient nettement plus élevées chez les aiguilles issues d'arbres sains par rapport aux aiguilles des arbres attaqués.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Nichane M., Bouchikhi Z.T. et Mohamed Anouar Khelil M.A., 2012.** Contribution à l'étude de l'entomofaune de quelques espèces résineuses de la région des traras occidentaux (Tlemcen .Algérie). *Lebanese Science Journal*, Vol. 14, No. 2, 2012.
2. **Mezali, M., 2003.** Rapport sur le secteur forestier en Algérie. 3ème session du forum des Nations Unis sur les forêts, 9 p.
3. **Nahal. I., 1986.** Taxonomie et aire géographique des pins du groupe halepensis. CIHEAM.options Méditerranéennes. 1 .1.9.
4. **Quezel P., 1986.** Les pins de groupes halepensis ; Ecologie, Végétation. Ecophysiologie. Ed. Gauthier villars. Paris. 822p.
5. **Boutte B. DSF., Durand.Gillmann M., 2012.** INRA Avignon pour la partie *T. destruens* ; Pin d'Alep, les principaux problèmes sanitaires, Département de la santé des forêts, France.
6. **Halperin, J., 1990.** Life history of *Thaumetopoea* spp. (Lep. Thaumetopoeidae) in Israel. *Journal of Applied Entomology* 110, 1–6.
7. **Petrakis, P.V., Roussis, V., Ortiz, A.H., 2001.** Host selection by *Thaumetopoea pityocampa* (Den. et Schif.). the relative importance of needle terpenoid and morpho.anatomical profiles. In. Radoglu, K. (Ed.), *Forest Research. a Challenge for an Integrated European Approach. I. NAGREF. Forest Research Institute, Thessaloniki*, pp. 343–348.
8. **Mendel, Z., 2000.** The phytophagous insect fauna of *Pinus halepensis* and *P. brutia* in the Mediterannean. In. Ne'eman, G., Trabaud, L. (Eds.), *Ecology Biogeography and Management of Pinus halepensis and P. brutia Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. Backhuys Publishers, Leiden, pp. 217–236.
9. **Hódar JA, Castro J, Zamora R., 2003.** Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warming. *Biological Conservation* 110, 123–9.
10. **Battisti A, Holm G, Fagrell B, Larsson S., 2011.** Urticating hairs in arthropods their nature and medical significance. *Annu Rev Entomol* 56(1).203–220
11. **Linares, J.C., Senhadji, K., Herrero, A., Hódar, J.A., 2014.** Growth patterns at the southern range edge of Scots pine. Disentangling the effects of drought and defoliation by the pine processionary caterpillar. *For. Ecol. Manage.* 315, 129.137.
12. **Huchon H. et Demolin G. 1971 .** La bioécologie de la processionnaire du pin dispersion potentielledispersion actuelle. F ; F ; XXII. Spécial la lutte biologique en forêt . 220.234 p
13. **Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., et Larsson, S. 2005.** Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15, 2084.2096.

- 14. Robinet C., Rousselet J., Goussard F et Roques A., 2010.** Modelling the range expansion of an urticating moth with global warming. a case study from France. In. Settele J, ed. Atlas of Biodiversity Risks. From Europe to the Globe, From Stories to Maps. Pensoft, Sofia, 82.83.
- 15. Hoch, G., Toffolo, E.P., Netherer, S., Battisti, A., et Schopf, A. 2009.** Survival at low temperature of larvae of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* from an area of range expansion. *Agricultural and Forest Entomology*, 11, 313.320.
- 16. Jactel H, Menassieu P, Vetillard F, Barthelemy B, Piou D, Ferot B, Rousselet J, Goussard F, Branco M, Battisti A. 2006.** Population monitoring of the pine processionary moth (Lepidoptera. Thaumetopoeidae) with pheromone-baited traps. *Forest Ecology and Management* 235, 96.106
- 17. Kadik B. 1987.** Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) en Algérie. Ecologie, dendrométrie, Morphologie. O.P.U. Alger. 50.145 p.
- 18. Zamoum M. 1998.** Données sur la bio écologie, 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 Doctorat, Univ des sciences de Rennes I, France, 247 p.
- 19. Zamoum M. 2004.** Stratégie de lute contre la chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiff.) en Algérie. Comm. 5^{ème} JTSP, INPV Alger de 5 au 6 mai 2004, 12p.
- 20. Bahakemi S et Saadi M., 1985.** Essai de *Bacillus thuringiensis* contre la processionnaire du pin (Chréa). Rapport Interne, INRF. Algérie, 6 p.
- 21. Fekroun Z C et Chabira N., 2003.** Contribution à l'étude écobioologique des principaux parasitoïdes des oeufs et des chrysalides de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* et évaluation de son aptitude de diapause nymphale à Djelfa. Mémoire d'ingénieur. Univ. de Djelfa, 98 p.
- 22. Leblond, A., Martin, J.C., Napoléone, C., Geniaux, G., Robinet, C., Provendier, D., et Gutleben, C. 2010.** La processionnaire du pin vue par ses gestionnaires . Une enquête auprès des communes françaises donne un nouveau regard sur ce ravageur. *Phytoma*, **633**, 18.23.
- 23. Maga. N. et Olsen. M., 2004.** Mycotoxines in food. Detection and control, Woodhead publishing in Food Science and Technology. P .190.203.
- 24. Barbouche, N., Hajjem, B., Lognay, G., et Ammar, M., 2001.** Contribution à l'étude de l'activité biologique d'extraits *Cestrum* parqui L'Hérit. (Solanaceae) sur le criquet pèlerin *Schistocerca gregaria* (Forsk). *Biotechnol. agron. Soc. environ*, 2001, **5**, (2), 85.90.
- 25. Isman M.B., 2005.** Problems and opportunities for the commercialization of botanical insecticides. In *Biopesticides of Plant Origin*, ed. C Regnault. Roger, BJR Philogene, C Vincent, Paris. Lavoisier. pp. 91.283.

- 26. Shaaya E., Kostjukovski M., Eilberg J. et Sukprakarn C., 1997.** *Plant oils as fumigants and contact insecticides for control of stored product insects*, *Journal Stored Product Research*.N° 33, pp 7.15.
- 27. Crosby, DG. , 1966.** *Natural pest control agents*. In Gould, R.F. (Ed.). *Natural Pest Control Agents*. *Adv. Chem. Ser.***53**, p. 1.16
- 28. Howe, G.A., and Jander, G. 2008.** Plant immunity to insect herbivores. In *Annu. Rev. Plant Biol.* **59**, p. 41.66.
- 29. Janz, N., and Nylin, Sö. 1997.** The role of female search behaviour in determining host plant range in plant feeding insects. a test of the information processing hypothesis. In *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences* **264**, p. 701.707.
- 30. Awmack, C.S., and Leather, S.R. 2002.** Host plant quality and fecundity in herbivorous insects. In *Annual review of entomology* **47**, p. 817.844.
- 31. Wallin, K., and Raffa, K. 2004.** Feedback between individual host selection behavior and population dynamics in an eruptive herbivore. In *Ecological monographs* **74**, p. 101.116.
- 32. Mattson, W.J., 1980.** Herbivory in relation to plant nitrogen content *Annual Review Ecology Systematics*, n° 11, pp. 119.161.
- 33. Bidon Y., 1993.** Influence des sucres solubles et de l'azote sur la croissance, le développement et l'utilisation de la nourriture par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clem.)). Thèse de Maîtrise ès Science. Université Laval, Ste.Foy (Québec), Canada. 63 pp.
- 34. Mcneill S. et Southwood T.R.E., 1978.** The role of nitrogen in the development of insect/plant relationships. *Biochemical aspects of plant and animal coevolution*, J.B. Harborne, ed., Academic Press, London, 77. 98.
- 35. Brewer W., Capinea J.L., Dashon, R.E. et Walamsly M.L., 1985.** Influence of foliar nitrogen levels on survival, development and reproduction of western spruce budworm, *Choristoneura occidentalis* (Lepidoptera. Tortricidae). *Canadian Entomologist*, Canada, pp. 23.32.
- 36. Durzan D.J. et Lopushanski S.M., 1968.** Free and bound amino acids of spruce budworm larvae feeding on balsam fir and red and white spruce. *Journal of Insect Physiology* **14**. 1485.1497.
- 37. Brodbeck B. et Strong D., 1987.** Amino acids nutrition of herbivorous insects and stress to host plants. In *Insect outbreaks*. Edited by P. Barbosa et J.C. Schultz. Academic Press, New York. pp. 347.364.
- 38. Dadd R.H., 1985.** Nutrition. organisms. In. *Comprehensive Insectphysiology, Biochemistry andpharmacology*. Vol. 4. Ed. Pergamon press. Oxford, pp. 313 . 390.
- 39. Mattson W.J. et Scriber J.M., 1987 .**Nutritiona l ecology of insect folivores of woody plants. In. Slansky F Jr, Rodriguez JG (eds). *Nutritional ecology of insects, mites spiders, and related invertebrates*. Wiley, New. York, pp. 105.146.

- 40. Reinecke J.P., 1985** .Nutrition. Artificial diets. In. *Comprehensive Insect Physiology, Biochemistry and Pharmacology*, vol. 4, ed. G.A. Kerkut et L.I. Gilbert, pp. 391. 419. Oxford. Pergamon Press.
- 41. Chapman R.F., 1998** .Nutrition In. *The Insects*, Cambridge University press, pp.69.93
- 42. Scriber J.M., 1977** .Limiting effects of low leaf.water content on the nitrogen utilization, energy budget, and larval growth of *Hyalophoracecropia* (*Lepidoptera. Saturniidae*), *Oecologia* 28, New York, pp. 269. 287.
- 43. Simpson S.J. et Simpson C.L., 1990** .The mechanisms of nutritional compensation byphytophagous insects. In. *Insect.Plant interactions*. Vol. II. Ed. CRC press, Florida, pp. 111.160.
- 44. Waldbauer G.P., 1968** .The consumption and utilization of food by insects. *Advances in insect physiology* n° 5, pp. 229.288.
- 45. Montgomery M.E., 1983**. Biomass and nitrogen budgets duringlarval development of *Lymantria dispar* and *Choristoneura fumiferana* .allometrics relationships. In. Talerico R.L., Montgomery M. (ed) CANUSA workshop on forest defoliator.hostinteractions . a comparison betweenengypsy moth and spruce budworm, New Haven, CT, 5.7 April 1983 General Technical Report NE.85. USDA Forest Service, Broomall, PA.pp. 133.140.
- 46. Lee K.P., Raubenheimer D., Behmer S.T. et Simpson S.J., 2003** . A correlation between macronutrient balancing and insect host.plant range. evidence from the specialist caterpillar *Spodoptera exempta* (Walker). *Journal of Insect Physiology*, 49, 1161.1171.
- 47. Nation J. L., 2008**. *Insect physiology and biochemistry*. CRC Press, Boca Raton.
- 48. De Coen W. M. et Janssen C. R., 1998**. The use of biomarkers in *Daphnia magna* toxicity testing. I. The digestive physiology of daphnids exposed to toxic stress. *Hydrobiologia*. 367(1). 199.209.
- 49. Kooijman S. A. L. M., 2000**. *Dynamic Energy and Mass Budgets in Biological Systems*, Cambridge University Press. Cambridge, seconde édition.
- 50. Agnew P., Hide M., Sidobre C. et Michalakis Y., 2002** .A minimalist approach to the effects of density.dependent competition on insect life.history traits. *Ecological Entomology* 27, 396.402.
- 51. Hooper H. L., Sibly R. M., Hutchinson T. H. et Maund S. J., 2003** . The influence of larval density, food availability and habitat longevity on the life history and population growth rate of the midge *Chironomus riparius*. *Oikos*, 102 (3), 515.524.
- 52. Le Gal Y., Lagadic L., Le Bras S. et Caquet T., 1997** .Charge énergétique en adénylates (CEA) et autres biomarqueurs associés au métabolisme énergétique. Biomarqueurs en Ecotoxicologie. Aspects Fondamentaux. L. Lagadic, Caquet, T., Amiadr, J..C. and Ramade, F. Paris, Masson Editeur. Collection d'Ecologie. 241.285. Conséquences des perturbations du métabolisme énergétique. Les biomarqueurs dans l'évaluation de l'état écologique des milieux aquatiques. Lavoisier, Paris. 273.289.

- 53. Russell. J A. et Moran.N A., 2005.** Horizontal Transfer of Bacterial symbionts: Heritability and Fitness Effects in a Novel Aphid Host. *APPLIED AND Environmental Microbiology*, American Society for Microbiology. Vol. 71, No. 12,8p.
- 54. Dedourge O., Geffard A. et Amiard.Triquet C., 2008 .**Origine des perturbations du métabolisme énergétique. Les biomarqueurs dans l'évaluation de l'état écologique des milieux aquatiques. Paris. Lavoisier TecetDoc. 241.271.
- 55. Chippindale A. K., Gibbs A. G., Sheik M., Yee K. J., Djawdan M., Bradley T. J. et Rose M. R. 1998.** Resource acquisition and the evolution of stress resistance in *Drosophila melanogaster*. *Evolution*, 52 (5), 1342.1352.
- 56. Amiard.Triquet C., Amiard J..C. et Rainbow P. S., 2013.** Ecological Biomarkers. Indicators of Ecotoxicological Effects New York, CRC Press.
- 57. Doly. C., 2007.** Biomarqueur en écotoxicologie. application à la surveillance de l'environnement marin. Master SGT, Promotion, 73p.
- 58. Timbrell. J.A., Draper. R., Waterfield. C.J., 1994.** Biomarkers in toxicology. new uses for some old molecules? *Toxicology and Ecotoxicology News* 1, 4.14.
- 59. Lagadic. L., Caquet. T., Amiard. J..C., Ramade. F., 1997.** Biomarqueurs en écotoxicologie. Aspects fondamentaux. Paris, Masson, 418 p.
- 60. Van der Oost. R., Beyer. J., Vermeulen. N. P. E., 2003.** Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment. A review. *Environ. Toxicol. Phar.*, 13. 57–149.
- 61. Lagadic L. et Caquet T., 1996.** Marqueurs biologiques de pollution des outils au service de l'écotoxicologie. *Phytoma. La Défense des Végétaux*, 480, 10.13.
- 62. Ringo J., 1996 –** Sexual receptivity in insects. *Annual Reviews in Entomology* 41 473-494.
- 63. Sawabe K. et Mogi M., 1999.** Differences in energy metabolism and adult desiccation resistance among three *Aedes* (*Stegomyia*) species (Diptera. Culicidae) from South Sulawesi, Indonesia. *Journal of Medical Entomology*, 36 (1), 101.107.
- 64. Marron M. T., Markow T. A., Kain K. J. et Gibbs A. G., 2003.** Effects of starvation and desiccation on energy metabolism in desert and mesic *Drosophila*. *Journal of Insect Physiology*, 49 (3), 261.270.
- 65. Reim C., Teuschl Y. et Blanckenhorn W. U., 2006 .**Sizedependent effects of larval and adult food availability on reproductive energy allocation in the Yellow Dung Fly. *Functional Ecology*, 20 (6), 1012. 1021. Presses universitaires de Franche.Comté.
- 66. Lagadic L., Caquet T., Amiard J. et Ramade F., 1998 .**Utilisation de biomarqueurs pour la surveillance de la qualité de l'environnement, Tec et Doc.Lavoisier.
- 67. Ramade F., 2007.** Introduction à l'écotoxicologie. fondements et applications, Tec et Doc.

- 68. Adam O., 2011.** Bioindication de la qualité de l'eau par les gammarès. concepts et applications, Presses universitaires de Franche-Comté.
- 69. Calow. P., 1991.** Physiological costs of combating chemical toxicants. Ecological implications. *Comp Biochem. Physiol. C* 100. 3.6.
- 70. Holloway. G.J., Sibly. R.M., Povey. S.R., 1990.** Evolution in toxin-stressed environments. *Func. Ecol.* 4, 289-294.
- 71. Mayer. F. L., 2002.** Physiological and nonspecific biomarkers. *In* biomarkers. Biochemical, physiological and histological markers of anthropogenic stress, ed. R.J. Huggett, R. A. Kimerle, P. M J. Mehrle, and H. L. Bergman, 5.85. SETAC Special Publication Series. Boca Raton, FL. Lewis Publishers.
- 72. Durou. C., 2006.** Recherche d'indicateurs de l'état physiologique de l'annélide polychète endogée *Nereis diversicolor* en relation avec la qualité du milieu. Thèse de Doctorat en Ecotoxicologie, Université de Nantes. 201 pages.
- 73. Amiard.triquet C., Cossu.Leguille C. et Mouneyrac C., 2008.** *Les biomarqueurs de défenses, la tolérance et ses conséquences écologiques des milieux aquatiques.* Lavoisier, Tec et Doc, pp .55.94
- 74. Umminger. B. L., 1977.** Relation of whole blood sugar concentration in vertebrates to standard metabolic rate. *Comp. Biochem. Physiol.*, 55. 457–460.
- 75. Kunieda T., Fujiyuki T., Kucharski R., Foret S., Ament S.A., Toth A.L., Ohashi K., Takeuchi H., Kamikouchi A., Kage E., Morioka M., Beye M., Kubo T., Robinson G.E. et Maleszka R., 2006 .** Carbohydrate metabolism genes and pathways in insects. Insights from the honey bee genome. *Insect Molecular Biology*, 15, 563-576.
- 76. Sujatha. C. H., Nair. S. M., Chacko. J., 1996.** Tributyltin oxide induced physiological and biochemical changes in a tropical estuarine clam. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 56. 303–310.
- 77. Bhavan. P. S., Geraldine. P., 1997.** Alterations in Concentrations of Protein, Carbohydrate, Glycogen, Free Sugar, and Lipid in the Prawn *Macrobrachium malcolmsonii* on Exposure to Sublethal Concentrations of Endosulfan. *Pestic. Biochem. Phys.*, 58. 89–101.
- 78. Sargent, J., Henderson, R. J., Tocher, D. R., 1989.** The lipids. In: Halver JE (Ed) *Fish Nutrition*. Academic Press, London, pp 154–209.
- 79. Hashemi. S., Blust. R., De Boeck. G. 2008.** Combined effects of different food rations and sublethal copper exposure on growth and energy metabolism in common carp. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 54. 318–324.
- 80. Blem. C. R., 1992.** Lipid reserves and body composition in postreproductive anurans. *Comp. Biochem. Physiol. Part A*, 103. 653–656.
- 81. Arrese E.L., Canavoso L.E., Jouni Z.E., Pennington J.E., Tsuchida K. et Wells M.A., 2001.** Lipid storage and mobilization in insects. Current status and future directions. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 31, 7.17.

- 82. Canavoso L. E., Jounl Z. E., Karnas K. J., Pennington J. E. et Wells M. A. , 2001.** Fat metabolism in insects. *Annual Review of Nutrition*, 21, 23.46.
- 83. Howard R.W. et Blomquist G.J., 2005.** Ecological, Behavioral, and biochemical aspects of insect hydrocarbons. *Annual Review of Entomology*, 50, 371.393.
- 84. Corio.Costet M. F., Charlet M., Benveniste P. et Hofmann J., 1989.** Metabolism of dietary δ^8 .sterols and $9\beta^{19}$.cyclopropyl sterols by *Locusta migratoria*. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 11, 47.62.
- 85. Mondy N., Corio.Costet M.F., Bodin A., Mandon N., Vannier F. ET Monge J.P., 2006.** Importance of sterols acquired through host feeding in synovigenic parasitoid oogenesis. *Journal of Insect Physiology* 52, 897.904.
- 86. Behmer S. T. et Nes W. D., 2003.** 'Insect sterol nutrition and physiology. A global Overview' dans Simpson, S.J., *Advances in Insect Physiology*, Elsevier, Paris.
- 87. Ribeiro. S., Sousa. J. P., Nogueira. A. J. A., Soares. A. M. V. M., 2001.** Effect of endosulfan and parathion on energy reserves and physiological parameters of the terrestrial isopod *Porcellio dilatatus*. *Ecotox. Environ. Safe.*, 49. 131–138.
- 88. Rambabu. J. P., Rao. M. B., 1994.** Effect of an organochlorine and three organophosphate pesticides on glucose, glycogen, lipid, and protein contents in tissues of the freshwater snail *Bellamya dissimilis* (Müller). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 53. 142–148.
- 89. Sancho. E., Ferrando. M. D., Fernández. C., Andreu. E., 1998.** Liver energy metabolism of *Anguilla anguilla* after exposure to fenitrothion. *Ecotox. Environ. Safe.*, 41. 168–175.
- 90. Baudrimont. M., Metivaud. J., Maury.Brachet. R., Ribeyre. F., Boudou. A., 1997.** Bioaccumulation and metallothionein response in the asiatic clam (*Corbicula fluminea*) after experimental exposure to cadmium and inorganic mercury. *Environ. Toxicol. Chem.*, 16. 2096.2105.
- 91. Geret. F., Serafim. A., Bebianno,.M. J., 2003.** Antioxidant enzyme activities, metallothioneins and lipid peroxidation as biomarkers in *Ruditapes decussatus*? *Ecotoxicology*, 12. 417–426.
- 92. Guisande. C., Toja. J., Mazuelos. N., 1991.** The effect of food on protein content in rotifer and cladoceran species. a field correlational study. *Freshwater Biol.*, 26. 433–438.
- 93. Swain, T. 1979.** Tannins and lignins, p. 657.682. In G. A. Rosenthal and D. H. Janzen [eds.], *Herbivores. their interaction with secondary plant me tabolites*. Academic Press, New York.
- 94. Feeny P.P., 1970.** Seasonal changes in oak leaf tannins and nutrients as a cause of spring feeding by winter moth caterpillar. *Ecology*, 51. 565.581
- 95. Reese J.C., Chan B.G et Waiss A.C.J., 1982.** *Effects of cotton condensed tannin, Maysin (corn) and Pinitol (soybeans) on Heliothis zea growth and development*. *Journal of Chemical Ecology*, 8 pp. 1429.1436.

- 96. Berenbaum M., 1983.** *Effects of tannin on growth and digestion in two species of Papilionids.* Entomologia Experimentalis and Applicata, 34. 245. 250.
- 97. Douce R., 2005.** Les plantes supérieures. divines et/ou diaboliques. Les défis scientifiques du 21ème siècle. *Institut de France. 23, quai de Conti 75006 Paris 17p.*
- 98. 96. Smith C. M., 2005.** Plant resistance to arthropods. Edition Springer, the Netherlands. 423p.
- 99. Shields V. D. C., Smith K. P., Arnold N. S., Gordon I. M., Shaw T. E. et Waranch D., 2008.** The effect of varying alkaloid concentrations on the feeding behavior of gypsy moth larvae, *Lymantria dispar* (L.) (Lepidoptera. Lymantriidae). *Arthropod.Plant Interactions* 2. 101.107.
- 100. Strebler G., 1989.** Les médiateurs chimiques, leur incidence sur la bioécologie des animaux. Technique et documentation .Lavoisier, Paris. 246p.
- 101. Schoonhoven L. M., Van Loon J. J. A. et Dicke M., 2005.** Insect. Plant Biology, Ed 2. Oxford University Press, Oxford
- 102. Kehr J., 2006.** Phloem sap proteins. Their identities and potential roles in the interaction between plants and phloem.feeding insects. *J Exp Bot* 57, pp. 767 . 774.
- 103. Cortesero A. M., De Moraes C. D., Stapel J. O., Tumlinson J. H. et Lewis W. J., 1997.** Les comparaisons et les contrastes dans les stratégies de recherche de nourriture hôte de deux parasitoïdes larvaires avec différents degrés de spécificité d'hôte. *J Chem Ecol* 23. 1589. 1606.
- 104. Louis S. 2004** .Diversité structurale et d'activité biologique des albumines entomotoxiques de type 1b des graines de légumineuses. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 260p.
- 105. Ryan C. A., 1990.** Protease inhibitors in plants. Genes for improving defenses against insect and pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 28. 425. 449.
- 106. Deraison C., 2002.** Isolement, caractérisation et cibles de nouveaux inhibiteurs de protéases pour la création de plantes transgéniques résistantes aux pucerons (Doctoral dissertation, Université Paris Sud.Paris XI).
- 107. Fox L.R., 1981.** Defense and dynamics in plant.herbivore systems. *American Zoology*, 21 pp. 853–864,
- 108. Rhoades D.F., 1985.** Offensive.defensive interactions between herbivores and plants. Their relevance in herbivore population dynamics and ecological theory. *The American Naturalist*, 125(2) pp. 205–238,
- 109. Gutschick V.P., 1999.** Biotic and abiotic consequences of differences in leaf structure. *New Phytologist*, 143, pp. 3–18,
- 110. Levin D.A., 1973.** The role of tichomes in plant defense. *The Quarterly review of biology*, 48 (1).3–15,

- 111. Manetas Y., 2003.** The importance of being hairy. the adverse effects of hair removal on stem photosynthesis of *verbascum speciosum* are due to solar uv.b radiation. *New Phytologist*, **158**, pp. 503–508,
- 112. Boudjouref M., 2011.** Etude de l'activité antioxydante et antimicrobienne d'extraits d'*Artemisia campestris* L. Thèse de Magister en Biochimie. Université Ferhat Abbès, Sétif. Algérie. 99 p.
- 113. Newman D.J., et Cragg G.M., 2012.** Natural Products As Sources of New Drugs over the 30 Years from 1981 to 2010. *J. Nat. Prod.* Vol. (75). 311.335.
- 114. Guignard J.L., 1996.** Biochimie végétale. Ed. Masson, Paris. France. 274 p.
- 115. Peeking A., Picand B., Hacene K., Lokiec F. et Guerin P., 1987.** Oligimères procyanidoliques (Endotélon) et système lymphatique. *Artères et Veines. Publications médicales AGCF.* Vol. (6). 512.513.
- 116. Fraenkel G. S., 1959 .**The raison d'être of secondary compounds. *Science*; vol. 129, pp. 1466.1470.
- 117. Schultz J. C., 1988 .**Many factors influence the evolution of herbivore diets, but plant chemistry is central. *Ecology*, vol. 69, pp. 896.897.
- 118. Auger J., Dugravot S., Naudin A., Abo.Ghali A., Pierre D. et Thibout E., 2002 .**Utilisation des composés allelochimiques des *Allium* en tant qu'insecticides, Use of pheromones and other semiochemicals in integrated production IOBC wprs Bulletin Vo.. 25.
- 119. Kennedy J.S., 1965 .**Mechanisms of host plant selection. *Ann. Appl. Biol.* 56. 317.322.
- 120. Hennebelle T., Sahpaz S. et Bailleul F., 2004.** Polyphénols végétaux, sources, utilisations et potentiel dans la lutte contre le stress oxydatif. *Phytothérapie.* Vol (1). 3.6.
- 121. Hare P.D., Cress W.A. et Van Staden J., 1998 .**Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant Cell and Environment*, 21, 535.553.
- 122. Noiraud N., Delrot S. et Lemoine R., 2000 .**The sucrose transporter of Celery. Identification and expression during salt stress 1. *Plant physiol.*, Vol.122, PP 1447.1456.
- 123. Chunyang L et Kaiyun W., 2003 .**Differences in drought responses of three contrasting *Eucalyptus microtheca* F. Muell. Populations. Uni of Helsinki. Finland. *Forest Ecology and Management.* 179, Pp 377 .385.
- 124. Ildiko K. et Galiba G., 1995 .**Carbohydrates in wheat and Maize plants under water stress. INRA, Inter drought, V.10. *In. Physiologie des arbres et arbustes des zones arides et semi.arides .*Paris, 465 .472.
- 125. Kameli A. et Lösel D.M., 1995 .**Carbohydrates and water status in wheat plants under water stress. *New Phytol.* **125**, 609.614.
- 126. Geigenberger P., Reimholz R., Geiger M., Merlo L., Canale V. et Stitt M., 1997 .**Regulation of sucrose and starch metabolism in potato tubers in response to short.term water deficit. *Planta*, **201**, 502. 518.

- 127. Kim J.Y., Mache A., Brangeon J. et Prioul J. L., 2000** .A Maize vacuolar invertase, IVR2, is induced by water stress. Organ/Tissue specificity and diurnal modulation of expression. *Plant physiology*, Vol.124, Pp 71 . 84.
- 128. Mastrangelo A.M., Rascio A., Mazzucco L., Russo M., Cattivelli L. et DI Fonzo N., 2000** .Molecular aspects of abiotic stress resistance in durum wheat. *Option méditerranéenne*, N°40, 207. 213.
- 129. Agenjo. R., 1941.** Monographia de la familia des Thaumetopoeidae (Lep.). Eos, Revista Espanola de Entomologia, 17, 69.130.
- 130. Kiriakoff., 1970** . Lepidoptera familia thaumetopoeidae. In p. wylsman (Ed.), genera insectorum (pp. 1.54). Anvers. SPRL mercurius Schintlmeeister 2013). Notodontidae et oenosandridae (Lepidoptera). World catalogue of insects 11 (608 pp.).
- 131. Imbert, C.E., 2012.** Expansion d'un ravageur forestier sous l'effet du réchauffement climatique. la chenille processionnaire du pin affecte.t.elle la biodiversité entomologique dans les zones nouvellement colonisées ? Thèse Doct. Univ. D'Orléans. INRA Orléans.197p.
- 132. Gómez De Aizpúrua. C., 1986.** Biología y morfología de las orugas, Lepidoptera; Cossidae, Sphingidae, Thaumetopoeidae, Lymantriidae, Arctiidae (Vol. 2, serie 6). Madrid. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 239 p.
- 133. Escalón. S., Martin. C., Rousselet. J., Roques. A. et Jactel. H., 2013.** *Processionnaire du pin. une chenille sous haute surveillance*. Institut National de la Recherche Agronomique.
- 134. Martin J.C., Bonnet C., 2008.** Les moyens de lutte disponibles et à venir en milieu forestier et urbain. In . *Colloque Insectes et changement climatique*. [en.ligne] Micropolis, Aveyron (France), 15 novembre 2008.
- 135. Brinquin A.S. et Martin J.C., 2016.** les clés pour lutter contre la processionnaire de pin. *Département des Alpes .Maritime*, 1.2.
- 136. Martin J.C., 2007** « la chenille processionnaire du pin », futura .sciences. [en ligne].<http://www.futura.sciences.com/magazines/nature/infos/dossiers/d/zoologie.chenilleprocessionnaire.pin>
- 137. Demolin, G., 1969a.** Bioecologia de la procesionaria del pino *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Incidencia de los factores climaticos. Boletín del Servicio de Plagas Forestales 12, 9–24.
- 138. 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
- 139. Martin J.C. et Brinquin A.S., 2014.** Programme ALTERPRO Mise au point de stratégies de piégeage combinées pour la gestion de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa*, appliquées aux Zones Non Agricoles.
- 140. Dajoz. R., 1998.** Les insectes et la forêt. ed. Lavoisier TecetDoc. 594 p. Paris.

- 141. Burjeron. A., 1972.** Étude des facteurs responsables du rythme nycthéméral de la prise alimentaire des chenilles de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. et des conséquences sur la virose cytoplasmique. *Ann. Zool. . Écol. Anim.* 4(3). 353.366.
- 142. Démolin. G., 1969.** Comportement des adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Dispersion spatiale, importance écologique. *Ann. Sci. Forest.* 26(1). 81 102.
- 143. INRA, 2013.** Institut National de la Recherche Agronomique, Avignon.
- 144. Démolin. G., 1971 :** Incidences de quelques facteurs agissant sur le comportement social des chenilles de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. (*Lepidoptera*) pendant la période des processions de nymphose - Répercussions sur l'efficacité des parasites.
- 145. Markalas. S. 1989.** Influence of soil moisture on the mortality, fecundity and diapause of the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.). *J. Appl. Ent.* 107. 211. 215.
- 146. Ozenda P., 2006.** Les végétaux. organisation et diversité biologique. Ed Dunod (2^{ème}ed), Paris, 516p.
- 147. Nahal. I., 1962.** Le pin d'Alep. Etude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole. *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts.* 4 . 533.627.
- 148. Bouguenna. S., 2011.** Diagnostic écologique, mise en valeur et conservation des pineraies de *Pinus halepensis* de la région de Djerma (Nord.est du parc national de Belezma, Batna). *Mém. Magister, Univ. Batna*, 161p.
- 149. Willmer, P.G. et Unwin, D.M. 1981.** Field analyses of insect heat budgets. Reflectance, size and heating rates. *Oecologia (Berlin)*, **50**, 250–255.
- 150. Anthes, N., Fartmann, T. et Hermann, G. 2008.** The Duke of Burgundy butterfly and its dukedom. larval niche variation in *Hamearis lucina* across Central Europe. *Journal of Insect Conservation*, **12**, 3–14.
- 151. Vande Velde, L., Turlure, C. et Van Dyck, H. 2011.** Body temperature and territory selection by males of the speckled wood butterfly (*Pararge aegeria*). what makes a forest sunlit patch a rendezvous site? *Ecological Entomology*, **36**, 161–169.
- 152. Coggan, N., Clissold, F.J. et Simpson, S.J. 2011.** Locusts use dynamic thermoregulatory behaviour to optimize nutritional outcomes. *Proceedings of the Royal Society B*, **278**, 2745–2752.
- 153. Solomon, S. 2007.** Technical summary. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller), Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York, New York.pp. 19–91.
- 154. Ronnås, C., Larsson, S., Pitacco, A. et Battisti, A. 2010.** Effects of colony size on larval performance in a processionary moth. *Ecological Entomology*, **35**, 436–445.

- 155. Aimi, A., Larsson, S., Ronnäs, C., Frazao, J. et Battisti, A. 2008.** Growth and survival of larvae of *Thaumetopoea pinivora* inside and outside a local outbreak area. *Agricultural and Forest Entomology*, **10**, 225–232.
- 156. Battisti A., Marini L., Pitacco A. et Larsson S., 2013.** Solar radiation directly affects larval performance of a forest insect. *Ecological Entomology* (2013) pp. 1.7, DOI. 10.1111/een.12047
- 157. Sinclair BJ, Addo.Bediako A, Chown SL 2003.** Climatic variability and the evolution of insect freeze tolerance. *Biol Rev Camb Philos Soc* 78(2).181–195
- 158. Trenberth KE, Jones PD (2007).** Observations. Surface and Atmospheric Climate Change. Cambridge University Press, New York.
- 159. Klapwijk MJ, Ayres MP, Battisti A. 2012.** Assessing the impact of climate change on outbreak potential. In: Barbosa P, ed. *Insect Outbreaks Revisited*. Academic, New York.
- 160. Turchin P, Wood SN, Ellner SP, Kendall BE, Murdoch WW, Fischlin A, Casas J, McCauley E, Briggs CJ 2003.** Dynamical effects of plant quality and parasitism on population cycles of larch budmoth. *Ecology* 84(5).1207–1214
- 161. Dale VH, Joyce LA, McNulty S, Neilson RP, Ayres MP, Flannigan MD, Hanson PJ, Irland LC, Lugo AE, Peterson CJ, Simberloff D, Swanson FJ, Stocks BJ, Wotton M., 2001.** Climate change and forest disturbances. *BioScience* 51(9).723–734
- 162. Robinet C, Imbert C.E, Rousselet J, Sauvard D, Garcia J, Goussard F, Roques A., 2011.** Human-mediated long-distance jumps of the pine processionary moth in Europe. *Biol Invasions* 14(8).1557–1569
- 163. Buffo, E., Battisti, A., Stastny, M., Larsson, S., 2007.** Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the Italian Alps. *Agricultural and Forest Entomology* 9, 65–72. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1461.9563.2006.00321.x>.
- 164. Marini L, Ayres MP, Battisti A, Faccoli M., 2012.** Climate affects severity and altitudinal distribution of outbreaks in an eruptive bark beetle. *Clim Change* 115.327–341
- 165. Jactel, H., Branco, M., Duncker, P., Gardiner, B., Grodzki, W., Langstrom, B., Moreira, F., Netherer, S., Nicoll, B., Orazio, C., Piou, D., Schelhaas, M.J., Tojic, K., 2012.** A multicriteria risk analysis to evaluate impacts of forest management alternatives on forest health in Europe. *Ecol. Soc.* 17 (4). Art 52.
- 166. Berggren Å, Björkman C, Bylund H, Ayres M.P., 2009.** The distribution and abundance of animal populations in a climate of uncertainty. *Oikos* 118(8).1121–1126
- 167. Kenis M, Auger.Rozenberg M.A, Roques A, Timms L, Pe´re´ C, Cock MJW, Settele J, Augustin S et Lopez.Vaamonde C., 2009.** Ecological effects of invasive alien insects. *Biological Invasions* 11, 21–45.
- 168. Demolin, G., 1969b.** Comportement des adultes de *Thaumetopoea pytiocampa* Schiff. Dispersion spatiale, importance écologique. *Annales des Sciences Forestières* 26, 81–102.

- 169. Hoch. G., Toffolo. E.P., Netherer. S., Battisti. A., & Schopf. A., 2009** : Survival at low temperature of larvae of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* from an area of range expansion. *Agricultural and Forest Entomology*, 11-pp 313-320.
- 170. 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, 182p.
- 171. Chakali G., 2014.** Processionary Moths and Climate Change. Alain Roques Editor An Update 42p.
- 172. Huchon, H., and G. Demolin. 1970.** La Bioécologie de la processionnaire du pin. Dispersion potentielle, dispersion actuelle. *Rev. Forest Fr.* 151.220–234.
- 173. Demolin, G, Abgrall, J. F, et Bouhot.Delduc, L., 1996.** Evolution de l'aire de la processionnaire du pin en France. *Les cahiers du DSF* 1.1996 (*La Santé des Forêts* .1995) pp.26.28.
- 174. Scheiner. P., 2003.** Les chenilles processionnaires chez le chien. Thèse Méd. Vét., Lyon, N°136, 122p.
- 175. Gachi. M., 1996.** La chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Conférence Journée d'étude en protection des forêts C.F.A.T.S.. Jijel. 17 pp.
- 176. Lilian M., 2016.** La chenille processionnaire du Pin, une présence cyclique. *Thaumetopoea pityocampa* (Denis et Schiffermüller, 1775). Office National des Forêts, correspondant du Département Santé des Forêts pour le 04.
- 177. 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* [en.ligne]. Micropolis, Aveyron (France), 15 novembre 2008.
- 178. Markalas. S., 1998.** Biomass production of *Pinus pinaster* after defoliation by the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.), *in* Population dynamics, impacts, and integrated management of forest defoliating insects (ed. Mc Manus, M.L. and Liebhold, A.M.).
- 179. 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.* [en.ligne] Master Ingénierie en Ecologie et Gestion de la Biodiversité, Montpellier, 66p.
- 180. Cayuela, L., Hódar, J.A., Zamora, R., 2011.** Is insecticide spraying a viable and costefficient management practice to control pine processionary moth in Mediterranean woodlands? *Forest Ecol. Manage.* 261, 1732–1737.
- 181. Chapelin.Viscardi J.D., 2012.** La Protection Biologique Intégrée à Orléans . La lutte contre la Processionnaire du Pin .*Ed Laboratoire d'Eco.Entomologie .Orléans.*
- 182. Bloomquist J. R. 1999.** Insecticides. Chemistries and characteristics.Bloomquist . Insecticides.

- 183. Ketoh K. G. 1998.** Utilisation des huiles essentielles de quelques plantes aromatiques au Togo comme biopesticides dans la gestion des stades de développement de *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera. Bruchidae). Thèse de Doctorat, Univ. du Bénin, Lomé, 141 p.
- 184. Taylor T. A. 1974.** On the population dynamics of *Taeniothrips sjostedti* (Tribom) (Thrisanoptera. Thripidae) on cowpea and alternate
- 185. Arnason J. T., Mackinnon S., Isman M. B. and Durst A. 1992.** Insecticides in tropical plants with neurotoxic modes of action. *Phytochem.* 28,107. 131.
- 186. Nuto Y., 1995.** Synergistic action of cooccurring toxins in the root barks of *Zanthoxylum zanthoxyloides* (Rutaceae) against the cowpea beetle *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera. Bruchidae). Thesis of Ph.D.S.U.N.Y. Syracuse, New York, 107p.
- 187. Goudoum A. 2010.** Impact des huiles essentielles sur le potentiel technologique et nutritionnel des grains et farine de maïs au cours du stockage. Thèse de Doctorat, ENSAI, Université de Ngaoundéré, Cameroun, 180 p.
- 188. Budavari S., 1996.** The Merck Index, Print version, Twelfth Edition. Eds CRC Press. 1741p.
- 189. Bernard, T. ; Perineau, F. ; Bravo, P. ; Delmas, M. et Gaset., 1988 .** « *nformations chimie* », Oct, n° 298, 179.
- 190. Capo. M., Couilleau. V., et Valette. C., 1990.** Chimie des couleurs et des odeurs. *Culture et techniques*, 204 p.
- 191. Sharkay. T.D. et Sumsum., Y., 2001.** *Ann. Rev. Plant physiol. Plant Mol. Biol.* 52, 407.436.
- 192. Aburjai, T.; Natsheh, F. M., 2003.** *Phytotherapy Research*, 17, 987.1000.
- 193. Paster. N. et al., 1990.** Inhibitory effect of oregano and thyme essential oils on molds and foodborne bacteria. *Lett. Appl. Microbiol.*, 11, 33.37.
- 194. Caccioni. D.R.L. et Guizardi. M., 1994.** Inhibition of germination of fruit and postharvest pathogenic fungi by essential oil components. *J. Essent. Oil Res.*, 6, 173.179.
- 195. Cowan. M.M., 1999.** Plant products as antimicrobial agents. *Clin. Microbiol. Rev.*, 12, 564.582.
- 196. Nielsen. P.V. et Rios. R., 2000.** Inhibition of fungal growth on bread by volatile components from spices and herbs, and the possible application in active packaging, with special emphasis on mustard essential oil. *Int. J. Food Microbiol.*, 60, 219.229.
- 197. Lamiri. A., Lhaloui. S., Benjilali. B. et Berrada. M., 2001.** Insecticidal effects of essential oils against Hessian fly, *Mayetiola Destructor* (Say). *Field Crops Res.*, 71, 9.15.
- 198. Cimanga K., 2002.** Correlation between chemical composition and antibacterial activity of essential oils of some aromatic medicinal plants growing in the Democratic Republic of Congo. *J. Ethnopharmacology*, 79, 213.220.

- 199. Ziming W. , Lan D., Tiechun L., Xin Z., Lu W., Hanqi Zh., Li L., YingL., Zhihong L., Hongju W, Hong Z.Hui H., 2006.** Improved solvent free microwave extraction of essential oil from dried *Cuminum cyminum* L. and *Zanthoxylumbungeanum* Maxim. *Journal of Chromatography A*, **1102**, pp. 11.17.
- 200. Banthorpe D.V. 1994.** Terpenoids. In Mann J., Davidson R.S., Hobbs J., Banthorpe D., Harborne J. *Natural Products. Their chemistry and biological significance.* Longman Scientific and Technical, England, pp 289.359.
- 201. Mazen K.E.T., 2002.** Molecular regulation of plant monoterpenes biosynthesis in relation to fragrance. Thesis Proefschrift Wageningen, University, Netherland, 206 p.
- 202. Wallach, 1907.** Contributions to our knowledge terpenes and etherealoils. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 80 . 585.591.
- 203. Smith. C.K., Moore. C.A., Alahi. E.N., Smart. Â.T., Hotchkiss. S.A., 2000.** Human skin absorption and metabolism of the contact allergens, cinnamic aldehyde and cinnamic alcohol. *ToxicoS. Appl. Pharmacol.* 168,189.99.
- 204. Naganuma. M.; Hirose. S; Nakayama. Y; Nakajima. K; Someya. T., 1985.** A study of the phototoxicity of lemon oil. *Arch. Dermatol. Res.* 278, 31.36.
- 205. Hamburger. K., Lindegaard. C. et Dall. P. C., 1996.** The role of glycogen during the ontogenesis of *Chironomus anthracinus* (Chironomidae, Diptera). *Hydrobiologia* 318, 51–59.
- 206. Bruneton J., 1999.** Pharmacognosie et phytochimie des plantes médicinales. *3ème Ed Tec et Doc. Paris.*
- 207. Isman. M. B., 2000.** Plant essential oils for pest and disease management. *Crop protection.* 19. pp. 603.608.
- 208. Isman. M. B., 2002.** Problèmes et perspectives de commercialisation des insecticides d'origine botanique *In. Biopesticides d'origine végétales.* pp 300.311.
- 209. Regnault.Roger. C., 2002.** De nouveaux phytoinsecticides pour le troisième millénaire ? *In. Biopesticides d'origine végétales*, ed Tec et doc. Londres.Paris.New York. pp. 19.39.
- 210. Glitho I.A. , 2002 .** Annexe post récolte des biopesticides en Afrique. In Regnault – Roger C., Philogène BJR, Vincent C., *Biopesticides d'origine végétales.* Tec et Doc LMavoisier, Paris, pp . 313.321.
- 211. Oshaghi MA, Ghalandari R., Vatandoost H., Shayeghi M., Kamali.nejad M, Tourabi.Kaledi H., Abolhassani M., HashemzdehM., 2003.** Repellent effect of extracts and essential oils of *Citrus limon* and *Melissa officinalis* against main malaria vector, *Anopheles stephensi*. *Iranian journal of Publis Health.* 2003, **32**, pp. 47.25.
- 212. Martin J.C. and N. Warzee. 2006.** Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.* 63.613–624.
- 213. Markouk M., Bekkouche K., Larhsini M., Bousaid M., 2000.** Evaluation of some Moroccan medicinal plants extracts for Larvacidal activity. *Journal of Ethnopharmacology* **73**, pp. 293.297.

- 214. Regnault.Roger. C, Hamraoui. A, Holeman. M, Théron. E, Pinel. R., 1993.** Insecticidal effect of essential oils from Mediterranean plants upon *A. obtectus* Say (Coleoptera, Bruchidae), a pest of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) *J Chem Ecol*, 19, 1231.1242.
- 215. Tierro.Nieber B., Hellenius J., Varis A.L., 1992.** Toxicity of plant extract to three storage beetles (Coleoptera) *J.Appl.Ent.* N° 113, pp. 202.208.
- 216. Gakuru S. et Foua.BI K., 1996.** *Effet d'extraits de plantes sur la bruche du niébé ColtosobructiusmaculatusFab. et le charançon du riz Sitophilusoryzae L. Cahiers Agriculture; vol. 5. T 1, pp.39.42.*
- 217. Glitho I.A., Ketoh KG. et Koumaglo H.K., 1997.** *Effets de quelques huiles essentielles sur l'activité reproductrice de CallosobruchusmaculatusFab. Annales de l'Université de Ouagadougou Série B, Vol. N° 5, pp. 174.185.*
- 218. Kechout. F., 2001.** Efficacité de trois extraits végétaux et de deux insecticides vis.à.vis de *Sitophilusoryzae* L. (Coleoptera, Curculionidae). Thèse ing.,sci.agr., I.N.A., El Harrach, pp. 30.35.
- 219. Keane Ch., Marx J., Edmund R., 2003.** The service privatized in local health departments.A., *J. Public Health.* 2003; **93** (4) pp. 520.521.
- 220. Huignard J., Lapied B., Dugravot S., Magnin.Robert M. et Ketoh K. G. 2008b.** Modes d'actions neurotoxiques des dérivés soufrés et de certaines huiles essentielles et risques liés à leur utilisation. In « Biopesticides d'origine végétale», 2ème Ed, pp. 219.230.
- 221. Ryan M. F., Byrne O. 1988.** Plant.insect coevolution and inhibition of acetylcholinesterase. *J. Chem. Ecol.*, 14, 1965–1975.
- 222. Oinonen, P. P., Jokela J. K., Hatakka A. I., Vuorela, P. M., 2006.** Linarin, a selective acetylcholinesterase inhibitor from *Mentha arvensis*. *Fitoterapia*, 77, 429. 434.
- 223. Savelev S. U., Okello E. J. et Perry E. K. 2004.** Butyryl. and acetylcholinesterase inhibitory activities in essential oils of salvia species and their constituents. *Phytother Res.*, 18, 315.324.
- 224. Ketoh, G. K., Lecoronc H., Zhu K. Y., Koumaglo K. H., Glitho, I. A., Huignard J., Ramaswamy S. et Lapied B. 2008.** Comparative effects of two plant essential oils extracted from *Ocimum basilicum* and *Cymbopogon schoenanthus* on American cockroach, *Periplaneta americana* L. sent for publication in journal of Comp. Biochem. and physiol.
- 225. Priestley C. M., Williamson E. M., Wafford K. A., Satelle D. B. 2003.** Thymol, a constituent of thyme essential oils, is a positive modulator of human GABA and a homooligosteric GABA receptor from *Drosophila melanogaster*. *Br J. Pharmacol*, 140, 1363.1372.
- 226. Enan E. E. 2005a.** Molecular response of *Drosophila melanogaster* tyramine receptor cascade to plant essential oils. *Insect Biochem. Mol. Biol.*, 35,309.321.
- 227. Roeder T. 1999.** Otopamine in invertebrates. *Progress Neurobiol*, 59,533. 561.

- 228. Enan E. E. 2001.** Insecticidal activity of essential oils. octopaminergic sites of action. *Comp. Biochem. Physiol.* 130C, 325-337.
- 229. Enan E. E. 2005b.** Molecular and pharmacological analysis of an octopamine receptor from American cockroach and fruit fly in response to essential oils. *Arch Insect Biochem. Physiol.*, 59, 161-171.
- 230. Kostyukovsky M., Rafaeli A., Gileadi C., Demchenko N., Shaaya E. 2002.** Activation of octopaminergic receptors by essential oil constituents isolated from aromatic plants. *Pest Manag Sci*, 58, 1101-1106.
- 231. Price D. N., Berry M. S. 2006.** Comparison of effects of octopamine and insecticidal essential oils on activity in the nerve cord, foregut and dorsal unpaired median neurons of cockroaches. *J Insect Physiol*, 52, 309-319.
- 232. Chourghal N., 2016.** Impact du changement climatique sur la culture du Blé dur en Algérie. Thèse Doc. ENSA El Harrach. Alger. 209p.
- 233. ANDI., 2015.** Agence Nationale de Développement de l'Investissement
- 234. I.F.N., 2017.** Inventaire forestier national 2017
- 235. C.F.B.B.A., 2017.** Conservation des forêts de la wilaya de Bordj Bou Arreridj.
- 236. Baldy, Ch., 1992.** Effet du climat sur la croissance et le stress des blé méditerranéens occidentaux In Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne Ed. INRA, Paris, 397p.
- 237. Baldy, Ch., 1974.** Etude fréquentielle du climat, son influence sur la production des principales céréalières d'Algérie. Doc CCCE, Paris 152p.
- 238. Angstrom A., 1924.** "Solar and Terrestrial Radiation". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol.50, N°210, pp. 121-125.
- 239. Allen RG., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998.** Crop evapotranspiration. guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and drainage, Rome, 56p.
- 240. Bale J., Masters G.J., Hodkinson I.D., Awmack C., Martijn B., brown V.K., Butterfield J., Buse A., Coulson J.C., Farrar J., Good J.E., Harrington R., Hartley S., Jones T.J., Lindroth R.L., Press M.C., Symrnioudis I., Watt A.D., Hittaker J.B., 2002.** Herbivory in global climate change research. Direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global change biology* 8, 1-16.
- 241. Chararas C., 1980.** Ecophysiologie des insectes parasites des forêts. Ed. Ets Jacques Vadebourg, Paris. 297 p.
- 242. O.N.M., 2018.** Office national de la météorologie. Station météorologique de la wilaya de Bordj Bou Arreridj.
- 243. Banglous F. et Gaussen H., 1957.** Les climats biologiques et leur classification. Annales de géographie 56^e année. 194-220, 8pl. de graphiques, Paris.

- 244. Dajoz R., 1980.** *Ecologie des insectes forestiers*, Bordas Eds. Paris, 489p
- 245. Jaakola, L., Mättä.Riihinen, K., Kärenlampi, S., and Hohtola, A., 2004.** Activation of flavonoid biosynthesis by solar radiation in bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) leaves. *Planta* 218, 721.728.
- 246. I.N.R.F., 2005.** Institut national de la recherche forestière.
- 247. Geri C., 1980.** Application des méthodes d'études demecologiques aux insectes défoliateurs forestiers. Cas de *Diprion pini* L. (Hymenoptère, Diprionidae). Dynamique des populations de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. (Lepidoptère, Thaumetopoeidae) dans l'île de Corse. *Thèse doct.Etat, Orsey, Université Paris.Sud*, 260p.
- 248. Frontier S., 1983.** Stratégie d'échantillonnage en écologie. *Ed.Masson*, Paris et Les Presses de l'Université de Laval, Québec, 494 p.
- 249. Rondeux J., 1999.** La mesure des arbres et des peuplements forestiers, presse agronomique de Gembloux. 27.412.
- 250. Martel J.P., 1977.** Brevet Fr, n°7712831 in Koba K. 2003. Thèse de doctorat, Université de Lomé.172 p.
- 251. Esseric D.Y., 1980.** Brevet Fr. n°8012239 in Koba K. 2003.Thèse de doctorat, Université de Lomé 172 p.
- 252. Naves V., 1974.**Technologie des parfums naturels. Ed. Masson Paris in Koba K. 2003.Thèse de Doctorat, Université de Lomé 172 p.
- 253. Paris M. et Aurabielle M., 1981.** Agbégé de matière médicale, pharmacognosie. Ed. Masson in Koba K. 2003. Thèse de Doctorat, Université de Lomé 172p.
- 254. Perut M., 1986.** Informations chimiques n° 272 129.135 in Koba K. 2003. Thèse de Doctorat, Université de Lomé 172p.
- 255. Clevenger J. F., 1928.** Apparatus for volatile oil determination, Description of New Type ».American Perfumer and Essential Oil. 17 (4) 346.351.
- 256. Adams RP 2001.** Identification of Essential Oils components by Gas Chromatography/Quadrupole Mass Spectroscopy, Edition Carol Stream, USA, 454 p
- 257. Sánchez.Fortun S. et Barahona M. V., 2005.** «Comparative study on the environmental risk induced by several pyrethroids in estuarine and freshwater invertebrate organism». *Chemosphere*, vol. 59, no 4, p. 553.559.
- 258. Marmonier P., Lagadeuc Y., et Aquilina L. 2006.** Introduction à l'écologie. Ed ENVAM, 36p.
- 259. Abbott W.S. A., 1925.** Methode of computing the effectiveness of an insecticide., *J. Econ.Entomol.* (18) 265.267.

- 260. Magali C. 2009.** Lutte intégrée en serres florales et en verger de pomme, Revue éditée dans le cadre du Programme National Agriculture et Développement Durable <http://dx.doi.org/10.3917/med.175.0039>
- 261. Miller L.C. et Tainter M.L.1944.** Estimation of DL50 and its Error by means of Logarithmic Probit Paper. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, **57**. 261–264,
- 262. Muhammad AR. 2009.** Calculation of LD50 values from the method of Miller and Tainter. *J. Ayub. Med. Coll. Abbottabad.*, **21**(3). 184–185.
- 263. Bradford, M. M. 1976.** A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein.dye binding. *Analytical Biochemistry* **72**(1.2). 248. 254.
- 264. Van Handel, E. 1985a** Rapid determination of glycogen and sugars in mosquitoes. *Journal of the American Mosquito Control Association* **1**(3). 299.301.
- 265. Van Handel, E. 1985b** Rapid determination of total lipids in mosquitoes. *Journal of the American Mosquito Control Association* **1**(3). 302.304.
- 266. Plaistow, S. J., Bollache, L. et Cézilly, F. 2003.** Energetically costly precopulatory mate guarding in the amphipod *Gammarus pulex*. Causes and consequences. *Animal Behaviour* **65**(4). 683.691.
- 267. Romani A., Pinelli P., Cantini C., Cimato A. et Heimler D., 2006.** Characterization of Violetto di Toscana, a typical Italian variety of artichoke (*Cynara scolymus* L.). *J. Food Chem.*,. 221.225.
- 268. Boizot N. et. Charpentier J.P.(2006)** Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. Cah. Tech. INRA. N°. special. pp. 79.82.
- 269. Tereschuk ML, Baigorí MD, Figueroa LIC de, Abdala LR 2004.** Flavonoids from Argentine Tagetes (Asteraceae) with antimicrobial activity. *Public Health and Microbiology. Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology.* Humana Press, Totowa, NJ 268. 317–330
- 270. Dehpour A. A., Ibrahimzadeh M. A., seyed Fazel N . et Seyed Mohammad N., 2009.** Antioxydant activity of the methanol extract of *Ferula assafoetida* and its essential oil composition. *Grasas Y Aceites*, 405.412.
- 271. Ba K., Tine E., Destain J.,Cisse Net Thonart P.,2010 .** Etude comparative des composés phénolique ,du pouvoir antioxydant de différent variétés de sorgho sénégalais et des enzymes amylolytiques de leur malt .*Biotechnol.Agro.Soc. Environ* ,131.139.
- 272. Dubios M., Gilles K., Hamilton J., Rebers P. et Smith F., 1956.** Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal .Chem* **28**, 350.356.
- 273. Djazouli Z..E., Doumandji.Mitiche B., Petit D., 2009.** Spatiotemporal variations of functional groups in a *Populus nigra* L. entomocenosis in the Mitidja plain (Algeria), *C. R. Biologies* **332** 848–860.

- 274. Hammer O., Harper D.A.T., et Rayan P. D., 2001.** PAST. Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Pelaeontologia Electronica* (1). 9p.
- 275. Frison L., Pocock S.J., 1992.** Repeated measures in clinical trials. analysis using mean summary statistics and its implication for design. *Stat Med* 11. 1685.1704.
- 276. SPSS INC., 2018.** SYSTAT version 9, The System for Statistics Inc, Evanston, IL.
- 277. Parmesan, C., 2006.** Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37, 637–669.
- 278. Walther GR, Roques A, Hulme PE et al., 2009.** Alien species in a warmer world. risks and opportunities. *Trends in Ecology et Evolution* 24, 686–93.
- 279. Parmesan C. et Yohe G.,, 2003.** Globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Journal Nature*. Nature Publishing group, 37p.
- 280. Root TL., Price JT., Hall KR., 2003.** Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421, 57–60.
- 281. Visser M.E et Both Ch., 2005.** Shifts in phenology due to global climate change. The need for a yardstick. *Proc. Biol. Sci.* 2005, 272 (1581), pp. 2561.2569.
- 282. Battisti, A. 2008.** Forests and climate change. Lessons from insects. *iForest* 1.1–5.
- 283. Berger, D., R. Walters, and K. Gotthard. 2008.** What limits insect fecundity? Body size. and temperature.dependent egg maturation and oviposition in a butterfly. *Funct. Ecol.* 22.523–529.
- 284. Hickling R, Roy DB, Hill JK et al. 2005.** A northward shift of range margins in British Odonata. *Global Change Biology*, 11, 502–506.
- 285. Parmesan C, Ryrholm N, Stefanescu C., 1999.** Poleward shifts in geographic ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 399, 579–583.
- 286. Gutschick V.P. et BassiriRad H. 2003.** Extreme events as shipping physiology, ecology and evolution of plants. Towards a unified definition and evaluation of their consequences. *New Phytol.* 160 pp. 21.42.
- 287. Petit R.J. et Hampe A., 2006.** Some Evolutionary Consequences of Being a Tree. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 37 (1) pp. 187.214.
- 288. Aitken S.N., Yeaman J.A. Holliday T., Wang and Curtis McLane S., 2008.** Adaptation, migration or extirpation. Climate change outcomes for tree populations. *Evol. Appl.* 1; pp. 95.111.
- 289. Lindner, M., Garcia.Gonzalo, J., Kolstro¨m, M., Green, T., Reguera, R., Maroschek, M., Seidl, R., Lexer, M.J., Netherer, S., Schopf, A., Kremer, A., Delzon, S., Barbati, A., Marchetti, M., Corona, P., 2008.** Impacts of climate change on European forests and options for adaptation. Report to the European Commission Directorate. General for Agriculture and Rural Development, November 2008.

- 290. Allen, P.E., 2010.** Group size effects on survivorship and adult development in the gregarious larvae of *Euselasia chrysippe* (Lepidoptera, Riodinidae). *Insectes Sociaux*, **57**, 199–204.
- 291. Choat B., Jansen S., Brodribb T.J., Cochard H., Delzon s., Bhaskar R., Bucci S.J., Feild T.S., Gleason S.M., Hake U.G., 2012.** Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* **491** pp. 752.755.
- 292. Tenow O., Nilssen AC., Holmgren B., Elverun F.I., 1999.** An insect (*Argyresthia retinella*) outbreak in northern birch forests, release changes? *J.Appl. Ecol.* **36** pp. 111.122.
- 293. Rouault, G., J. N. Candau, F. Lieutier, L. M. Nageleisen, J. C. Martin, and N. Warz. 2006.** Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.* **63**.613–624.
- 294. Lombardero, M.J., Ayres, M.P., Lorio, P.L., Ruel, J.J., 2000.** Environmental effects on constitutive and inducible resin defences of *Pinus taeda*. *Ecol. Lett.* **3**, 329–339.
- 295. Day KR, Ayres MP, Harrington R, Kidd NAC., 2010.** Interannual dynamics of aerial and arboreal green spruce aphid populations. *Popul Ecol* **52**(2).317–327
- 296. Hodar, J.A., Zamora, R., 2004.** Herbivory and climatic warming. a Mediterranean outbreaking caterpillar attacks a relict, boreal pine species. *Biodiversity and Conservation* **13**, 493–500
- 297. Conservation 13, 493–500**
- 298. Tran, J.K., Ylioja, T., Billings, R.F., R'egni`ere, J. et Ayres, M.P., 2007.** Impact of minimum winter temperatures on the population dynamics of *Dendroctonus frontalis*. *Ecological Applications*, **17**, 882–899.
- 299. Esper, J., B'untgen, U., Frank, D.C., Nievergelt, D. et Liebhold, A., 2007.** 1200 years of regular outbreaks in alpine insects. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, **274**, 671–679.
- 300. Jepsen, J.U., Hagen, S.B., Ims, R.A. et Yoccoz, N.G., 2008.** Climate change and outbreaks of the geometrids *Operophtera brumata* and *Epirrita autumnata* in subarctic birch forest. Evidence of a recent outbreak range expansion. *Journal of Animal Ecology*, **77**, 257–264.
- 301. Zenzane W., 2016.** Utilisation du S.I.G pour l'analyse de la structure de la forêt d'Ouennougha dans la Wilaya de Bordj Bou Arréridj. Master en Foresterie Univ. Tlemcen.83p.
- 302. Pimentel C, Calvão T, Ayres MP. 2011.** Impact of climatic variation on populations of pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* in a core area of its distribution.
- 303. Hódar JA, Zamora R, Cayuela L., 2012a.** Climate change and the incidence of a forest pest in Mediterranean ecosystems. can the North Atlantic Oscillation be used as a predictor? *Clim Change* **113**(3–4).699–711

- 304. Pimentel C, Ferreira C, Nilsson J.Å. 2010.** Latitudinal gradients and the shaping of life history traits in a gregarious caterpillar. *Biological Journal of the Linnean Society* **100**, 224–236.
- 305. Battisti A, Bernardi M, Ghirardo C., 2000.** Predation by the hoopoe (*Upupa epops*) on pupae of *Thaumetopoea pityocampa* and the likely influence on other natural enemies. *Biocontrol* **45**, 311–323
- 306. Weseloh RM, Andreadis TG, Onstad DW., 1993.** Modeling the influence of rainfall and temperature on the phenology of infection of gypsy moth *Lymantria dispar* larvae by the fungus *Entomophaga maimaiga*. *Biol Control* **3**, 311–318
- 307. Hódar JA, Torres Muros L, Senhadji K, Cayuela L, Zamora R. 2012b.** Interacción planta herbívoro y dinámica poblacional de la procesionaria del pino en el Parque Nacional de Sierra Nevada en el marco del cambio global. In: Ramírez L, Asensio B (ed) *Proyectos d'investigación en Parques Nacionales. 2008–2011*, OAPN, pp 387–406
- 308. Bryant, S.R. et Shreeve, T.G., 2002.** The use of artificial neural networks in ecological analysis. estimating microhabitat temperature. *Ecological Entomology*, **27**, 424–432.
- 309. Kuhrt, U., Samietz, J., H'ohn, H. et Dorn, S., 2006.** Modelling the phenology of codling moth. Influence of habitat and thermoregulation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **117**, 29–38.
- 310. Rousseaux, M.C., Julkunen-Tiitto, R., Searles, P.S., Scopel, A.L., Aphalo, P.J. et Ballaré, C.L., 2004.** Solar UV-B radiation affects leaf quality and insect herbivory in the southern beech tree *Nothofagus antarctica*. *Oecologia*, **138**, 505–512.
- 311. Selas, V., Hogstad, O., Kobro, S. et Rafoss, T., 2004.** Can sunspot activity and ultraviolet-B radiation explain cyclic outbreaks of forest moth pest species? *Proceedings of the Royal Society B. Biological Sciences*, **271**, 1897–1901.
- 312. Foggo, A., Higgins, S., Wargent, J.J. et Coleman, R.A. 2007.** Tritrophic consequences of UV-B exposure. plants, herbivores and parasitoids. *Oecologia*, **154**, 505–512.
- 313. Anttila, U., Julkunen-Tiitto, R., Rousi, M., Yang, S., Rantala, M.J. et Ruuhola, T. 2010.** Effects of elevated ultraviolet-B radiation on a plant-herbivore interaction. *Oecologia*, **164**, 163–175.
- 314. Ballaré, C.L., Mazza, C.A., Austin, A.T. et Pierik, R., 2012.** Canopy light and plant health. *Plant Physiology*, **160**, 145–155.
- 315. Bryant, S.R., Thomas, C.D. et Bale, J.S., 2002.** The influence of thermal ecology on the distribution of three nymphalid butterflies. *Journal of Applied Ecology*, **39**, 43–55.
- 316. Kuhrt, U., Samietz, J. et Dorn, S., 2005.** Thermoregulation behavior in codling moth larvae. *Physiological Entomology*, **30**, 54–61.
- 317. Ayres MP, Schriber JM., 1994.** Local adaptation to regional climates in *Papilio canadensis* (Lepidoptera: Papilionidae). *Ecological Monographs* **64**, 465–482.

- 318. Heisswolf A, Klemola T, Andersson T, Ruohomaki K., 2009.** Shifting body weight-fecundity relationship in a capital breeder. maternal effects on egg numbers of the autumnal moth under field conditions. *Bulletin of Entomological*.
- 319. Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E. et Larsson, S. 2006.** A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, **12**, 662–671.
- 320. Pimentel C, Calvão T, Santos M, Ferreira C, Neves M, Nilsson J.Å. 2006.** Establishment and expansion of a *Thaumetopoea pityocampa* (Den. et Schiff.) (Lep. Notodontidae) population with a shifted life cycle in a production pine forest, Central.Coastal Portugal. *Forest Ecology and Management* **233**. 108–115.
- 321. 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. et Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France. *Global Ecol Biogeogr* **16**(4).460–471
- 322. Klemola, T., Ruohomaki, K., Andersson, T. et Neuvonen, S., 2004.** Reduction in size and fecundity of the autumnal moth, *Epirrita autumnata*, in the increase phase of a population cycle. *Oecologia*, **141**, 47–56.
- 323. Hunter M. et Price P.W., 1992.** Playing chutes and ladders . heterogeneity and the relative roles of bottom.up and top.down forces in natural communities. *Ecology* **73** (3) pp. 724.732.
- 324. Riipi M., Ossipov V., Lempa K., Haukioja E., Korchiva J.Ossipova s.Pihlaja K., 2002.** Seasonal changes in birch leaf chemistry. are there trade.off between leaf growth and accumulationof Phenolics? *Oecologia* volume 130, issue 3 pp. 380.390.
- 325. Moore, M.N., 1988.** Cytochemical responses of the lysosomal system and NADPH.ferrihemoprotein reductase in molluscan digestive cells to environmental and experimental exposure to xenobiotics. *Mar. Ecol. Prog.Ser.*, **46**, 81.89.
- 326. Fortin M. et Mauffette Y., 2001.** Forest edge effects on the biological performance of the forest tent caterpillar. *Ecoscienc* **8**, pp: 1641-172.
- 327. Fortin M. et Mauffette Y., 2002.** The suitability of leaves from different canopy layers for generalist herbivore foraging on sugar maple. *Can.J. For. Res.*, **32** , pp: 379-389.
- 328. Roslin T., Gripenberg J., Salminen J., Karonen M., O'hara R.B., Pihlaja K. et Pulkkinen P., 2006.** Seeing the trees for leaves-Oaks as mosaics for hostspecific moth.Oiks **113**, pp: 106-120.
- 329. Ruhnke H., Schadler M., Klotz S., Matties D., Brandl R., 2009.** Variability in leaf traits, insect herbivory and herbivoreperformance within and among individuals of four broad leaved tree Species. *Basic and applied Ecology*, **10**, pp: 726-736.
- 330. Thomas S.C., Sztaba A.J, Smith S.M., 2010.** Herbivory patterns in mature sugar maple variation with verticalcanopy strata and tree ontogeny. *Ecological Entomology* **35**, pp: 1-8.

- 331. Cangussu J.A. et Zucoloto F.S., 1992.** Nutritional value and selection of different diets by adult *Cerattis capitata* fruit flies. *J. Insect Physiol.*, 53 pp: 155-158.
- 332. Wainhouse, D., 2005.** *Ecological Methods in Forest Pest Management.* Oxford University Press, Oxford, UK.
- 333. Gansner, D.A., Herrick, O.W., Ticehurst, M., 1985.** A method for predicting gypsy moth defoliation from egg mass counts. *North. J. Appl. Forest* 2, 78–79.
- 334. Lysyk, T.J., 1990.** Relationships between spruce budworm (Lepidoptera. Tortricidae) egg mass density and resultant defoliation of balsam fir and white spruce. *Can. Entomol.* 122, 253–262.
- 335. Williams IS 1999.** Slow.growth, high.mortality .a general hypothesis, or is it? *Ecological Entomology* 24, 490–95.
- 336. Carroll, A.L., Quiring, D.T., 1993.** Influence of feeding by *Zeiraphera Canadensis* (Lepidoptera. Tortricidae) on growth of white spruce. larval density–damage and damage–shoot production. *J. Appl. Ecol.* 30, 629–639.
- 337. Parsons, K., Quiring, D., Piene, H., Moreau, G., 2005.** Relationship between balsam fir sawfly density and defoliation in balsam fir. *Forest Ecol. Manage.* 205, 325–331.
- 338. Zamoum M. Martin J.C. et Bensidi A., 2015.** Fecundity of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera. Notodontidae) at the southern edge of its distribution range
- 339. Zovi D., Petruco Toffolo E., De Gol D., Schlyter F. et Battisti A. 2005.** Tree apparency and host location by *Thaumetopoea pityocampa* on *Pinus nigra*. Comm. Meeting Promoth, France, p. 23. In. UE RTD Project .Quality of Life and Management of Living Resources, Global change and pine processionary moth. a new challenge for integrated pest management, Promoth, QLK5.CT.2002.00852, Scientific programme and abstracts, Multifunctional management of forests, Belgodere, Calvi, Corsica, France.
- 340. Tiberi R., Niccoli A., Curini M., Epifano F., Marcotullio M. C. et Rosati O. 1999.** The role of the monoterpene composition in *Pinus* spp. Needles, in host selection by the pine caterpillar, *Thaumetopoea pityocampa*. *Phytoparasitica* 27 (4). 263–272. DOI. 10.1007/BF02981482.
- 341. Hillbur Y., Andersson S., Battisti A., Birgersson G., Cappucci M., Faccoli M., Ostrand F. et Schyter F. 2005.** Host volatile release from *Pinus* spp. and female and male reponse in pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa*. oviposition or habitat cues? Comm. Meeting Promoth, France, p. 20. In. UE RTD Project .Quality of Life and Management of Living Resources, Global change and pine processionary moth. a new challenge for integrated pest management, Promoth, QLK5. CT.2002.00852, Scientific programme and abstracts, Multifunctional management of forests, Belgod`ere, Calvi, Corsica, France.
- 342. Koricheva, J., Larsson, S., and Haukioja, E. (1998).** Insect performance on experimentally stressed woody plants: a meta-analysis. In *Annual review of entomology* 43, p. 195-216.

- 343. Jactel, H., Petit, J., Desprez-Loustau, M.-L., Delzon, S., Piou, D., Battisti, A., and Koricheva, J. (2011).** Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. In *Global Change Biology*.
- 344. Hulme, P.E. 1998.** Post-dispersal seed predation. consequences for plant demography and evolution. In *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* **1**, p. 32-46.
- 345. Khouja M.L. 1997 .***Variabilité géographique du Pin d'Alep en Tunisie. perspectives d'amélioration de la productivité et de la qualité physique du bois.* Université Catholique de Louvain-la-Neuve (Belgique), Thèse de doctorat, 181 p.

ANNEXE B

Fiche d'observation des éclosions et du cycle larvaire de la processionnaire du pin

Conservation des forêts de : Circonscription de
 District de : Lieu dit de : Forêt :
 Superficie : Altitude : Essence attaquée :
 Station d'observation N° : Superficie : Altitude : Exposition :
 Date de plantation : Hauteur des arbres : Densité/ha :
 Date de prélèvement :
 Observation particulière :

N° d'arbre	Pontes		Pré-nids				Observations
	Eclosé	Non éclosés	L1	L2	L3	Total	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
Total							

ANNEXE C

Fiche d'enquête d'infestation de la chenille processionnaire (Pontes et/ou pré-nids)

Conservation des forêts de :Circonscription de.....
 District de :Lieu dit de :Forêt :
 Superficie :Altitude : Essence attaquée :.....
 Station d'observation N° :.....Superficie :.....Altitude :.....Exposition :.....
 Date de plantation :..... Hauteur des arbres :..... Densité/ha :.....
 Date de prélèvement :.....
 Observation particulière :.....

Nbre d'arbre	% infestation <i>a</i>	Nbre d'arbre	% infestation <i>b</i>	Nbre d'arbre	% infestation <i>c</i>	Nbre d'arbre	% infestation <i>d</i>
1		26		51		76	
2		27		52		77	
3		28		53		78	
4		29		54		79	
5		30		55		80	
6		31		56		81	
7		32		57		82	
8		33		58		83	
9		34		59		84	
10		35		60		85	
11		36		61		86	
12		37		62		87	
13		38		63		88	
14		39		64		89	
15		40		65		90	
16		41		66		91	
17		42		67		92	
18		43		68		93	
19		44		69		94	
20		45		70		95	
21		46		71		96	
22		47		72		97	
23		48		73		98	
24		49		74		99	
25		50		75		100	
S/Total							