

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة باتنة 1 - الحاج لخضر - باتنة
UNIVERSITÉ BATNA 1 - EL HADJ LAKHDAR – BATNA –
كلية العلوم البيطرية والعلوم الفلاحية
INSTITUT DES SCIENCES VETERINAIRES ET DES SCIENCES
AGRONOMIQUES
قسم العلوم الفلاحية
DÉPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES



Thèse

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat 3ème cycle (LMD)
En Sciences Agronomiques
Spécialité : Biodiversité, Production et protection des végétaux

Présentée par : MESSAADIA Zineb

THÈME

**Etude des défoliateurs et de leur complexe
parasitaire dans la cédraie de Chélia**

Soutenu le 14/03/2024

Devant le jury composé de :

Président :	M. CHAFAA Smail	Professeur Université Batna 2
Directeur de thèse :	M. BERTELLA Nabil	Professeur Université Batna 1
Examineurs :	Mme. KHERCHOUCHE Dalila	Professeur Université Batna 1
	M. BENHIZIA Toufik	MCA Université Khenchela

Année Universitaire 2023 - 2024

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier le bon Dieu, tout puissant pour m'avoir donné la volonté, la santé et patience pour achever cette étude de recherche.

*J'exprime ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon directeur de thèse Mr **Nabíl BERTÉLLA** Professeur à l'université Batna 1 pour avoir accepté de diriger les travaux de ma recherche, pour ses conseils, sa gentillesse et sa modestie, ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordée pour réaliser ce modeste travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Mme **Naama FRAH** Professeur à l'université Batna 1 pour ses conseils et ses encouragements pour mener à bien ce travail.*

*J'adresse mes vifs remerciements à Mr **CHAFAA Smaíl** Professeur à l'université Batna 2 pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury.*

*Mes respectueux remerciements vont à Mme **KHERCHOUCHE Dalíla** Professeur à l'université Batna 1 et Mr **BENHIZIA Toufik** Maître de conférences (A) à l'université Khenchela pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail et d'avoir accepté de faire partie du jury afin d'enrichir et d'améliorer via leurs commentaires la qualité du présent manuscrit.*

*Je remercie Mr **Salah ABDESSELEM** Directeur du laboratoire d'Amélioration des Productions Agricoles et Protection des Ressources en Zones Arides (LAPAPEZA) Université Batna 1 et tous les membres du laboratoire qui m'ont permis de réaliser une bonne partie expérimentale dans ce laboratoire.*

*Je tiens à remercier les personnels de la conservation des forêts de Batna et tous les forestiers de la circonscription des forêts d'ARRIS, particulièrement, Mr **Naim AYACHI** et Mr **Brahim AROFI** pour se aides tout de long de mon travail sur terrain, je remercier également aux forestiers du Parc National de Belezma.*

*J'exprime ma reconnaissance à Mr **Athmane BRIKI** Directeur de l'École Nationale des forêts pour son aide et sa contribution.*

*Je remercie Mr **Riadh BEGHAMI** maître de conférences à l'Université Batna 1 de m'avoir dirigé et aidé par ses conseils.*

*Une reconnaissance particulière à monsieur Mr **Mohamed ZAMOUM** directeur recherches à l'institut national de recherches forestières à Bainem Alger qui a toujours été disponible pour me faire part de ses connaissances sur la chenille processionnaire du Pin.*

*Les plus profonds remerciements et toute ma gratitude à **MES PARENTS** pour ses précieux conseils, pour ses aides et pour ses encouragements constants à la réalisation de ce travail.*

Mes vifs remerciements seront adressés à mes sœurs et mon frère pour leurs encouragements, leur soutien et leurs motivations.

Je tiens à remercier amplement à toutes mes amies.

Mes remerciements vont enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé à la réalisation de cette étude.

SOMMAIRE

Liste des tableaux

Liste des figures

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
PREMIER CHAPITRE : SYNTHÈSE DES DONNÉES SUR LA PROCESSIONNAIRE DU PIN, <i>THAUMETOPOEA PITYOCAMPA</i> SCHIFF ET SON HÔTE <i>CEDRUS ATLANTICA</i> MANETTI.....	6
1. La processionnaire du pin, <i>Thaumetopoea pityocampa</i> Schiff.....	7
1.1 Introduction	7
1.2 Contexte historique et position systématique	7
1.3 Répartition et propagation.....	9
1.4 Cycle biologique	10
1.4.1 La phase aérienne.....	10
1.4.1.1 Les émergences des adultes.....	10
1.4.1.2 La ponte.....	11
1.4.1.3 Les stades larvaires.....	11
1.4.1.3.1 Premier stade larvaire (L1).....	12
1.4.1.3.2 Deuxième stade larvaire (L2).....	12
1.4.1.3.3 Troisième stade larvaire (L3).....	13
1.4.1.3.4 Quatrième stade larvaire (L4).....	13
1.4.1.3.5 Cinquième stade larvaire (L5).....	14
1.4.2 La phase souterraine.....	14
1.5 Incidence écologique, économique et sanitaire.....	16
1.6 Contrôle des populations de la processionnaire du pin.....	17
1.6.1 La lutte mécanique.....	18
1.6.2 La lutte chimique.....	18
1.6.3 La lutte sylvicole.....	18
1.6.4 La lutte microbiologique.....	18
1.6.5 La lutte par l'utilisation des piègeages.....	19
1.7 Prédateurs et parasites de la processionnaire du pin.....	20
1.8 Les biopesticides botaniques.....	21

2. Le cèdre de l'Atlas <i>Cedrus atlantica</i> Manetti, hôte de la processionnaire du pin.....	22
2.1 Introduction.....	22
2.2 Bref historique.....	22
2.3 Taxonomie.....	22
2.4 Répartition géographique du cèdre de l'Atlas (<i>Cedrus atlantica</i> Manetti).....	23
2.5 Caractéristiques botaniques et dendrologiques du cèdre de l'Atlas.....	25
2.6 Caractéristiques écologiques du cèdre de l'Atlas.....	26
2.6.1 Altitude.....	26
2.6.2 Climat.....	26
2.6.3 Substrat.....	27
2.7 Les facteurs de dégradation du cèdre de l'atlas.....	27
2.8 Dépérissement.....	28
DEUXIEME CHAPITRE : MATERIELS ET METHODES.....	29
1. Présentation de la zone d'étude.....	30
1.1 Situation	30
1.2 Caractéristiques physiques du milieu d'étude.....	31
1.2.1 Géologie.....	31
1.2.2 Pédologie.....	31
1.3 Caractéristiques stationnelles.....	31
1.4 Étude climatique.....	34
1.4.1 Températures.....	34
1.4.1.1 Températures moyennes mensuelles.....	34
1.4.1.2 Amplitude thermique annuelle.....	36
1.4.2 Pluviométrie.....	36
1.4.2.1 Précipitations.....	36
1.4.2.2 Précipitations moyennes mensuelles.....	36
1.5.2.3 Régime pluviométrique saisonnier.....	38
1.5.3 La neige.....	38
1.5.4 La gelée.....	38
1.5.5 Autres facteurs climatiques.....	38
1.5.5.1 Le vent.....	38

1.5.5.1.1 Les vents sud- ouest	38
1.5.5.1.2 Les vents nord-ouest	39
1.4.2.3 L'humidité de l'air.....	39
1.5.6 Synthèse climatique.....	39
1.5.6.1 Diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gausсен.....	39
Conclusion.....	40
2. Méthodologie adoptée.....	41
2.1 Echantillonnage et collecte des pontes.....	41
2.2 Étude des paramètres morphométriques de matériel biologique.....	42
2.3 Dénombrement des catégories des œufs.....	43
2.4 La fécondité réelle.....	44
2.5 Taux d'éclosion.....	44
2.6 Taux de parasitisme.....	45
2.7 Taus d'œufs avortés.....	45
2.8 Contrôle des émergences des principaux parasitoïdes.....	45
2.9 Identification des parasitoïdes.....	46
2.10 Etude de la dynamique de parasitisme.....	47
2.11 Exploitation des résultats par les analyses statistiques.....	48
2.11.1 Analyse descriptive.....	48
2.11.2 Distribution fréquentielle.....	48
2.11.3 Régression linéaire.....	48
2.11.4 Analyse de variance.....	49
2.11.5 Analyse croisée.....	49
TROISIEME CHAPITRE : RESULTATS.....	50
1. Analyse du matériel biologique.....	51
1.1 Analyses biométriques des pontes.....	51
1.2 Comparaison planifiée pour les longueurs de pontes.....	55
1.3 Comparaison planifiée pour les diamètres de pontes.....	55
1.4 Analyse fréquentielle des longueurs des pontes.....	56
1.5 Analyse fréquentielle des diamètres des pontes.....	57
2. Analyse des effectifs des œufs.....	59
2.1 Comparaison planifiée des effectifs des oeufs.....	60
2.2 Analyse fréquentielle des effectifs des œufs.....	61
3. Relation entre la biométrie des pontes et le nombre des œufs.....	63

4. Analyse croisée entre les longueurs des pontes et le nombre d'œufs.....	64
5. Analyse des catégories d'œufs.....	69
6. Comparaison des diverses catégories d'œufs.....	70
7. Les parasitoïdes embryonnaires de la processionnaire du pin et l'impact du parasitisme.....	73
8. Analyse des parasitoïdes oophages et leur importance.....	75
8.1 Fréquence de présence des parasitoïdes en 2017.....	76
8.2 Fréquence de présence des parasitoïdes en 2018 et 2019.....	77
9. Chronologie des émergences des parasitoïdes actifs au niveau de la cédraie de Chélia.....	83
9.1 Émergence de <i>Baryscapus servadeii</i>	83
9.2 Émergence de <i>Ooencyrtus pityocampae</i>	83
9.3 Émergence de <i>Trichogramma embryophagum</i>	84
10. Étude de la dynamique du parasitisme.....	85
10.1 Répartition du parasitisme sur la surface des pontes.....	85
10.2 Parties convoitées par les parasitoïdes.....	85
10.2.1 Trous de sorties centraux	85
10.2.2 Trous de sorties latéraux.....	86
11. Expansion de l'aire de réparation.....	87
QUATRIEME CHAPITRE : DISCUSSIONS.....	88
1. Analyses des pontes de <i>T. pityocampa</i> sur le cèdre de l'Atlas.....	89
2. Dénombrement des œufs	91
3. Fécondité et facteurs de mortalité des embryons	93
4. Richesse spécifique des parasitoïdes embryonnaires.....	95
5. Facteurs de régulation écologique et impact du parasitisme.....	97
6. Dynamique des émergences des parasitoïdes des œufs.....	99
7. Distribution des parasitoïdes oophages sur les pontes.....	99
8. Progression et stratégie d'occupation.....	100
CONCLUSIONS GENERALES.....	103
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	109

الملخص

RÉSUMÉ

ABSTRACT

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Récapitulatif des principales espèces du genre <i>Thaumetopoea</i>	8
Tableau 2 : Quelques caractéristiques morphologiques des différentes écophases de <i>T. pityocampa</i>	15
Tableau 3 : Les ennemis naturels de la processionnaire du pin.....	21
Tableau 4 : Répartition des cédraies Algériennes.....	23
Tableau 5 : La répartition du cèdre dans les Aurès.....	24
Tableau 6 : Caractéristiques des sites prospectés.....	31
Tableau 7 : Moyenne mensuelle des températures (°C) dans les stations de Batna et de Khenchela.....	35
Tableau 8 : Indice de continentalité du Chéchia d'après les deux stations de référence.....	36
Tableau 9 : Précipitation moyenne mensuelle (mm) durant les deux périodes de référence.....	37
Tableau 10 : Analyse descriptive des pontes de la processionnaire du pin.....	51
Tableau 11 : Anova des longueurs des pontes.....	52
Tableau 12 : Anova des diamètres des pontes.....	54
Tableau 13 : Test des étendues multiples pour les longueurs de pontes.....	55
Tableau 14 : Test des étendues multiples pour les diamètres de pontes.....	55
Tableau 15 : Analyse descriptive du nombre des œufs.....	59
Tableau 16 : Test des étendues multiples pour l'effectif des œufs.....	60
Tableau 17 : Analyse fréquentielle des effectifs des œufs.....	61
Tableau 18 : Analyse descriptive des catégories d'œufs examinées.....	69
Tableau 19 : ANOVA pour les œufs parasités.....	72
Tableau 20 : Test de signification par station pour les œufs parasités.....	73
Tableau 21 : Les espèces oophages de la processionnaire du pin et leur impact.....	74
Tableau 22 : Fréquence des espèces oophages de la processionnaire du pin répertoriées en 2017.....	76
Tableau 23 : Fréquence des espèces oophages de la processionnaire du pin répertoriées en 2018 et 2019.....	77
Tableau 24 : Test de significativité de l'espèce <i>Baryscapus servadeii</i>	78
Tableau 25 : Test LSD de l'espèce <i>Baryscapus servadeii</i>	79
Tableau 26 : Test de significativité de l'espèce <i>Ooencyrtus pityocampae</i>	80
Tableau 27 : Test LSD de l'espèce <i>Ooencyrtus pityocampae</i>	81
Tableau 28 : Test de significativité de l'espèce <i>Trichogramma embryophagum</i>	81
Tableau 29 : Test LSD de l'espèce <i>Trichogramma embryophagum</i>	82

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Distribution géographique de la processionnaire du pin dans le monde	9
Figure 2 : Répartition de la processionnaire du pin en Algérie par rapport à la distribution des essences résineuses.....	10
Figure 3 : Ponte de la processionnaire du pin sur le cèdre de l'Atlas.....	11
Figure 4 : Les 5 stades larvaires de la processionnaire du pin	12
Figure 5 : Pré-nids des premiers stades larvaires de la processionnaire du pin sur le cèdre de l'Atlas.....	12
Figure 6 : Nid d'hiver de la processionnaire du pin sur le cèdre de l'Atlas.....	13
Figure 7 : Procession de nymphose.....	14
Figure 8 : Atteinte cutanée de poil de chenille processionnaire chez les humains	17
Figure 9 : Lésion langue et babines de chien.....	17
Figure 10 : Traitement microbiologique bactériologique avec le Bt par hélicoptère contre <i>Thaumetopoea pityocampa</i> dans les reboisements du barrage vert	19
Figure 11 : Ecopiege à chenilles et piégeage à phéromone des papillons mâles de Processionnaire du pin.....	19
Figure 12 : la répartition de <i>Cedrus atlantica</i> dans le monde.....	23
Figure 13 : la répartition de <i>Cedrus atlantica</i> en Algérie.....	24
Figure 14 : Photo montrant un aspect de sujet de cèdre de l'Atlas, cédraie de Chélia.....	25
Figure 15 : Cycle de reproduction du cèdre de l'Atlas.....	26
Figure 16 : Situation géographique de la cédraie de Chélia.....	30
Figure 17 : Photo montrant vue générale de la station 1	32
Figure 18 : Photo montrant vue générale de la station 2.....	32
Figure 19 : Photo montrant vue générale de la station 3.....	33
Figure 20 : Photo montrant vue générale de la station 4.....	33
Figure 21 : Variation des moyennes des températures mensuelles pour la période 1985-2018 à Batna et pour la période 1983-2017 à Khenchela.....	35
Figure 22 : Variation des moyennes des précipitations mensuelles pour la période 1985-2018 à Batna et pour la période 1983-2017 à Khenchela.....	37
Figure 23 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (Batna : 1985-2018).....	40
Figure 24 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (Khenchela :1983-2017).....	40
Figure 25 : Récolte des pontes de <i>T.pityocampa</i> à Chélia.....	42

Figure 26 : Biométrie des pontes à l'aide d'un pied à coulisse électronique.....	43
Figure 27 : Pontes de la processionnaire du pin conservées dans des tubes en verre.....	43
Figure 28 : Photos montrant les catégories d'œufs de la processionnaire du pin	44
Figure 29 : Ponte parasitée.....	45
Figure 30 : Photos représentent les parasitoïdes oophages actifs de la processionnaire du pin..	46
Figure 31 : Photos montrant les trous d'émergence des parasitoïdes oophages.....	47
Figure 32 : distribution des parasitoïdes dans les différents secteurs des oothèques de la processionnaire du pin.....	47
Figure 33 : Comparaison des moyennes de longueurs des pontes dans les quatre stations.....	53
Figure 34 : Comparaison des moyennes de diamètre des pontes dans les quatre stations.....	54
Figure 35 : Catégories des longueurs des pontes récoltées dans les sites prospectés.....	56
Figure 36 : Catégories des largeurs des pontes récoltées dans les sites prospectés.....	58
Figure 37 : Comparaison des effectifs moyens des œufs dans les différentes zones d'étude....	60
Figure 38 : Relation entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs au niveau du site 1.....	63
Figure 39 : Relation entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs au niveau du site 2.....	63
Figure 40 : Relation entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs au niveau du site 3.....	64
Figure 41 : Relation entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs au niveau du site 4.....	64
Figure 42 : Distribution du nombre d'œufs en fonction des longueurs des pontes dans le premier site.....	65
Figure 43 : Distribution du nombre d'œufs en fonction des longueurs des pontes dans le second site.....	66
Figure 44 : Distribution du nombre d'œufs en fonction des longueurs des pontes dans le troisième site.....	67
Figure 45 : Distribution du nombre d'œufs en fonction des longueurs des pontes dans le dernier site.....	68
Figure 46 : Variation des moyennes des diverses catégories des œufs des pontes de la processionnaire du pin sur les différentes stations étudiées en 2017.....	70
Figure 47 : Variation des moyennes des diverses catégories des œufs des pontes de la processionnaire du pin sur les différentes stations étudiées en 2018.....	71

Figure 48 : Comparaison des effectifs moyens des œufs parasités dans les sites prospectés.....	72
Figure 49 : Taux d'émergence des parasitoïdes dans les quatre sites en 2017.....	76
Figure 50 : Taux d'émergence des parasitoïdes dans les quatre sites en 2018.....	77
Figure 51 : Taux d'émergence des parasitoïdes dans les deux sites en 2019.....	78
Figure 52 : Comparaison pour le parasitoïde oophage <i>Baryscapus servadeii</i> les différentes zones d'étude.	79
Figure 53 : Comparaison pour le parasitoïde oophage <i>Ooencyrtus pityocampae</i> les différentes zones d'étude.	80
Figure 54 : Comparaison pour le parasitoïde oophage <i>Trichogramma embryophagum</i> les différentes zones d'étude.	82
Figure 55 : Représentation du cumul des émergences de <i>Baryscapus servadeii</i>	83
Figure 56 : Représentation du cumul des émergences de l' <i>Ooencyrtus pityocampae</i>	84
Figure 57 : Dynamique d'émergence de <i>Trichogramma embryophagum</i> au niveau de la cédraie de Chélia.....	84
Figure 58 : Répartition des parasitoïdes sur la surface de la ponte.....	85
Figure 59 : Représentation sectorielle de trous centraux des parasitoïdes par compartiment de ponte de la processionnaire du pin.....	86
Figure 60 : Représentation sectorielle de trous latéraux des parasitoïdes par compartiment de ponte de la processionnaire du pin.....	86
Figure 61 : Degré d'infestation en fonction d'exposition sur l'arbre.....	87

INTRODUCTION GÉNÉRALE



INTRODUCTION

Le changement climatique est l'une des plus grandes menaces, à laquelle fait face aujourd'hui la planète. De nombreux modèles ont été réalisés pour évaluer les impacts de ce phénomène sur la biodiversité et sur la structure des populations animales et végétales. Ainsi, il a été constaté que les conséquences de ce changement climatique deviennent de plus en plus complexes et difficiles à gérer ; de multiples événements climatiques dangereux se produisent simultanément et interagissent entre eux, avec des effets négatifs sur la productivité et le fonctionnement primaire des écosystèmes forestiers en raison des contraintes abiotiques telles que les températures, les tempêtes, les sécheresses, les feux et les biotiques notamment les dégâts d'insectes ravageurs (Logan *et al.*, 2003 ; Granier *et al.*, 2007 ; Sohngen, 2008 ; Netherer et Scholf, 2010).

Ces insectes, à l'image de la processionnaire du pin, semblent principalement favorisés par les changements climatiques et devraient affecter, de manière significative, la croissance et la survie des arbres. Plusieurs études ont démontré, d'ailleurs, la relation entre la modification du climat et l'évolution des aires de répartition chez la processionnaire du pin (Battisti *et al.*, 2005 ; Kimoto *et al.*, 2006).

La chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff) est le principal ravageur défoliateur des forêts résineuses dans tout le bassin méditerranéen (Huchon et Démolin, 1970 ; Robinet *et al.*, 2011). Cet insecte se nourrit des aiguilles de pins et de cèdres, et entraîne des défoliations qui se traduisent essentiellement par des pertes de croissance et une diminution du pouvoir photosynthétique (Kanat *et al.*, 2005 ; Allen *et al.*, 2010). Les arbres affaiblis par la défoliation deviennent plus sensibles aux attaques des ravageurs secondaires et des pathogènes (Hódar *et al.*, 2003 ; Carus, 2004 ; Battisti *et al.*, 2005 ; Robinet *et al.*, 2007 ; Jacquet *et al.*, 2012).

La défoliation massive due à l'activité alimentaire s'intensifie à partir du mois de janvier jusqu'en mars lorsque les larves sont aux quatrièmes et cinquièmes stades, en raison de la reprise d'activité métabolique des chenilles. Les dégâts deviennent alors plus importants aussi bien sur le plan économique qu'écologique.

Le cycle de vie de l'insecte s'effectue en deux phases, l'une aérienne durant la période allant du début de l'automne jusqu'au début du printemps (Oviposition et évolution larvaire en cinq stades) et l'autre souterraine durant le printemps jusqu'en été (nymphe et formation de l'adulte) (Huchon et Démolin, 1970).

Le cycle évolutif de la processionnaire du pin est généralement annuel mais peut s'étendre sur plusieurs années en fonction de la durée de la diapause nymphale et selon les conditions écologiques du milieu, ce qui montre une forte variabilité de la phénologie de l'espèce en fonction de la latitude et de l'altitude (Démolin, 1974).

Cet insecte ravageur s'attaque préférentiellement au genre *Pinus* mais également à d'autres conifères tels que les cèdres et provoque des fortes défoliations qui peuvent aller jusqu'à plus de 90% des aiguilles sur un arbre (Démolin, 1969b ; Robinet *et al.*, 2007).

En Algérie, la processionnaire du pin engendre périodiquement des pertes environnementales considérables sur l'ensemble des forêts du pays. (Zamoum *et al.*, 2015).

A noter ici que la forêt algérienne représente un élément essentiel de l'équilibre climatique, écologique et socio-économique des différentes régions du pays, couvrant une superficie de 4,15 millions d'hectares, soit un taux de boisement de 16,4% pour le Nord et de 1,7 % seulement pour les régions sahariennes arides. En réalité, la forêt ne représente que 1,3 million d'hectares et le reste étant constitué de maquis. Les cédraies y représentent une grande richesse biologique totalisant environ une superficie de 30.000 ha soit un taux de 1, 3% de la superficie forestière du pays (Terrab *et al.*, 2008). La cédraie de Chélia, par exemple, est constituée de peuplements du cèdre qui s'étendent sur de vastes surfaces.

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) est une espèce originaire d'Afrique du Nord, il occupe les sommets des hautes montagnes (Benabid, 1994 ; M'hirit, 1999 ; Terrab *et al.*, 2008). Cette essence forestière est l'une des espèces - économiquement et écologiquement - les plus importantes de la montagne méditerranéenne (Terrab *et al.*, 2006).

Dans son aire naturelle, ce type de cèdre connaît aujourd'hui une situation sanitaire très préoccupante et ce, depuis l'apparition des premiers signes de dépérissement remontant à 1982 particulièrement dans la région des Aurès (Bentouati, 2008). Ce phénomène nuisible s'est étendu, par la suite, pour toucher progressivement des superficies conséquentes à partir de 2003 (dépérissement massif de l'été 2003), et qui prend de plus en plus d'ampleur avec les années, générant ainsi une dégradation de plus en plus intense.

Ces formations forestières sont aujourd'hui fortement menacées par la dégradation d'origine anthropique et par l'impact des changements climatiques (Mouna, 2013). Ces facteurs sont conjugués aux attaques de différents insectes ravageurs notamment les défoliateurs telles que les chenilles processionnaires (*THAUMETOPOEIDAE*) (Bentouati et Bariteau, 2006).

En Algérie, deux espèces de ces processionnaires affectent le cèdre de l'Atlas : la processionnaire d'hiver *Thaumetopaea pityocampa* qui s'attaque au cèdre et à toutes les espèces

de pin et la processionnaire d'été *Thaumetopoea bonjeani* qui est spécifique au cèdre de l'Atlas et qui diffère de *T. pityocampa* par son développement larvaire au printemps et au début d'été et par l'absence de nids d'hiver (El Yousfi, 1989 ; Tsankov *et al.*, 1995 ; Rahim *et al.*, 2016). La processionnaire du pin *Thaumetopaea pityocampa* présente des culminations des populations de chenilles périodiques dans la cédraie de Chélia, provoquant des dégâts considérables dans la forêt et facilitant ainsi l'installation des autres ravageurs secondaires.

Les défoliations engendrées par ces chenilles provoquent des pertes d'accroissement des arbres fortement défeuillés et occasionnent des dégâts importants aux jeunes plantations et à la régénération naturelle des forêts. Graf et M'zibri (1994) ont estimé les pertes de productivité du cèdre dues aux défoliations de *T. pityocampa* à 43%.

L'aire de répartition de ce ravageur forestier s'étend sur une grande partie du territoire algérien et atteint actuellement sa limite Nord du pays ainsi qu'au niveau du Barrage Vert au sud (Zamoum, 1998). Cette évolution territoriale semble principalement liée au réchauffement climatique qui, en faisant augmenter les températures hivernales, permet un meilleur taux de survie des chenilles (Hódar *et al.*, 2003 ; Bouhot-Delduc, 2005). L'espèce s'est même étendue vers diverses altitudes durant ces dernières années (Battisti *et al.*, 2005).

Les conséquences écologiques et sanitaires de la présence de cette chenille processionnaire du pin justifient ainsi la mise en place de divers moyens de lutte, particulièrement la lutte physiologique qui cible la processionnaire du pin à l'âge adulte, mais aussi la lutte chimique et la lutte microbiologique à base de *Bacillus thuringiensis* qui visent à détruire les formes larvaires dans leur stade le plus destructeur (Chenchouni *et al.*, 2010 ; Rivière, 2011). Mais malgré l'efficacité de ces techniques de lutte, il à craindre que ce genre d'interventions finissent par perturber le contexte environnemental de la forêt en général.

La processionnaire du pin subit à toutes les écophases de son cycle de développement la pression des nombreux ennemis naturels : les prédateurs, les pathogènes et les parasitoïdes (Masutti et Battisti, 1990, Battisti *et al.*, 2000). Ces derniers jouent un rôle très important dans la régulation des populations d'insectes phyllophages (Lewis *et al.*, 1998). Il existe trois types de parasitoïdes chez *T. pityocampa*, ceux qui s'attaquent aux œufs, ceux qui s'attaquent aux pupes et ceux qui s'attaquent aux chenilles. Les parasitoïdes oophages sont plus fréquemment utilisés pour contrôler efficacement ce ravageur dans le cadre de la lutte biologique respectueuse de l'environnement (Zovi *et al.*, 2006 ; Jactel *et al.*, 2015).

Les deux principaux parasitoïdes de la processionnaire du pin sont le spécialiste *Baryscapus servadeii* Domenichini (Chalcidien : Eulophidae) et le généraliste *Ooencyrtus*

pityocampae Mercet (Chalcidien : Encyrtidae). Mais l'efficacité parasitaire a été notée chez *Trichogramma embryophagum* dans les diverses cédraies d'Algérie (Zamoum *et al.*, 2017).

La spécificité climatique, l'incidence des changements climatiques, la structure et le statut de la forêt et la position géographique sont à même de modifier la structure et les interactions des communautés d'espèces entomophages mais aussi les fluctuations des populations d'espèces parasitoïdes spécialistes et généralistes (Gilman *et al.*, 2010).

Plusieurs travaux ont été réalisés en Algérie sur plusieurs aspects à savoir la biologie, l'écologie et les dégâts forestiers Bertella (1987), Zamoum (1998), Zamoum et Démolin (2005), Sebti (2011), Sbabdji (2015) et Hezil (2019). De nombreuses autres recherches ont été effectuées aussi sur les parasitoïdes embryonnaires de ce ravageur Tsankov *et al.* (1995), Bouchou (2015), Zamoum *et al.* (2017) et Ayache *et al.* (2021).

Dans cette lignée, notre travail de recherche tend à fournir une meilleure connaissance sur l'expansion de la processionnaire du pin dans les peuplements de cèdre dans le massif des Aurès afin de prédire les effets de la défoliation et ses conséquences sur les espèces autochtones et l'écosystème forestier. Nous y étudierons également les paramètres écologiques et biologiques des pontes de *T. pityocampa* sur le cèdre de l'Atlas au niveau de la cédraie de Chélia.

La présente thèse se veut donc une étude pour tenter d'identifier les parasitoïdes oophages de la processionnaire du pin. Elle aborde les différents aspects concernant la distribution des parasitoïdes, la dynamique de leur émergence et leur impact sur les pontes. Des études assez détaillées des parasitoïdes embryonnaires de la processionnaire du pin permettent d'envisager la mise au point d'interventions spécifiques contre ce défoliateur, en particulier par une éventuelle utilisation de ces parasitoïdes par le biais d'une lutte biologique respectueuse de l'environnement et de la biodiversité, et qui est à même d'atténuer l'intensité et de réduire la fréquence de la pullulation de ce ravageur dans son aire naturelle.

Le premier volet de l'étude est consacré à une synthèse de réflexion sur la processionnaire du pin et sur sa plante hôte le cèdre de l'Atlas, laquelle nous permettra d'étudier la bio-écologie et ses répercussions environnementales, économiques et sanitaires. Le second volet traite, lui, des sites prospectés, du matériel utilisé et des méthodes adoptées. Les résultats seront analysés dans le troisième volet et feront l'objet de discussion. Quant au dernier volet, il sera réservé à la présentation des interprétations et des conclusions avec, en sus, des perspectives et des recommandations que nous proposerons à l'issue de ce travail de recherche.

PREMIER CHAPITRE : SYNTHÈSE
DES DONNÉES SUR LA
PROCESSIONNAIRE DU PIN,
THAUMETOPOEA PITYOCAMPA
SCHIFF ET SON HÔTE CÉDRUS
ATLANTICA MANETTI.



PREMIER CHAPITRE

SYNTHÈSE DES DONNÉES SUR LA PROCESSIONNAIRE DU PIN, *THAUMETOPOEA PITYOCAMPA* SCHIFF ET SON HÔTE *CEDRUS ATLANTICA* MANETTI.

1. La processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Schiff

1.1 Introduction :

La processionnaire du pin est un des insectes défoliateurs plus destructeurs de pin et cèdre dans tout le bassin méditerranéen, causant de nombreux problèmes sylvicoles et sanitaires. Cette espèce est la forme larvaire d'un papillon nocturne à vie très brève caractérisée, par une intercommunication tactile, des déplacements collectifs et la construction d'un habitat appelé nid d'hiver. Cette chenille a tendu de façon considérable son aire de répartition. Dans les dernières décennies, la processionnaire du pin a montré une progression rapide en altitude et en latitude directement liée aux changements climatiques. Elle provoque, à l'heure actuelle, les inquiétudes des forestiers, surtout lorsqu'elle sévit sur de jeunes peuplements incapables de résister à une défoliation presque complète, ainsi que celles des propriétaires ou gérants d'espaces verts dans lesquels l'aspect des arbres peut devenir lamentable. A cet aspect d'ordre esthétique s'ajoute un inconvénient d'ordre sanitaire par suite du caractère urticant des chenilles.

1.2 Contexte historique et position systématique :

Thaumetopoea pityocampa (*pityocampa* : *camp* = chenille, *pityo* = pin et *thaumetopoea* : *thaumeto* = vénérer, *poea* = herbe) d'où son nom la chenille processionnaire du pin, a été décrite pour la première fois par Denis et Schiffermüller en 1775 dans le genre *Bombyx*. Elle a par la suite été reclassée dans le genre *Thaumetopoea* en 1820 par Hubner. En 1829, toutes les espèces du genre *Thaumetopoea* étaient réunies dans le genre *Cnethocampa* établi par Stephens, et qu'il a inclus dans la famille des *Notodontidae*. Le genre *Thaumetopoea*, représenté par 15 espèces de processionnaires phytophages dont 9 sont inféodées aux résineux qui se répartissent en Europe, Afrique du nord et Asie mineure (Basso *et al.*, 2016). Ces espèces peuvent coexister, ce qui rend l'identification difficile malgré les différences morphologiques particulièrement la couleur des ailes, et les différences biologiques concernant la date d'éclosion et les plantes hôtes (Démolin, 1969b). Le développement larvaire des processionnaires est donc hivernal ou printanier à estival selon l'espèce. Le récapitulatif des principales espèces du genre *Thaumetopoea* selon les plantes hôtes, le développement larvaire et leur distribution géographique est présenté dans le tableau 1.

Tableau 1 : Récapitulatif des principales espèces du genre *Thaumetopoea* (Basso *et al.*, 2016 ; Battisti *et al.*, 2015).

Taxon	Auteur	Plantes hôtes	Développement larvaire	Distribution
<i>T. processionea</i>	(Linnaeus, 1758)	Quercus spp.	Printanier à estival	Europe, Moyen-Orient
<i>T. pityocampa</i>	(Denis & Schiffermüllerl, 1775)	Cedrus spp., Pinus spp.	Hivernal	Afrique du Nord, Moyen-Orient, Europe centrale
<i>T. herculeana</i>	(Rambur, 1837)	Cistus spp., Erodium spp., Helianthemum spp.	Printanier à estival	Europe, Moyen-Orient, Inde
<i>T. solitaria</i>	(Freyer, 1838)	Pistacia spp.	Printanier à estival	Europe, Moyen-Orient
<i>T. bonjeani</i>	Powell, 1922	Cedrus atlantica	Printanier à estival	Nord-ouest d'Afrique
<i>T. wilkinsoni</i>	Tams, 1925	Cedrus libanis Pinus spp.	Hivernal	Moyen-Orient

En Algérie ne sont présentes que deux espèces de processionnaires ; la processionnaire de pin *Thaumetopoea pityocampa* à développement larvaire hivernal, qui s'attaque à toutes les espèces de genre *Pinus* et à *Cedrus atlantica* et la processionnaire du cèdre *Thaumetopoea bonjeani*, qui est spécifique au cèdre de l'Atlas et diffère de *T. pityocampa* par son développement larvaire au printemps et le début de l'été et par l'absence de nids d'hiver (Tsankov *et al.*, 1995 ; Mouna, 2013). *T. pityocampa* a été signalée pour la première fois dans la cédraie du Belezma en 1982 par la conservation des forêts de Batna (Gachi, 1994). Toutefois, il est difficile de distinguer les deux espèces *T. bonjeani* et *T. pityocampa* du fait qu'elles peuvent vivre sympatricquement sur le cèdre de l'Atlas même si la spécification de la plante hôte demeure un critère déterminant dans la spécialisation de ces phytophages (Démolin *et al.*, 1994).

La chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff appartient à la systématique suivante :

Règne *Animalia*.

Embranchement *Arthropoda*.

Classe *Insecta*.

Super-ordre *Endopterygota*.

Ordre *Lepidoptera*.

Famille *Notodontidae*.

Sous-famille *Thaumetopoeinae*.

Genre *Thaumetopoea*.

Espèce *Thaumetopoea pityocampa*. (Denis & Schiffermüller).

1.3 Répartition et propagation

La processionnaire du pin est un insecte d'origine méditerranéenne, s'étend dans tout le bassin méditerranéen mis à part l'Égypte (Démolin et Millet, 1981).

Elle est retrouvée en Europe centrale et méridionale, en Afrique du nord et s'observe dans l'ensemble des forêts résineuses de cèdre et de pin (Fig.1).

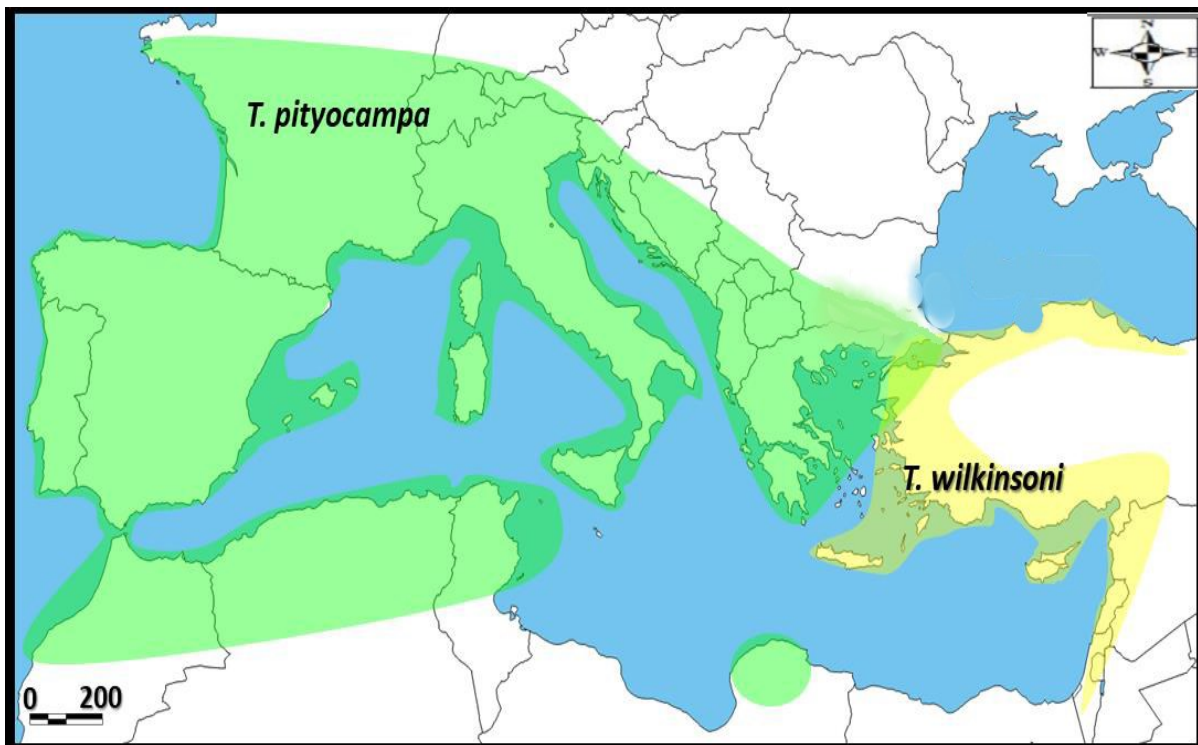


Figure 1 : Distribution géographique de la processionnaire du pin dans le monde (Yüksel *et al.*, 2019).

La répartition géographique de *Thaumetopoea pityocampa* dépend de nombreux facteurs écologiques : la température, l'ensoleillement, la photopériode, la latitude et l'altitude (Battisti *et al.*, 2005 ; Buffo *et al.*, 2007 ; Huchon et Démolin, 1970).

En Algérie, la prolifération de la chenille processionnaire du pin a été facilitée par l'accroissement des reboisements de pin d'Alep (les reboisements du barrage vert en monoculture au cours de la période de 1980 à 1984) plus de 290 000 ha sont infestés dont 113 893 ha fortement attaqués, on retrouve dans les régions accidentées (139 475 ha) et même dans les régions non accidentées (133 749 ha).

La figure 2, représente la répartition géographique de la processionnaire du pin en Algérie.

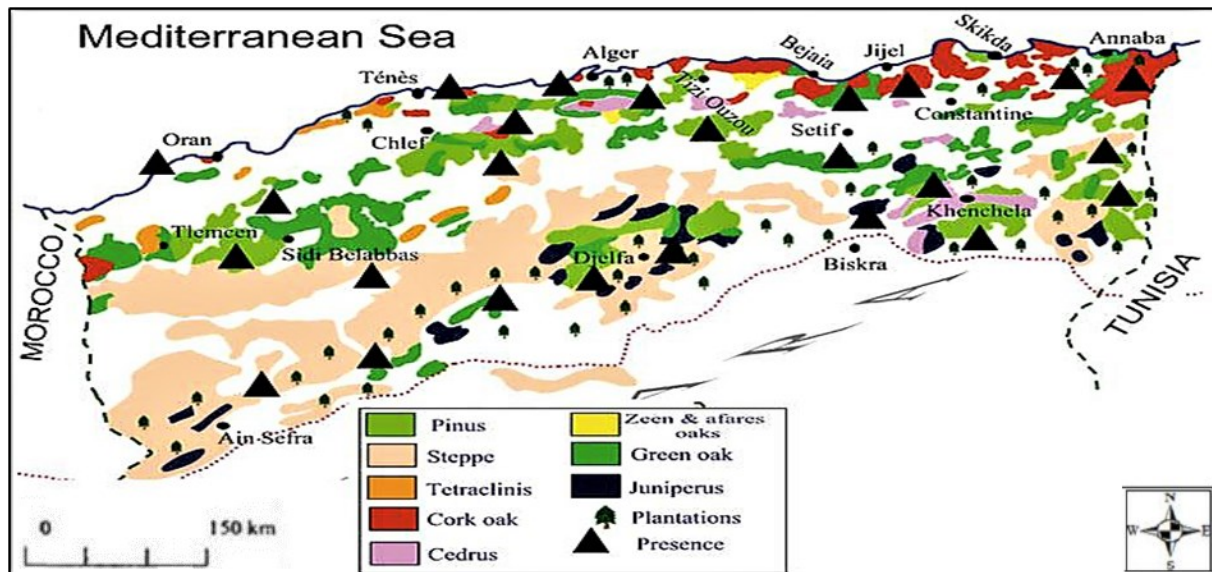


Figure 2 : Répartition de la processionnaire du pin en Algérie par rapport à la distribution des essences résineuses (El Mokhefi *et al.*, 2015).

1.4 Cycle biologique

Le cycle de développement de *Thaumetopoea pityocampa* est habituellement annuel (une espèce monovoltine), mais il peut se prolonger jusqu'à cinq ans (cycles pluriannuels) suivant l'intensité de la diapause et selon les conditions environnementales : l'ensoleillement et la température, donc la latitude et l'altitude, peuvent extrêmement influencer le déclenchement des divers stades (Pimentel, 2004 ; Rivière, 2011). Le cycle comprend deux phases distinctes s'effectue à deux strates différentes, une phase aérienne qui caractérise le développement larvaire et les vols et une phase souterraine qui présente par la fin d'évolution larvaire dite : pré-nymphose et nymphose (Huchon et Démolin, 1970 ; Roques, 2014).

1.4.1 La phase aérienne

La phase aérienne dure de cinq à huit mois et se déroule en plusieurs étapes, de l'émergence des papillons jusqu'à l'enfouissement précédant la nymphose (Rivière, 2011).

1.4.1.1 Les émergences des adultes

Les adultes de la processionnaire du pin sont des papillons nocturnes, ils émergent du sol pendant la période estivale de juillet à août au coucher du soleil. À la tombée de la nuit, les femelles vont commencer à libérer une phéromone sexuelle appelée la pityolure afin d'attirer les mâles pour l'accouplement (Guerrero *et al.*, 1981). Quelques heures après l'accouplement, le mâle meurt, alors que la femelle fécondée se dirige au vol à la recherche d'un arbre pour pondre ses œufs (Paiva *et al.*, 2011 ; Démolin, 1969b). Les adultes ont une durée de vie limitée de 24 à 48 heures, ils sont des papillons éphémères (Dajoz, 1998).

1.4.1.2 La ponte

La ponte s'effectue le long d'une ou deux aiguilles à l'extrémité d'un rameau en forme d'un manchon cylindrique de 4 à 6 centimètres contenant au nombre de 70 à 300 œufs par femelle (Dajoz, 1998). Les œufs sont recouverts par des écailles protectrices de couleur beige clair ou brune noirâtre provenant de l'extrémité de l'abdomen maternel de la femelle (Démolin, 1969a) (Fig. 3). Par conséquent, la base des écailles recouvrant les œufs est dirigée vers la base des aiguilles, ce qui protège la ponte de la rosée et de la pluie.

Le premier critère de ponte est le diamètre des aiguilles avec une préférence particulière pour les aiguilles qui émettent des substances volatiles comme limonène (Tiberi *et al.*, 1999). Plusieurs raisons, notamment la qualité et la densité des aiguilles, peuvent interférer et entraîner la malformation des pontes (Démolin, 1969a). Les œufs éclosent de 30 à 45 jours après la ponte, le plus souvent au mois de septembre, lorsque la somme des températures journalières moyennes atteint entre 780 et 850°C (Martin, 2005).



Figure 3 : Ponte de la processionnaire du pin sur le cèdre de l'Atlas (Originale, 2018).

1.4.1.3 Les stades larvaires

Le développement larvaire comporte cinq stades (L1 à L5) (Fig. 4), au cours desquels les chenilles d'une même ponte resteront groupées, forme grégaire hivernale pour assurer leur survie. La durée des stades larvaires dépend du climat, plus la durée d'hiver sera longue, plus la vitesse d'évolution larvaire est diminuée en particulier au quatrième stade. A chaque stade larvaire, chaque chenille entre dans une période de mue pour passer d'un stade larvaire à un autre pendant laquelle elle cesse de se nourrir (Bonnet *et al.*, 2008). L'évolution larvaire de la chenille processionnaire du pin peut se diviser en 2 périodes distinctes : une période ambulatoire allant de l'éclosion jusqu'aux premiers froids ; et une période "du nid d'hiver" s'étale de la construction du nid jusqu'à la procession de nymphose.



Figure 4 : Les 5 stades larvaires de la processionnaire du pin (Martin, 2005, Photo Démolin).

1.4.1.3.1 Premier stade larvaire (L1)

Les chenilles vont tisser un réseau de soie très léger autour de la ponte, qu'on appelle un « pré-nid » qui va les abriter pendant les premiers stades larvaires (Dajoz, 1998) (Fig. 5).

Elles commencent à se déplacer en procession préférentiellement durant la nuit pour se nourrir pouvant aussi dans un premier temps dévorer les aiguilles à proximité, puis se dirigent vers les branches quand la nourriture vient à manquer. Elles tissent des fils de soie depuis leur sortie du pré-nid pour retrouver facilement celui-ci (Dajoz, 1998). La colonie de processionnaires effectue des migrations successives pour assurer une meilleure alimentation ou lorsque les températures nocturnes automnales sont trop basses. La durée moyenne du premier stade s'est échelonnée sur 12 jours.



Figure 5 : Pré-nids des premiers stades larvaires de la processionnaire du pin sur le cèdre de l'Atlas (Originale, 2019).

1.4.1.3.2 Deuxième stade larvaire (L2)

Les chenilles du deuxième stade se caractérisent par l'augmentation progressive du nombre de soies blanches et la présence de longues soies blanches sur toutes les plaques latérales de tous les segments. Elles se nourrissent aussi des jeunes feuilles venant de débourrer. Elles

s'éloignent progressivement de leur lieu d'éclosion, en abandonnant les légers nids temporaires (pré-nid) qu'elles ont tissés. Ce stade dure en moyenne 18 jours (Démolin, 1969a).

1.4.1.3.3 Troisième stade larvaire (L3)

Au troisième stade, les chenilles deviennent urticantes acquérant des structures cuticulaires appelées « miroirs » et qui sont garnies des poils urticants. Les touffes de poils urticants de couleur rougeâtre développent par paires sur la face dorsale des segments abdominaux de la chenille. Ces poils sont libérés lors des déplacements ou lorsque les chenilles se sentent en danger. Au moindre danger, les "miroirs" s'ouvrent et libèrent des poils de taille microscopique qui forment un barrage venimeux autour de la colonie pour la protéger. En effet, le développement du 3ème stade peut durer environ 30 jours (Démolin, 1969b).

1.4.1.3.4 Quatrième stade larvaire (L4)

A la fin de l'automne et quand la température commence à chuter, les chenilles tissent sur les extrémités des branches les plus hautes et mieux exposées au soleil de l'arbre un habitat collectif définitif, sous la forme d'une bourse de soie volumineuse qui sert principalement d'accumulateur de chaleur pour les chenilles des derniers stades (stades L4 et L5), appelé le nid d'hiver (Gachi, 1996) (Fig. 6). Ce nid va permettre aux chenilles de survivre durant l'hiver non seulement par l'effet de masse qui permet d'atténuer les variations climatiques brutales mais il agit également comme un radiateur thermique en captant les rayonnements du proche infrarouge émis par le soleil pour augmenter la température à l'intérieur du nid, il peut y faire jusqu'à 20°C de plus qu'à l'extérieur (Bonnet *et al.*, 2008 ; Rivière, 2011). Le stade L4 s'étale sur une période de 30 à 90 jours (hiver doux 30 jours, tempéré 60 jours ou froid 90 jours) (Démolin, 1969b).



Figure 6 : Nid d'hiver de la processionnaire du pin sur le cèdre de l'Atlas (Originale, 2019).

1.4.1.3.5 Cinquième stade larvaire (L5)

Les chenilles du cinquième stade quittent le nid pour se rendre en procession jusqu'au lieu d'enfouissement dans le sol, c'est la procession post hivernale de nymphose. La procession a lieu en général entre février et avril selon la rigueur de l'hiver et l'étage bioclimatique d'une région (Martin, 2005). Les processions ne peuvent commencer que lorsque la température au sol comprise entre 10 et + 22° C (Dajoz, 1998). La procession est guidée par une femelle pour trouver une zone éclairée et peuvent se déplacer jusqu'à 40 mètres (Démolin, 1971), et lorsque les chenilles parviennent à un endroit où le sol est à la fois meuble et ensoleillé, la procession s'arrête et les chenilles se regroupent et s'enfouissent à des profondeurs allant de 5 à 20 centimètres. La durée du cinquième stade varie de 30 à 90 jours selon l'hiver (hiver doux 30 jours, tempéré 60 jours ou froid 90 jours) (Démolin, 1969a) (Fig. 7).



Figure 7 : Procession de nymphose (Originale, 2019).

1.4.2 La phase souterraine

Deux semaines plus tard après l'enfouissement dans le sol, les chenilles tissent autour d'elles leurs cocons individuels de protection dans lesquels elles vont transformer quelques jours plus tard en chrysalides, c'est la nymphose. Elles entrent en diapause obligatoire correspondent à un arrêt complet de développement caractérisé par la diminution notable du métabolisme pour une durée très variable, soit environ quatre mois d'avril à juillet (Démolin, 1974). En effet, la durée de la diapause est adaptée à celle d'évolution larvaire pour que le cycle biologique s'achève sur l'année. Cependant, la diapause peut s'étaler sur plusieurs années et peut durer parfois jusqu'à 5 ans (Markalas, 1989), si les conditions climatiques défavorables notamment au cours desquels les années de sécheresse (Huchon et Démolin, 1970). A la fin de la diapause, l'adulte sera donc prêt à émerger et sortir de terre c'est la métamorphose des

chrysalides en papillon (Battisti *et al.*, 2005). Les différentes écophases de son évolution sont représentées par tableau 2.

Tableau 2 : Quelques caractéristiques morphologiques des différentes écophases de *T. pityocampa*.

Écophases	Morphologie	Références
Adulte	<p>Les papillons mâles : L'envergure alaire : de 3 à 4 cm de couleur grises Les antennes : pectinées L'abdomen : velu et pointu de couleur gris brunâtre Voler : jusqu'à 50 kilomètres Les papillons femelles : L'envergure alaire : de 3,5 à 5 cm de couleur plus claire Les antennes : filiformes L'abdomen : pseudo-cylindrique avec une touffe d'écailles anales de couleur blond foncé. Voler : de 3 à 4 kilomètres. Les deux ont un thorax poilu, des yeux composés volumineux comportent grand nombre d'ommatidies Les ailes antérieures : gris ; les nervures, bordures et trois bandes transversales noires. Les ailes postérieures : blanches, à franges grises, avec une tache noire dans la région anale.</p>	(Démolin, 1962)
Ponte (les masses d'œufs)	<p>Forme : manchon cylindrique. Longueur : de 4 à 5 cm. Couleur : gris argenté à brun jaunâtre, brillants. Les œufs : blancs, sphériques suivant une disposition hélicoïdale, recouvrant par des écailles protectrices provenant de l'extrémité de l'abdomen maternel.</p>	(Démolin, 1969a).
Chenilles stade L1	<p>Longueur : de 2 à 3 mm. Couleur : jaune verdâtre. Soies ornementales dorsales : noires Soies latérales : blanches et plus longues. Capsule céphalique : noire, volumineuse pour s'attaquer à une nourriture résistante. Huit paires de pattes (deux paires de fausses pattes abdominales).</p>	(Démolin, 1969b)
Chenilles stade L2	<p>Longueur : de 10 à 15 mm. Couleur : rousse. Soies latérales : augmente.</p>	(Sebti, 2011)
Chenilles stade L3	<p>Longueur : de 16 à 25 mm. L'apparition des touffes de poiles urticants rougeâtres localisés à la face dorsale des segments abdominaux. Soies latérales : amplifie</p>	(Sebti, 2011)
Chenilles stade L4	<p>Longueur : de 26 à 35 mm. L'appareil urticant continue à se développer.</p>	(Martin, 2005)
Chenilles stade L5	<p>Longueur : de 4 à 5 cm. Couleur : brun roux. Soies latérales : blanches</p>	(Démolin, 1969b)
Chrysalide	<p>Forme : cocon soyeux, ovale. Longueur : de 15 à 25 mm. Diamètre : de 6 à 8 mm. Couleur : jaune brunâtre pâle qui deviendra marron rougeâtre.</p>	(Bouzar-Essaidi, 2013)

1.5 Incidence écologique, économique et sanitaire

La défoliation causée par *T. pityocampae* provoque des pertes de croissance et de biomasse des arbres par une diminution du pouvoir photosynthétique. La réduction de production et d'accroissement (en volume, hauteur et circonférence) peut aller jusqu'à plus de 35% au cours de l'année qui suit l'année de défeuillaison (Laurent-Hervouet, 1986). Toutefois, une colonie peut détruire environ 1,5 à 2 Kg en poids sec des aiguilles ce qui est suffisant 4 colonies pour mettre à nu entièrement un arbre de pin de 20 ans (Fraval, 2007). Les arbres infestés préalablement affaiblis deviennent alors plus vulnérables aux ravageurs secondaires notamment les insectes xylophages (comme les scolytes), aux maladies et aux stress hydriques et thermiques.

Les conséquences économiques sont à la fois ; la perte de croissance des arbres dans les forêts de production, les plantations, jardins publics et parcs devenus inhospitaliers, particulièrement en raison des risques d'urtication et des dégâts esthétiques, cette perte économique due aux défoliations massives par la processionnaire du pin qui peut toutefois se répercuter sur plusieurs années et pouvant provoquer un déficit de biomasse de plus de 70% chez les arbres très défoliés (Arnaldo *et al.*, 2010). De plus, une année de fortes pullulations entrainera une perte économique d'une année complète de production de bois, étalée sur les 3 années suivant l'attaque (Morel, 2008). Le second impact économique est également le coût des traitements à appliqué contre la chenille processionnaire du pin, ce qui peut engendrer chaque année des coûts supplémentaires très élevés.

En Algérie, les chenilles de processionnaire du pin sont fréquemment observées dans les forêts de pins et de cèdres, elles provoquent des dégâts souvent notables dans les forêts naturelles et très considérables dans les plantations reboisées dans les régions semi-arides, dans lesquelles on observe des mortalités chez les jeunes arbres ayant subi des défoliations répétées (Zamoum, 1998). Cet insecte nous fait perdre jusqu'à 100 000 hectares dans les reboisements (DGF, 2014).

À partir du troisième stade larvaire (L3) les chenilles processionnaires du pin disposent de poils urticants microscopiques qui sont libérés dans l'air au moindre danger. La rupture du poil provoque la libération d'une substance protéique urticante et allergisante, la thaumétopoéine, responsable d'une réaction d'hypersensibilité. Chez l'homme, le contact avec les poils urticants disséminés par la voie aérienne la principale voie de contamination pouvant provoquer des allergies plus ou moins graves, entraînant conjonctivite, congestion des voies respiratoires et atteintes cutanée (Fig. 8). En effet, les animaux peuvent avoir également des allergies (démangeaisons, ophtalmologiques, problèmes respiratoires) de même que l'homme. Les

chiens restent les animaux les plus vulnérables aux risques de la chenille processionnaire du pin (Fig. 9).



Figure 8 : Atteinte cutanée de poil de chenille processionnaire chez les humains (Gault, 2012).



Figure 9 : Lésion langue et babines de chien (Gault, 2012).

1.6 Contrôle des populations de la processionnaire du pin

La lutte contre la processionnaire du pin ne permet pas d'éviter une nouvelle pullulation et l'éradication de ce défoliateur est impossible. La lutte consiste donc à protéger les peuplements les plus sensibles et à une gestion des populations de ce ravageur, qui sont en train de régresser à un taux acceptable (Zamoum, 1998). Pour intervenir efficacement, il est nécessaire de mieux connaître le cycle de vie de la chenille processionnaire du pin afin d'intervenir au bon moment (les stades les plus sensibles), les contraintes environnementales du site et également de séquencer de manière optimale les actions avec le matériel et les équipements adaptés. En Algérie, la lutte contre ce ravageur ne pouvait être menée de façon systématique dans les peuplements forestiers en raison du coût exagéré des interventions avec insecticide ; seules ont été tentées parfois des interventions localisées par voie chimique, qui se sont d'ailleurs incapables d'éliminer la chenille pour plusieurs années successives.

Plusieurs techniques sont appliquées pour contrôler les populations de la processionnaire du pin

1.6.1 La lutte mécanique

Lutte mécanique dite « échenillage » exception faite pour les surfaces réduites (jardins et parcs), elle consiste à détruire manuellement les nids d'hiver et les pontes. La récolte des pontes généralement s'effectue en été avant l'éclosion des œufs. Cependant, dès le début de l'automne, une fois l'apparition des pré-nids et la construction des nids d'hiver commencée, couper avec un sécateur les branches infectées et les brûler, en évitant tout contact avec les poils urticants.

1.6.2 La lutte chimique

La lutte chimique est principalement basée sur l'utilisation d'insecticides à base de Diflubenzuron, un régulateur de croissance qui pourrait perturber le processus de mue larvaire et qui s'avérait très efficace (Démolin et Millet, 1981). Cette méthode est aujourd'hui en fort recul à cause du fort impact écologique du diflubenzuron (Loudhaief, 2018).

1.6.3 La lutte sylvicole

La lutte sylvicole consiste principalement à planter des variétés résistantes aux attaques des insectes et à utiliser des essences d'arbres qui ne sont pas sensibles à la processionnaire du pin. En effet, la diversité des essences forestières réduit la colonisation de cet insecte et favorise le développement de son cortège parasitaire (ennemis naturels). Les peuplements forestiers mixtes subissent généralement moins de dégâts que les peuplements purs (Martin, 2005).

1.6.4 La lutte microbiologique

La lutte microbiologique qui consiste à utiliser d'insecticides biologiques à base de *Bacillus thuringiensis* contre les larves de *T.pityocampa*. *Bacillus thuringiensis* couramment appelé Bt est une bactérie entomopathogène que l'on trouve principalement dans le sol, mais on peut le trouver dans l'air, l'eau et sur le feuillage, qui est connue depuis le XXe siècle pour son activité insecticide contre les ravageurs des cultures et les défoliateurs des forêts, assurant ainsi une protection phytosanitaire performante. Les formulations commerciales de Bt sont constituées de préparations de spores et de cristaux obtenues à partir de cultures réalisées en fermenteurs. Ces produits se présentent généralement sous forme de poudres mouillables ou de concentrés liquides utilisables en pulvérisation. En effet, ce traitement doit être précoce effectué durant les trois premiers stades larvaires pour une efficacité maximale. Le traitement se fait par projection de *Bacillus thuringiensis* sur le feuillage et les nids sur les arbres (Fig. 10). Lorsque les chenilles ingèrent ces toxines sa paroi intestinale est détruite et elles cessent de s'alimenter et meurent en quelques jours. Cependant, cette méthode reste coûteuse (coût de mode de pulvérisation aérien) et son impact sur l'environnement controversé (substance toxique pour les autres lépidoptères).



Figure 10 : Traitement microbiologique bactériologique avec le Bt par hélicoptère contre *Thaumetopoea pityocampa* dans les reboisements du barrage vert (Hezil, 2019).

1.6.5 La lutte par l'utilisation des piègeages :

Le piégeage correspond aux pièges installés pour intercepter les chenilles processionnaires lors de leur descente de l'arbre. Les insectes capturés doivent être éliminés par incinération un mois après leur descente et lorsqu'elles sont au stade des chrysalides (Fig. 11).

L'utilisation des pièges physiologiques à base de phéromone sexuelle de synthèse très proche de la phéromone naturelle "pityolure" émise par la femelle a permis la mise en place des mesures de lutte contre la processionnaire du pin, en piégeant les papillons mâles par attraction spécifique « mass-trapping » (Martin *et al.*, 2009) (Fig. 11). Cette phéromone est également pulvérisée dans l'environnement à fortes doses pour engendrer la confusion sexuelle afin de réduire les chances que la femelle soit reconnue par le mâle (Martin *et al.*, 2009).



Ecopiège à chenilles



Ecopiège à chenilles



Piégeage à phéromone

Figure 11 : Ecopiège à chenilles et piégeage à phéromone des papillons mâles de processionnaire du pin.

1.7 Prédateurs et parasites de la processionnaire du pin

Tous les stades d'évolution de la chenille processionnaire du pin sont soumis à la pression des prédateurs et des parasitoïdes. La principale espèce prédatrice des chenilles est la mésange bleue (*Parus caeruleus*), un oiseau sédentaire qui se nourrit d'insectes dont la processionnaire du pin (Dajoz, 2002). L'implantation des mésanges par des nichoirs permet de réduire les populations de l'insecte (Barbaro *et al.*, 2008). Le calosome sycophante (*Calosoma sycophanta*) est un coléoptère vivant sur le sol et monte occasionnellement aux arbres pour chasser des proies, dont ses larves sont considérées comme grandes consommatrices de chenilles. Les œufs sont prédatés par l'éhippigère *Ephippiger ephippiger*, une espèce d'orthoptère phytophage, peuvent dévorer entièrement jusqu'à 40% des pontes et plus de 23% partiellement (Démolin et Delmas, 1967). Les chrysalides peuvent être attaquées par la huppe fasciée *Upupa epops*, un oiseau dont la forme particulière de leur bec est adaptée à déterrer les nymphes enfouies dans le sol (Barbaro *et al.*, 2008).

Les parasitoïdes sont le plus important régulateur biologique des populations de la processionnaire du pin. Il existe cependant trois types de parasitoïdes, ceux qui s'attaquent les œufs, ceux qui s'attaquent les chenilles et ceux qui s'attaquent les pupes.

Les principaux parasitoïdes des œufs de *T. pityocampa* sont *Baryscapus servadeii*, spécifique et *Ooencyrtus pityocampae*, polyphage. On retrouve deux autres espèces parasitoïdes polyphage secondaires, *Trichogramma sp* et *Anastatus bifasciatus*.

Ces parasitoïdes attaquent les œufs appartenant essentiellement aux hyménoptères de la famille des chalcidiens. Le principal parasitoïde spécialiste des chenilles est le diptère *Phryxe caudata* Rondani (Diptera, Tachinidae), il développe deux générations sur la même génération de l'hôte, la première génération va pondre sur les jeunes chenilles et la deuxième s'attaquera aux chenilles du stade L5. Les chrysalides sont attaquées essentiellement par le parasitoïde *Villa brunnea* (Diptera, Bombyliidae) un diptère pénètre à l'intérieur des chrysalides de processionnaire du pin pour y finir leur développement (Dumerle, 1979).

La liste des principaux auxiliaires de *T. pityocampa* est regroupée dans le tableau 3.

Il est important de noter que chaque technique de lutte décrite vise des stades précis dans le cycle de vie de la processionnaire du pin et que plusieurs techniques peuvent être combinées au cours d'une même année, selon le risque estimé pour une lutte efficace dans le temps, respectueuse de l'environnement et afin de prévenir le risque.

Tableau 3 : Les ennemis naturels de la processionnaire du pin (Bonnet *et al.*, 2008).

Stades	Œufs	Chenilles	Chrysalides	Papillons	
Parasites	<i>Baryscapus servadeii</i>	<i>Phryxe caudata</i>	<i>Villa brunnea</i>	Guêpes	
	<i>Tetrastichus servadeii</i> (Hymenoptera : Eulophidae)	(Diptera : Larvaevridae)	(Diptères : Bombyliidae)		
	<i>Oencyrtus pityocampae</i> (Hymenoptera : Encyrtidae)	<i>Compsilura concinnata</i> (Diptera : Tachinidae)	<i>Inchneumon rudis</i> (Hyménoptère : Ichneumonidae)		
	<i>Trichogramma sp</i> (Hymenoptera : Trichogrammidae)	<i>Ctenophora pavidata</i> (Diptera : Tachinidae)	<i>Conomorium eremitaie</i> (Hyménoptère : Pteromolidae)		
	<i>Anastatus bifasciatus</i> (Hymenoptera : Eupelmidae)	<i>Erigorgus femorator</i> (Hymenoptera : Ichneumonidae)	<i>Villa quinquefasciata</i> (Diptères : Bombyliidae).		
		<i>Meteorus versicolor</i> (Hymenoptera : Braconidae)			
		<i>Xantandrus comtus</i> (Diptera : Syrphidae)			
	Prédateurs	<i>Ephippiger ephippiger</i> (Orthoptera : Tettigoniidae)	<i>Calosoma sycophanta</i> (Coleoptira : Carabidae)	<i>Calosoma sycophanta</i> , (Coleoptira : Carabidae)	Fourmis Chauvessouris insectivores
			Mésange bleue (<i>Parus caeruleus</i>)	Huppe (<i>Upupa epops</i>)	
	Bactéries			<i>Borrelina sp</i> <i>Clostridium sp</i>	
Virus			<i>Smithiavirus pityocampae</i>		
Champignons			<i>Beauveria bassiana</i> <i>Aspergillus flavus</i> <i>Scopulariopsis sp</i>		

1.8 Les biopesticides botaniques :

Les biopesticides botaniques sont composés d'extraits botaniques (Ferron, 1978). Quelques composés d'origine végétale étaient identifiés et abondamment utilisés comme répulsifs ou produits toxiques parmi lesquels il y avait la nicotine (alcaloïde) et ses dérivés, la roténone, les pyrèthres et les huiles végétales (Jacobson, 1984). Les biopesticides d'origine végétale peuvent constituer une solution alternative, leurs propriétés pesticides et leur relative innocuité environnementale en font des composés très intéressants pour les traitements phytosanitaires à venir (De KouacI, 2001). Actuellement, on rapporte que 2121 espèces de plantes possèdent des propriétés de lutte antiparasitaire ; un total de 1005 espèces identifiées, présentent des propriétés insecticides, 384 avec des propriétés anti-appétissantes, 297 possédants des propriétés répulsives, 27 avec des propriétés attractives et 31 avec des propriétés de stimulateurs de croissance (Nirakar, 2007).

2. Le cèdre de l'Atlas *Cedrus atlantica* Manetti, hôte de la processionnaire du pin

2.1 Introduction

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) est une espèce de conifère endémique de l'Afrique du Nord. Cette essence forestière est l'une des espèces économiquement et écologiquement la plus importante de la montagne méditerranéenne (Terrab *et al.*, 2006), il suscite l'intérêt majeur en raison de ses nombreuses fonctionnalités : le maintien de l'équilibre biologique, la production de bois de haute qualité, la faible inflammabilité rusticité et remarquable valeur esthétique (Toth, 1978 ; M'hirit, 1982 ; Ferrandes, 1986 ; El Azzouzi et Keller, 1998 ; Messaoudène *et al.*, 2004).

2.2 Bref historique

La présence du genre *Cedrus* remonte au tertiaire (le Miocène et le Pliocène), est considérée comme étant le plus ancien après le genre *Pinus* (Gaussen, 1967). Il y est établi dans l'ensemble des pays du nord de la circumméditerranéenne avant un processus primordial de migration de flore vers le sud de Méditerranée (Quézel, 1995). Aux pays du Maghreb, le cèdre de l'Atlas était existé depuis la période glaciaire, mais tôt avait régressé au cours de l'holocène, il a été identifié par les grains de pollen (Maley, 1983). Le cèdre de l'Atlas algérien est implanté sur le territoire pendant le pléistocène moyen et même inférieur.

2.3 Taxonomie

Le cèdre de l'Atlas est l'une des quatre espèces du genre *Cedrus*, qui occupe des surfaces inégales dans l'étage montagnard de la région méditerranée. Il appartient à la systématique suivante :

Embranchement : Spermaphytes

Sous Embranchement : Gymnospermes

Classe : Vectrices

Ordre : Coniférales

Sous Ordre : Abiétales

Famille : Pinacées

Sous famille : Abiétés.

Genre : *Cedrus*

Espèce : *Cedrus atlantica* Manetti.

Le nom arabe du cèdre de l'Atlas est Arz ou Meddad, et le nom berbère est Begnoun ou Inguel.

2.4 Répartition géographique du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti)

Le cèdre de l'Atlas représente l'essence noble par excellence de forêts de l'Algérie et du Maroc (Benabid, 1994) (Fig. 12). Le Maroc détient la plus grande aire naturelle du cèdre, s'étend sur une superficie de 130 000 ha où elle couvre 116 000 ha dans le grand Atlas oriental et Moyen Atlas et 15 000 ha dans le Rif occidental et central (M'hirit, 1982 ; M'Hirit, 1994). En Algérie, le cèdre de l'Atlas occuperait 30 000 ha de superficie (Quézel, 1998 ; M'hirit, 1999), tandis qu'il a été introduit dans de nombreux pays du monde en raison de son extension rapide lorsque les conditions sont favorables.

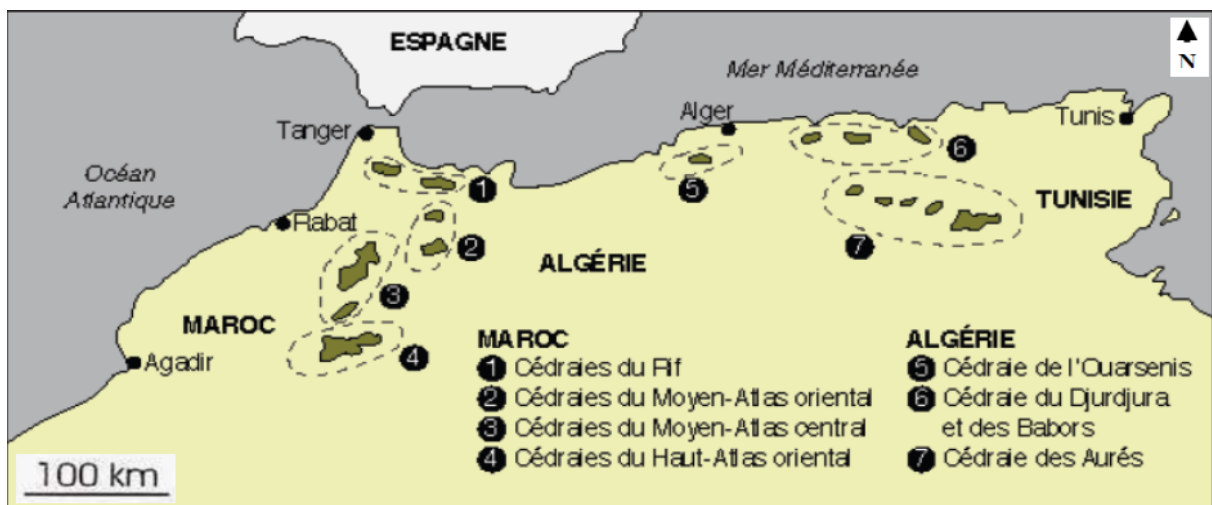


Figure 12 : La répartition de *Cedrus atlantica* dans le monde (M'hirit, 1994).

Les cédraies algériennes se localisent dans deux régions distinctes (Tab. 4) :

La première est représentée par les cédraies de l'Atlas tellien, ce sont les populations de cédraies humides où les conditions environnementales plus favorables et non extrêmes.

La deuxième est représentée par les cédraies de l'Atlas saharien et constitue l'ensemble le plus important de cédraie algérienne, caractérisée par les conditions climatiques plus contraignantes, avec une tendance de plus en plus sèche (Fig. 13).

Tableau 4 : Répartition des cédraies Algériennes (Boudy, 1950) :

Les cédraies algérienne	Les îlots du cèdre	Superficie (ha)
Les cédraies de l'Atlas tellien	Teniet el Had	1 000 ha
	Ouarsenis	100 ha
	Atlas blidéen	1 000 ha
	Djurdjura	2 000 ha
	Babors	800 ha
Les cédraies de l'Atlas saharien	Les monts du Hodna	8 000 ha
	Les massifs du Belezma et de l'Aurès	17 000 ha

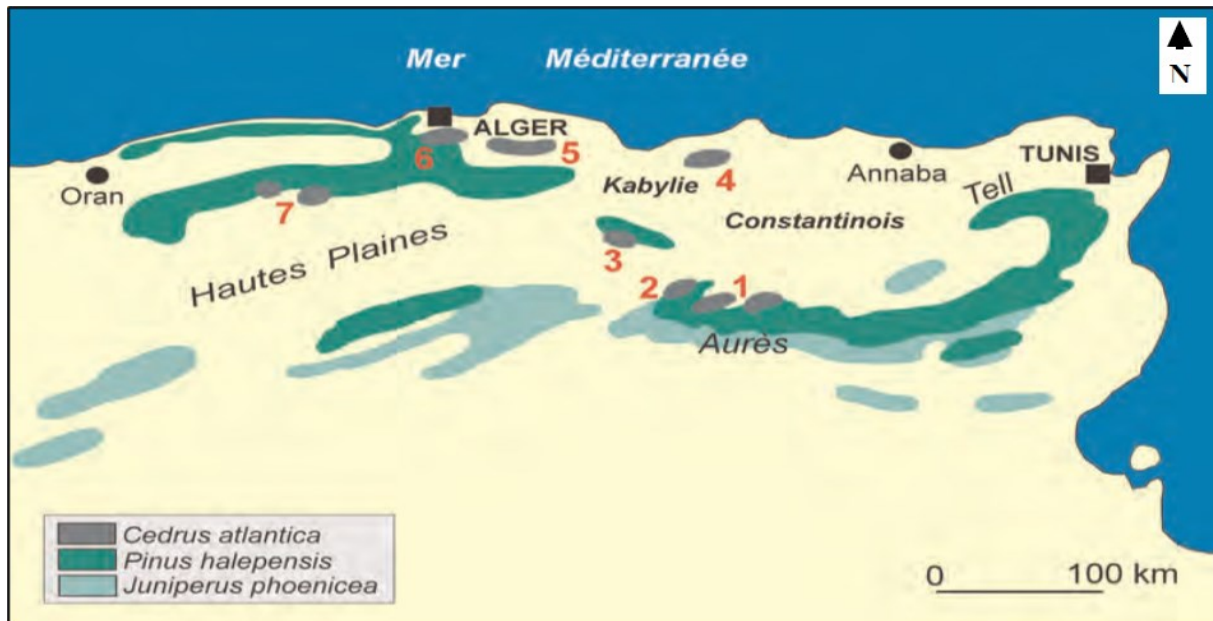


Figure 13 : La répartition de *Cedrus atlantica* en Algérie (Demarteau *et al.*, 2007).

(1. Massif de l’Aurès ; 2. Monts de Belesma ; 3. Monts de Hodna ; 4. Jbel Babor ; 5. Massif de Djurdjura ; 6. Monts de Blida ; 7. Massif de l’Ouarsenis).

Les cédraies les plus importantes se situent dans l’Aurès pour une surface totale de 17 500 hectares dont 13 800 ha à l’état pur et 3 600 ha en mélange (Boudy, 1955) (Tab. 5), elles constituent très grande richesse au point de vue écologique, esthétique et économique. Cependant la cédraie du Chélia occupe la grande majorité des cédraies aurésiennes (Fig. 14).

Tableau 5 : La répartition du cèdre dans les Aurès (Bentouati, 2008) :

Zones	Superficie (ha)
Chélia	8 000 ha
Le massif de Ouled Yakoub	3 327 ha
S’gag	500 ha
Belezma	5 000 ha
Djebel Lazreg	200 ha
Ichmoul	150 ha
Djebel Guetiane	300 ha

Par ailleurs, il est à noter que la superficie occupée par cette essence a subi une forte régression, notamment au niveau de l’Atlas saharien où la superficie de la cédraie aurésienne a été réduite de près de moitié couvrant une aire estimée à 11 000 Ha en 2007 (Houamel, 2012).



Figure 14 : Photo montrant un aspect de sujet de cèdre de l'Atlas, cédraie de Chélia (Originale, 2018).

2.5 Caractéristiques botaniques et dendrologiques du cèdre de l'Atlas

Le cèdre de l'Atlas est l'arbre de haute taille, et pourrait dépasser les 50 m de haut et 3m de circonférence, très longévifs, qui peut dater de plus de 1 200 ans (M'hirit et Benzyane, 2006).

Le port est conique pyramidal avec un fût droit au stade juvénile, il prend la forme tabulaire chez les sujets plus âgés (Debazac, 1964).

Le tronc est plus ou moins droit, monopodial orthotrope, à développement et ramification rythmiques (Sabatier *et al.*, 2003).

L'écorce est lisse d'une couleur jaune brune chez les jeunes plantules, puis petites écailles d'une couleur gris foncé qui se crevasse profondément à un âge avancé (M'hirit et Benzyane, 2006).

Les feuilles sont des aiguilles isolées et soudées à l'écorce sur des rameaux longs, et groupées en rosettes sur des rameaux courts. Elles sont raides, aiguës et fines de couleur allant de la glauque ou verte et d'une longueur de 1 à 2 cm, persistantes 3 à 6 ans (M'hirit et Benzyane, 2006).

Le cône est de forme cylindrique ovoïde de 5 à 8 cm de long, d'un poids de 41, 49 à 65,91g et son diamètre de 3 à 5cm avec une couleur brune violacée, la maturité des cônes dure 2ans après la floraison (Debazac, 1964 ; Quézel et Santa, 1962).

Les racines sont très développées et pivotantes ce qui assure la stabilité de l'arbre (Toth, 1970).

Les fleurs sont groupées en inflorescences de type chaton évoluent sur le même arbre les fleurs mâles et femelles mais sur des rameaux différents (espèce monoïque) ; les fleurs mâles se

présentent en chatons cylindriques dressés, de 4 à 5 cm de longueur avec une couleur jaune verdâtre ; les fleurs femelles sont des chatons ovoïdes dressés (cônes), de 1 cm de longueur et de couleur verte bleuâtre (Toth, 2005).

Les inflorescences femelle et mâle ne se constituent pas à la fois, ils se développent progressivement en cônelet puis en cône (Slimani *et al.*, 2014). Le cycle de reproduction du cèdre de l'Atlas est caractérisé par la floraison automnale qui commence à partir du mois d'octobre (Toth, 2005) (Fig. 15).

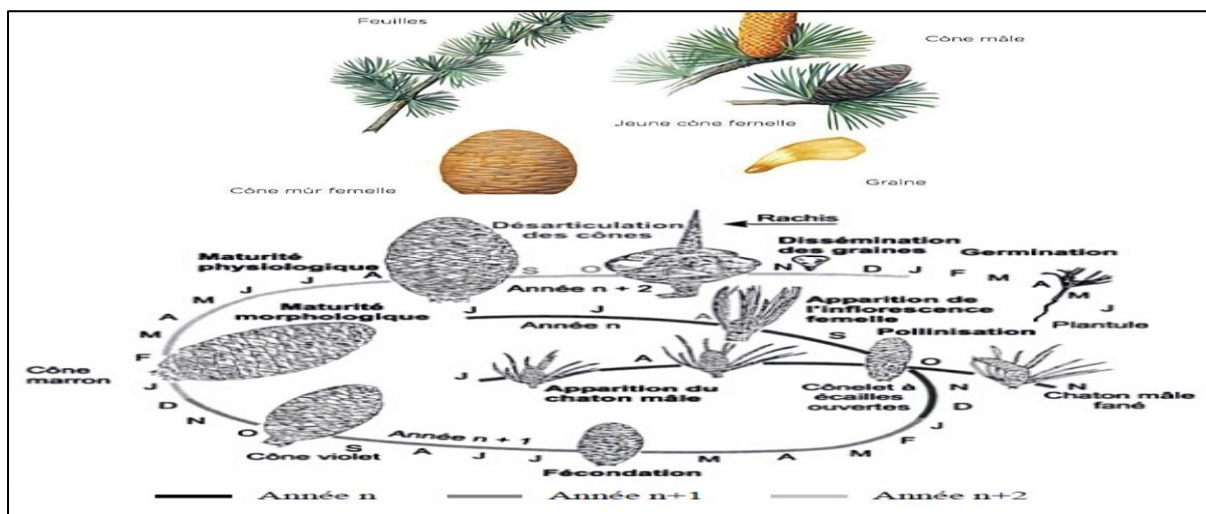


Figure 15 : Cycle de reproduction du cèdre de l'Atlas (Toth, 2001).

2.6 Caractéristiques écologiques du cèdre de l'Atlas

2.6.1 Altitude

Le cèdre de l'Atlas est une essence essentiellement montagnarde. Il se trouve généralement entre 1 200 et 2 600 m d'altitude, cette tranche altitudinale varie selon les reliefs et les conditions climatiques (Emberger, 1938).

D'après Pujos (1964), les cédraies comportent trois types en fonction de l'altitude :

- Les cédraies basses : inférieures à 1 800 m d'altitude.
- Les cédraies moyennes : correspondent à des altitudes comprises entre 1 800 m et 2 100 m.
- Les cédraies hautes : en altitude supérieure à 2 100 m.

2.6.2 Climat

Le cèdre de l'Atlas est une essence de climat méditerranée qui s'accommode aux différents bioclimats, on peut le trouver dans un climat froid et humide, et dans un climat chaud et sec (Aussenac, 1984). Il tolère des températures variantes de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+39\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Boudy, 1950).

Cette espèce pas très exigeante de pluviométrie, qui a besoin des pluviométries annuelles comprises entre 500 et 1 500 mm (Ducrey, 1993).

De point de vue climatique, en général les cédraies algériennes se subdivisent en deux types (Abdessemed, 1981)

- **Les cédraies sèches** : sont caractérisées par des conditions climatiques très sévères et soumises à l'influence saharienne.

- **Les cédraies humides** : bénéficient d'un climat plus favorable.

De ce fait, les étages bioclimatiques de cèdre représenté par trois étages à savoir : le premier correspond aux conditions bioclimatiques de semi-aride à hiver froid (Chélia, Djebel Azreg et Boutaleb), le second correspond aux conditions subhumides à hiver frais à froid (nord du Belezma, Theniet El Had) et le troisième va de l'humide à perhumide à hiver frais à froid (Chrèa, Monts du Djurdjura, Babors) (Meddour, 1994).

2.6.3 Substrat

Le cèdre de l'Atlas se rencontre presque sur tous les types de sol, il est apte à coloniser toutes les compositions chimiques des sols c'est donc l'aspect physique qui joue un rôle prépondérant dans le comportement écologique de cèdre. Le cèdre préfère le sol profond, meuble et caillouteux, ce qui le rend résistant à la sécheresse estivale (Bariteau *et al.*, 1999).

Les cédraies algériennes se développent sur des roches acides (quartzites, granites, grès siliceux, schistes) ou non acides (calcaires, dolomies, marnes, basalte grès calcaire) (Boudy, 1950).

2.7 Les facteurs de dégradation du cèdre de l'atlas

L'aire de répartition du cèdre se réduit progressivement sous l'influence de multiples facteurs destructeurs parmi lesquels, l'activité anthropique qui est le facteur le plus déterminant de la régression de cédraie, ceci est dû à l'exploitation non contrôlée, le biais du surpâturage, les coupes illicites et les incendies. Les dégradations et les perturbations subies par les cédraies sont également liées aux aléas climatiques, plus exactement le changement climatique. Les changements climatiques actuels affectent significativement les forêts méditerranéennes (Resco de Dios *et al.*, 2007). Les conséquences des changements climatiques pourraient se traduire par l'augmentation de la mortalité d'espèces forestières, la diminution des taux de germination et la modification de taux de croissance d'arbre, dues essentiellement au stress hydrique, à la sécheresse et aux influences sahariennes (Allen *et al.*, 2010 ; Dirik, 2000). Bentouati et Baritau (2006) a souligné que le stress hydrique est un facteur déterminant, non seulement dans la

croissance du cèdre, mais également dans la survie des plantules. En effet, ces phénomènes tendent à s'accélérer et semblent suivre l'accentuation du changement climatique.

D'autres facteurs d'affaiblissement interviennent liés aux changements climatiques sont les champignons (*Trametes pini*, *Ungulina officinalis*) et les attaques d'insectes, et qui constituent l'un des fléaux les plus graves qui menacent les cédraies, en provoquant des anomalies de croissance ou la mortalité de cet arbre. Parmi les insectes ravageurs les plus destructifs du cèdre de l'Atlas, nous citons les phyllophages (Thaumetopoeidae, Tortricidae) et les xylophages (Scolytidae, Buprestidae, Cerambycidae, curculionidae).

En effet, les insectes défoliateurs (Lepidoptera, Thaumetopoeidae) s'attaquent aux aiguilles du cèdre causant des dégâts redoutables (El Yousfi, 1994 ; Gachi, 1994 ; Fabre *et al.*, 1999).

2.8 Dépérissement

Le dépérissement des arbres forestiers constitue un phénomène complexe entraînant une détérioration générale et qui se termine le plus souvent par la mort d'arbres ; ce phénomène correspond à un effet global résultant de la combinaison d'une multitude de facteurs biotiques comme les attaques d'insectes parasites et abiotiques telles que les changements climatiques (le stress hydrique, la sécheresse) (Fabre *et al.*, 1999). Le cèdre de l'Atlas représente l'une des espèces qui a été affectée par les variabilités climatiques passées et actuelles (Bentouati, 2008). Toutefois, les facteurs déclenchants et aggravant ce dépérissement sont essentiellement biotiques, notamment les champignons phytopathogènes et les insectes ravageurs où le cèdre de l'Atlas abrite diverses espèces d'insectes défoliateurs (*Thaumetopoidae*) conduisant à un effeuillage complet des sujets atteints, ce qui affaiblit l'arbre ou d'insectes xylophages (*Scolytidae*) sont responsables d'attaques des fûts, des rameaux et des branches qui constituent souvent l'étape qui suit l'affaiblissement de l'arbre (Gachi, 1994 ; Fabre, 1976). Cependant, la sécheresse prolongée ces dernières années accentue le phénomène de dépérissement (Bentouati, 2008).

En Algérie, le dépérissement des cèdres n'est pas récent ; depuis longtemps des sécheresses intenses entre 1875 et 1888 ont touché pratiquement tous les peuplements de cèdre dans les Aurès et les plus affectées le massif de Bélezma soumis aux influences sahariennes (Bentouati et Bariteau, 2006). Par ailleurs, Boudy (1950) mentionne des cas de régression touchant, par degrés les cédraies Atlas telliennes (Djurdjura, Theniet El Had). De nouveaux cas de dépérissement ont été enregistrés en 2003 ont causé de graves dégâts au peuplement de cèdre. Actuellement, la situation s'y est encore aggravée au cours de ces dernières années.

DEUXIEME CHAPITRE : MATERIELS ET METHODES



DEUXIEME CHAPITRE

MATERIELS ET METHODES

1. Présentation de la zone d'étude

La cédraie du Chélia est située dans la partie orientale des Aurès, précisément au sud-est de la ville de Batna, à la limite de la zone frontalière avec la wilaya Khenchela (Fig. 16). Cette forêt où culmine Ras Keltoum à 2 328 m - c'est le sommet le plus élevé de l'Algérie septentrionale -, s'étend sur près de 8 000 ha (Bentouati, 2008). Ce massif boisé en majorité de cèdres est traversé par des oueds importants tel l'oued Tidder et l'oued Mellagou. La cédraie du Chélia est considérée comme l'une des plus belles forêts du bassin méditerranéen, elle dispose d'énormes potentialités naturelles importantes et variées à même de développer un tourisme dans toute la région. Toutefois, il est à constater que cet atout naturel n'est guère valorisé, encore moins exploité.

1.1 Situation

Le massif de Chélia est limité au nord, par Djebel Foughal, à l'est par la forêt de Beni Oudjana, au sud par la pinède de Beni Mloul et à l'ouest par Djebel Ichmoul. Il est limité au nord par la ligne Ichmoul- kantina et au sud par la ligne Ichmoul-Bouhmama.

Les coordonnées géographiques de la série de Chélia sont :
35°18 et 35°22 latitudes nord. 6°36 et 6°42 longitudes est.

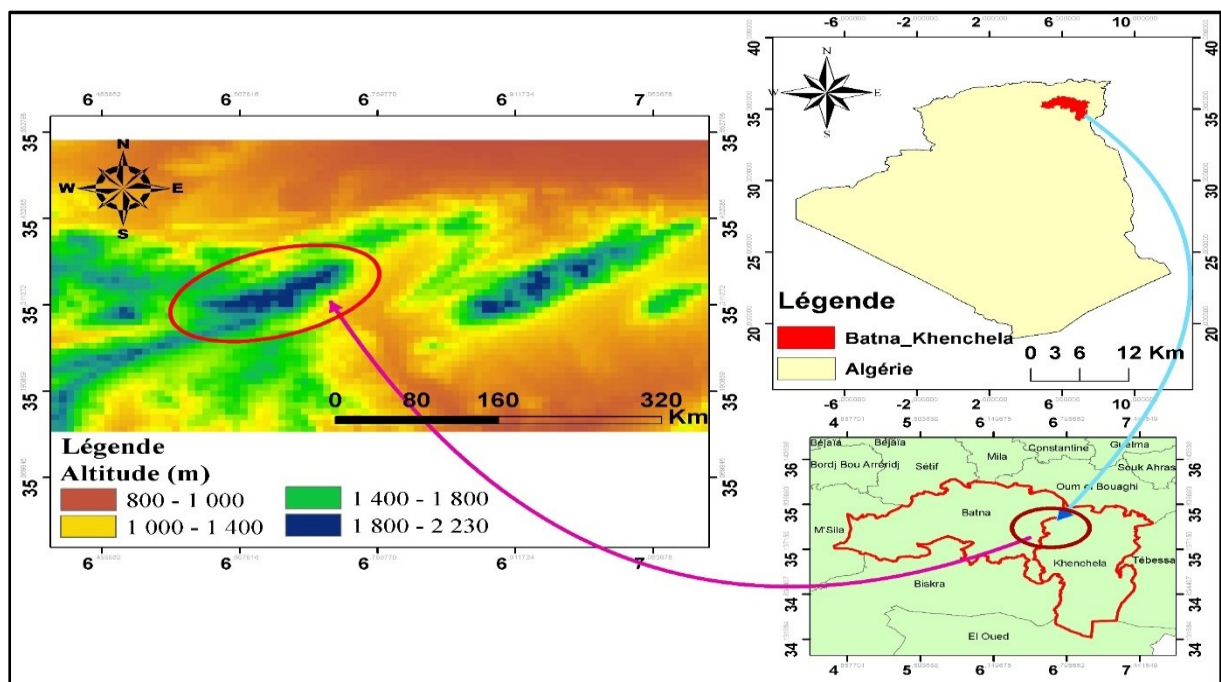


Figure 16 : Situation géographique de la cédraie de Chélia (Originale).

1.2 Caractéristiques physiques du milieu d'étude

1.2.1 Géologie

La série Chélia est formée d'un ensemble de chaînes montagneuses au relief très accidenté, à une altitude allant de 1 600 jusqu'à 2 328 mètres. On y repose principalement sur des grès ferrugineux et des dolomies du Crétacé inférieur (Faurel et Laffite, 1949). Elle est localisée sur un substrat gréseux d'âge barrémien, aptien et albien (Lafitte, 1939). Le schiste est très répandu sur le versant nord et très rare sur le versant sud où il est réduit à de minces intercalations de calcaire et de marnes. Il se rencontre sur des pentes peu raides et boisées.

1.2.2 Pédologie

Le sol est développé suivant la nature de la roche mère, la végétation et les caractéristiques du climat. Au niveau de la zone centrale montagneuse, on rencontre des sols insaturés humifères, résultant de la décomposition superficielle de la roche non calcaire et qui donne des éléments grossiers en bases (les granites) et d'autres argileux et imperméables. Les sols du massif de Chélia qui sont formés par des schistes et des micaschistes ainsi que par des alluviaux argileux, sont de type rendzine. Ils sont profonds et évolués avec une litière très abondante (Tafer *et al.*, 2021).

1.3 Caractéristiques stationnelles

Après avoir effectué plusieurs sorties de reconnaissance dans notre zone d'étude, nous avons décidé de tenir compte des facteurs suivants : l'exposition, l'altitude, la présence de cet insecte défoliateur, les dégâts constatés et pris en considération, l'essence forestière. Notre aire d'étude est répartie sur quatre sites situés dans la région des Aurès, et plus précisément au niveau de la cédraie de Chélia (Fig. 17, 18, 19 et 20).

Les stations échantillonnées se localisent dans des peuplements de cèdre de l'Atlas relativement purs, avec une présence mineure du genévrier oxycèdre et du chêne vert.

Les caractéristiques des stations sont regroupées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Caractéristiques des sites prospectés.

Sites	Altitudes (m)	Latitudes	Longitudes	Exposition
Site 1	1870	35°18'31.66"N	6°37'25.48"E	Sud
Site 2	1820	35°18'16.72"N	6°37'13.69"E	Nord-ouest
Site 3	2200	35°18'49.83"N	6°38'04.47"E	Sud
Site 4	1930	35°18'11.39"N	6°36'44.36"E	Nord-ouest



Figure 17 : Photo montrant vue générale de la station 1 (Originale, 2018).



Figure 18 : Photo montrant vue générale de la station 2 (Originale, 2018).



Figure 19 : Photo montrant vue générale de la station 3 (Originale, 2018).



Figure 20 : Photo montrant vue générale de la station 4 (Originale, 2018).

1.4 Étude climatique

Le climat dépend des conditions moyennes de précipitations, de température et de vent existant à un moment donné, selon les saisons et en fonction de l'endroit où l'on se situe sur terre. La région méditerranéenne est une zone de transition entre le climat semi-aride en Afrique du Nord (sud du bassin) et le climat tempéré en Europe (nord du bassin). Elle est souvent sous l'effet des circulations synoptiques des latitudes moyennes et des variations climatiques tropicales, notamment en hiver.

Le climat de l'Algérie est essentiellement méditerranéen au nord, c'est-à-dire caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers pluvieux, et désertiques au sud où la température dépasse la moyenne. Le climat joue un rôle déterminant dans la répartition géographique ainsi que sur le nombre de générations annuel et l'abondance des chenilles processionnaires présentes dans l'écosystème forestier.

En l'absence de station météorologique au niveau du massif forestier du Chélia, nous avons été contraintes de se rabattre sur les données climatiques des stations météorologiques les plus proches, de Batna (d'Ain Skhouna) pour une période de 33 ans (1985 à 2018) et de Khenchela (El-Hamma) pour une période de 34 ans (1983 à 2017), obtenues par Belloula (2020).

1.4.1 Températures

La température constitue le principal facteur pour le contrôle de tous les phénomènes métaboliques qui agissent par leur intensité sur la distribution et sur le développement de tous les êtres vivants. Elle affecte pratiquement l'ensemble des fonctions biologiques d'espèce ectotherme. De nombreuses études ont simulé l'impact de l'augmentation de la température sur la dynamique des populations de ravageurs des cultures. Ainsi, il semble évident que les dégâts causés aux plantes vont en s'aggravant durant les prochaines décennies aux Aurès, en raison de l'augmentation du nombre de générations et du taux de consommation des plantes ainsi que l'émergence précoce des ravageurs (Gagnon *et al.*, 2013 ; Boivin, 1999).

Une analyse des données de température au niveau de 40 stations du réseau de l'Office National Météorologique lors de la période 1950-2005 a montré une augmentation de température maximale annuelle de 1,2°C et saisonnière de 1,6°C en été (Boucherf, 2010).

1.4.1.1 Températures moyennes mensuelles

L'examen du tableau (7) montre qu'au niveau de la station Batna, les valeurs les plus faibles sont enregistrées durant le mois le plus froid de l'année, à savoir janvier avec une moyenne de 5,76°C. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au mois de juillet, le mois le plus chaud, avec une moyenne de 26,43°C.

L'analyse des températures de la station de Khenchela, fait ressortir que les basses températures sont enregistrées au mois de janvier où la température minimale avoisine les 8 °C. Les hautes températures sont enregistrées au mois de juillet avec des températures maximales dépassant les 32 °C (Tab. 7).

Tableau 7 : Moyenne mensuelle des températures (°C) dans les stations de Batna et de Khenchela.

Période	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
(1985-2018) Batna	5,76	6,77	9,72	12,84	17,65	23,03	26,43	25,85	21,25	16,29	10,49	6,73
(1983-2017) Khenchela	8,40	9,47	12,30	16,57	22,38	28,48	32,83	32,26	26,32	21,59	14,09	8,68

L'analyse des données thermiques des deux stations montre l'existence d'un hiver froid très rigoureux où le minimum des moyennes mensuelles des températures est enregistré en janvier, le mois plus froid, et un été chaud où le maximum des moyennes mensuelles des températures est enregistré en juillet, le mois plus chaud (Fig. 21).

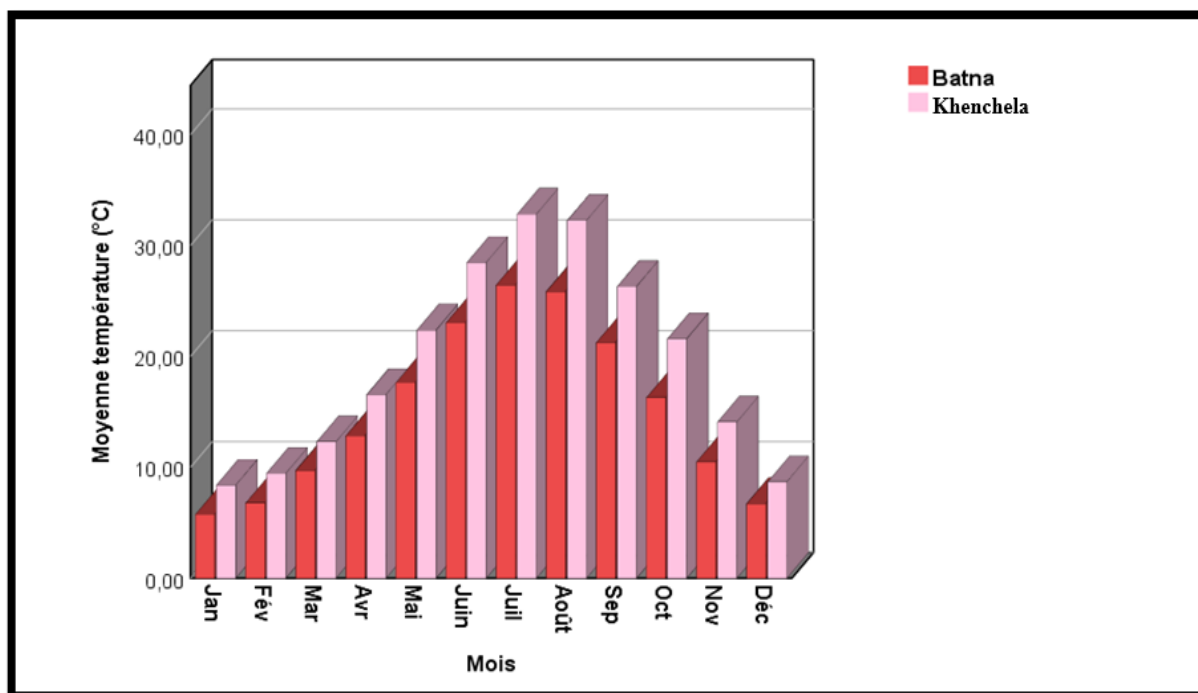


Figure 21 : Variation des moyennes des températures mensuelles pour la période 1985-2018 à Batna et pour la période 1983-2017 à Khenchela.

1.4.1.2 Amplitude thermique annuelle maximale

L'amplitude thermique annuelle maximale ou extrêmes est la différence entre la température moyenne maximale du mois le plus chaud et la température moyenne minimale du mois le plus froid.

Cette amplitude qui diminue avec l'altitude permet de définir à partir de l'indice de continentalité si la région est sous influence continentale ou maritime.

Pour situer la zone d'étude d'un point de vue continentalité thermique, nous avons calculé les amplitudes thermiques annuelles extrêmes (Tab. 8).

Tableau 8 : Indice de continentalité du Chélia d'après les deux stations de référence.

Stations	Période	M	m	M-m	Type de climat
Batna	1985 - 2018	34,5	0,3	34,2°C	Semi-Continental
Khenchela	1983 - 2017	34,7	2,74	31,96° C	Semi-Continental

Selon la classification de Debrach, le massif du Chélia correspond à un climat de type semi-continental ($25^{\circ}\text{C} < \text{M}-\text{m} < 35^{\circ}\text{C}$).

1.4.2 Pluviométrie

1.4.2.1 Précipitations

L'examen des données pluviométriques de 256 stations de la région méditerranéenne au cours des 50 dernières années met en évidence une diminution du nombre de jours pluvieux et une accentuation de la durée de périodes de sécheresse, suggérant ainsi une tendance négative des précipitations. Par ailleurs, l'intensité des précipitations extrêmes a montré une tendance positive (Alpert *et al.*, 2002). Laborde *et al.* (2010) ont indiqué que la simulation de pluie dans le nord de l'Algérie s'accorde sur une baisse annuelle de 15 %, ce qui équivaldrait à une diminution de l'ordre de 40 % de l'écoulement annuel. Dans l'Aurès, le régime pluviométrique saisonnier varie d'un massif à un autre, d'un versant à un autre d'un même massif et d'une période à une autre d'un même versant (Beghami, 2013).

Le massif de Chélia reçoit une tranche pluviométrique annuelle important allant de 900 mm à 1 200 mm. Cela peut s'expliquer par l'influence de sa haute altitude (Slimani, 2014).

1.4.2.2 Précipitations moyennes mensuelles

Le tableau 9 consigne la pluviométrie moyenne mensuelle pour Chélia à partir des stations de Batna (1985-2018) et de Khenchela (1983-2017).

Tableau 9 : Précipitation moyenne mensuelle (mm) durant les deux périodes de référence (1985-2018) et (1983-2017).

Période	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
(1985-2018) Batna	32,46	24,87	31,91	40,54	31,10	19,35	8,02	16,13	31,57	25,42	32,17	35,21
(1983-2017) Khenchela	41,06	32,08	42,35	50,89	44,22	30,16	13,13	32,31	42,74	38,82	43,77	41,29

Les précipitations mensuelles pour la région de Batna durant la période 1985-2018 sont caractérisées par un régime pluvial très marqué en mois d'avril. Les autres mois affichent un déficit hydrique remarquable, notamment au mois de juillet avec 8,02 mm (Fig. 22).

Pour la période 1983/2017, les précipitations moyennes mensuelles enregistrées à la station de Khenchela font ressortir une pluviométrie annuelle de 452,85 mm. La plus forte quantité de pluies a été enregistrée en mois d'avril de l'ordre de 50,89 mm ; et le mois de juillet reçoit la plus faible quantité de pluies avec 13,13 mm (Fig. 22).

Pour les deux stations, une tendance significative au réchauffement climatique a été observée, ce qui entraîne une augmentation de la fréquence des journées chaudes et une diminution de la fréquence des journées froides. Ces conditions dures sont aggravées par une tendance remarquable de la réduction du volume des précipitations annuelles, accentuant ainsi le déficit hydrique.

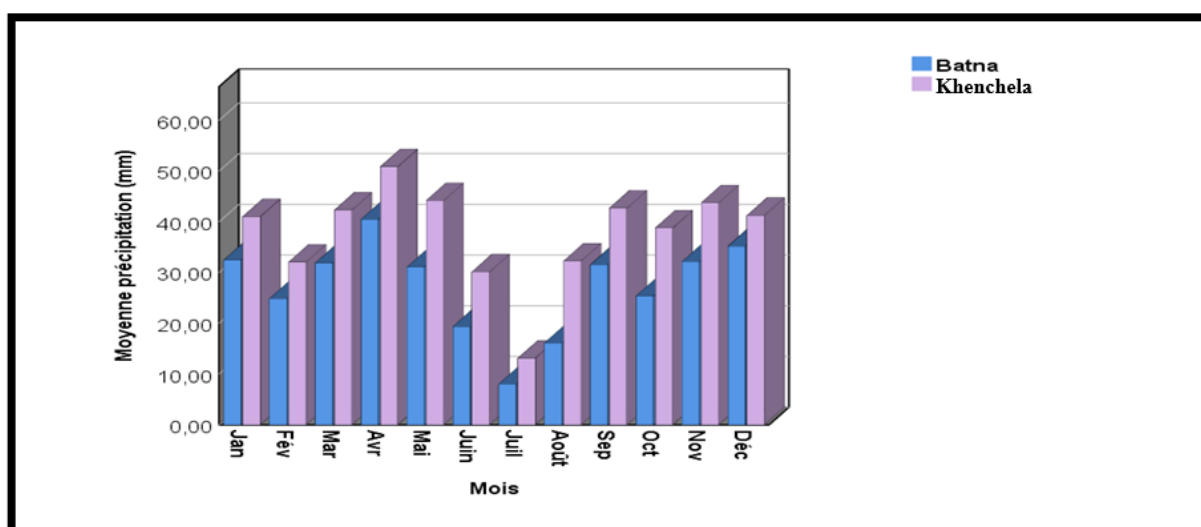


Figure 22 : Variation des moyennes des précipitations mensuelles pour la période 1985-2018 à Batna et pour la période 1983-2017 à Khenchela.

1.4.2.3 Régime pluviométrique saisonnier

Le calcul du taux de pluies pour chaque saison de l'année permet de déterminer la distribution saisonnière des précipitations et de faire ressortir le régime pluviométrique saisonnier. D'après le tableau, les précipitations au printemps sont relativement abondantes ; l'automne et l'hiver sont encore plus pluvieux. Il en ressort que l'été représente la saison la moins pluvieuse ; les précipitations y sont très rares. Il semble évident que le régime saisonnier de pluie est du type P.A.H.E, lequel type se caractérise par une pluviométrie printanière considérable, une pluviométrie automnale et hivernale remarquable et des précipitations estivales très basses. On note également une distribution irrégulière des précipitations selon les saisons ; une alternance de la saison humide et de la saison sèche.

1.4.3 La neige

La neige constitue un potentiel hydrique très important pour le sol ; son importance s'accroît encore avec la persistance de la couverture neigeuse, ce qui permet aux plantes de survivre et de résister à la sécheresse estivale. En raison de la haute altitude de notre zone d'étude, la période d'enneigement est ici plus importante que celle des vallées et des plaines de toute la région. Chélia reçoit des précipitations neigeuses de décembre à mars. Selon Boutaba (2018), la neige tombe en moyenne annuelle de l'ordre de 10 à 15 jours par an à Chélia.

1.4.4 La gelée

Les gelées apparaissent à une température inférieure à 0°C et durant une longue période, allant de novembre à avril et atteignant une fréquence maximale durant la période hivernale. Bien que les conséquences du gel sur la croissance et le développement des végétaux soient souvent négatives, force est de constater que pour le cèdre, ce phénomène climatique n'est guère dangereux. Bien au contraire, il peut être positif dans la mesure où la gelée contribue à la désarticulation des cônes, donc à la dissémination des graines et, par conséquent, à la régénération du cèdre (Toth, 1978).

1.4.5 Autres facteurs climatiques

1.4.5.1 Le vent

Le vent a un effet direct sur la température, l'humidité de l'air et l'activation de l'évapotranspiration. Au Chélia, les vents sont souvent de deux directions :

1.4.5.1.1 Les vents sud- ouest :

Secs et chauds (sirocco), ces vents surviennent fréquemment en juillet et peuvent atteindre une moyenne de 10 jours. Parfois ils se produisent très tôt, dès le printemps avec une vitesse

moyenne de 1,71 m/s causant des dégâts incommensurables sur la végétation. Ils entraînent aussi une chute brutale de l'humidité et une augmentation notable de la température.

1.4.5.1.2 Les vents nord-ouest :

Ces vents sont fréquents en automne, en hiver et une partie de printemps, avec une vitesse allant jusqu'à 7,5 m/s.

1.4.5.2 L'humidité de l'air

L'humidité relative est un facteur environnemental important pour de nombreux organismes, surtout pour les végétaux. Il est à noter que la quantité d'eau que l'air peut accueillir dépend de la pression et de la température et, par conséquent, de l'altitude où l'humidité à haute altitude est plus importante qu'à basse altitude. D'après Quézel (1980), l'humidité de l'air constitue, par ses écarts brutaux, le caractère climatique le plus important des montagnes de l'Afrique du nord. Les valeurs les plus élevées d'humidité sont enregistrées pendant la période hivernale (décembre, janvier et février), tandis que la période estivale, particulièrement en juillet et août, est caractérisée par une sécheresse de l'air.

1.4.6 Synthèse climatique

1.4.6.1 Diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gaussen

Le diagramme ombrothermique de Gaussen est une représentation graphique permettant d'estimer les éléments climatiques d'une région d'un point de vue de température et de précipitation durant une période donnée. Il permet parallèlement de préciser les périodes humides et sèches (Dajoz 1971). Bagnouls et Gaussen (1953) considèrent que le mois sec est déterminé lorsque le total des précipitations moyennes exprimé en (mm) est égal ou inférieur au double de la température moyenne de ce mois ($P < 2T$). Ce diagramme révèle également une présence de deux saisons contrastées, la saison sèche correspond à la saison chaude et la saison froide correspond à la saison pluvieuse.

L'examen des deux diagrammes ombrothermiques montre que le climat de notre région d'étude est caractérisé par une période sèche assez longue qui dure 5 mois et demi. Elle commence au mois de mai et se prolonge jusqu'au mois d'octobre dans la région de Batna (Fig. 23), alors qu'à Khenchela (Fig. 24) la période sèche dure presque 5 mois, en s'étalant du mois de mai jusqu'au mois d'octobre.

Les deux diagrammes ombrothermiques indiquent généralement une accentuation de sécheresse.

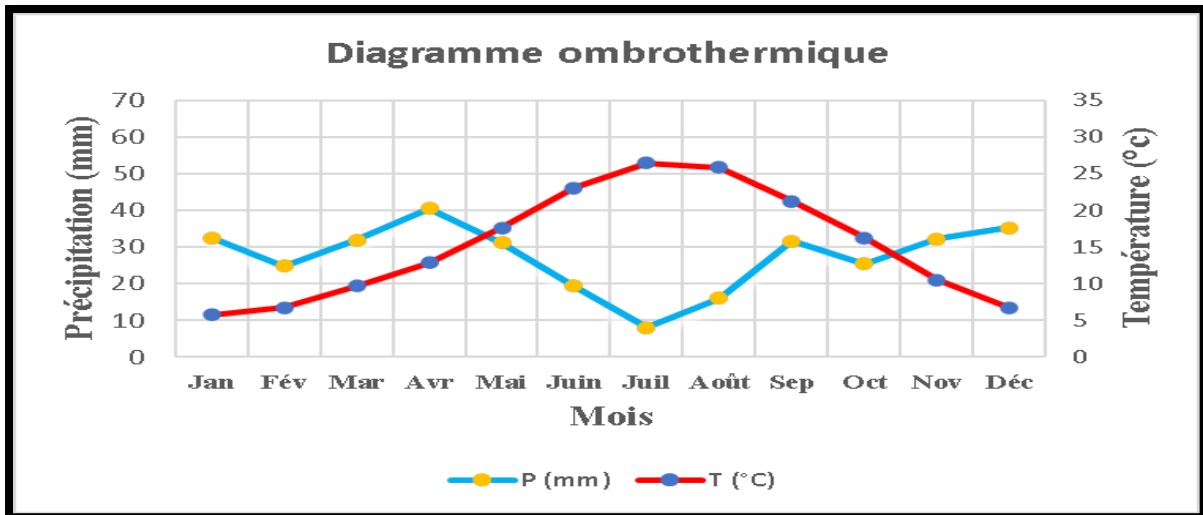


Figure 23 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson (Batna : 1985-2018).

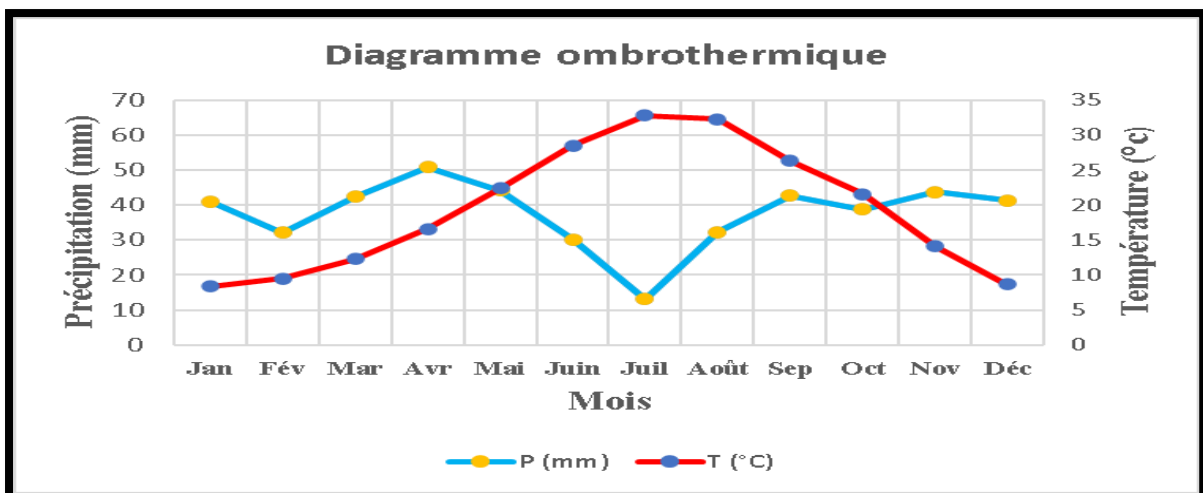


Figure 24 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson (Khenchela : 1983-2017).

Conclusion

La présente étude a mis en évidence un climat méditerranéen de type semi-continentale contrasté dans la cédraie du Chélia. L'été y est chaud et sec, de mai jusqu'à fin septembre selon la station de Batna, et de juin à la moitié de septembre selon la station de Khenchela. Ces valeurs baissent selon que l'on remonte en altitude.

L'analyse bioclimatique montre aussi que notre zone d'étude appartient à l'étage bioclimatique semi-aride à variante fraîche caractérisée par des conditions climatiques sévères. Cela est dû à l'accentuation de la sécheresse qui s'est produite au cours des dernières décennies avec l'augmentation de la température, les effets du vent (Sirocco) soufflant du sud et le déficit pluviométrique.

2. Méthodologie adoptée

La cédraie de Chélia subit, chaque année, les effets d'attaque sévères de la chenille processionnaire du pin qui s'y est largement installée et qui connaît, ainsi, une augmentation fulgurante en populations. La phase de gradation de l'insecte entraîne des attaques répétées qui se manifestent par des défoliations massives dans la cédraie de Chélia.

Pour comprendre ce fléau, nous avons développé une étude expérimentale sur le terrain et au laboratoire. Le but est de recueillir un maximum de données ayant trait aux pontes de *T. pityocampa* qui représentent le facteur déterminant de l'état de l'infestation, de collecter des informations quant aux facteurs écologiques régissant leur distribution et de déterminer l'évolution interannuelle de la relation entre la processionnaire du pin et ses parasitoïdes embryonnaires dans le contexte de l'extension de l'aire de répartition de cet insecte ravageur. La démarche scientifique adoptée est axée sur des aspects distincts. Le premier concerne le suivi de la dynamique interannuelle de population de la processionnaire du pin évoluant sur le cèdre de l'atlas en provenance de la forêt de Chélia. Le but de cette étape est de mesurer leurs conséquences à la fois sur la survie et la fécondité de l'espèce et sur l'altération des relations avec ses ennemis naturels. La deuxième étape est consacrée à une étude approfondie sur la fécondité des femelles pondeuses. Quant au 3^{ème} aspect de l'étude, il portera sur la détermination des facteurs de régulation biologique dans le cadre de la contribution des parasitoïdes oophages de l'insecte en question au contrôle des niveaux de populations de la processionnaire du pin.

2.1 Echantillonnage et collecte des pontes

Après l'éclosion des chenilles de *Thaumetopoea pityocampa*, un total de 422 pontes a été recueilli, d'une manière aléatoire et à une hauteur accessible du massif, durant les mois de septembre et octobre de l'année 2017, 2018 et 2019 et ce, dans les quatre sites choisis de la cédraie de Chélia (Fig. 25).

Chaque ponte a été collectée sur un arbre différent d'une seule essence pour éviter les différences entre populations qui se produisent en raison de l'effet de la plante hôte (Arnaldo et Torres, 2006). A noter que la plante-hôte de la chenille processionnaire du pin est le cèdre de l'Atlas. L'échantillonnage a été réalisé durant trois années consécutives, il tend à mesurer l'évolution interannuelle du taux de parasitisme. En 2017, un total de 240 pontes a été collecté le long des 4 sites présentés précédemment, à raison de 60 pontes par site. En 2018, 116 pontes ont été prélevées sur les mêmes sites que l'année précédente (47 pontes en site 1, 20 pontes en

site 2, 35 pontes en site 3 et 14 pontes en site 4). En 2019, un total de 66 pontes a été recueilli dans les stations fortement infestées (44 pontes en site 1 et 22 pontes en site 3).

Une diminution du nombre de pontes a été observée entre les années considérées le long de la voie d'expansion de l'espèce, car les populations de la processionnaire du pin sont moins importantes et les pontes deviennent ainsi moins faciles à trouver. Après plusieurs sorties de prospection et d'expérimentation sur terrain durant la dernière année d'échantillonnage sur les différents sites, nous avons constaté qu'il est quasiment absent de l'insecte considéré.



Figure 25 : Récolte des pontes de *T.pityocampa* à Chélia (Originale, 2018).

2.2 Étude des paramètres morphométriques du matériel biologique

Chaque ponte récoltée est soumise à des mensurations de longueur et de largeur à l'aide d'un pied à coulisse électronique (Fig. 26). Les lots de pontes mesurées sont misés séparément dans des tubes en verre (10 x 1 cm) numérotés, fermés avec du coton aux deux côtés pour assurer l'aération. Ils ont été stockés, par la suite, au laboratoire dans des conditions de température ambiante de $26 \pm 1^\circ\text{C}$ (Fig. 27). En outre, des observations quotidiennes ont été effectuées afin de contrôler l'émergence des parasitoïdes. Notons que tous les parasitoïdes émergés ont été conservés à l'aide d'alcool puis identifiés et comptés.



Figure 26 : Biométrie des pontes à l'aide d'un pied à coulisse électronique (Originale, 2017).



Figure 27 : Pontes de la processionnaire du pin conservées dans des tubes en verre (Originale, 2017).

2.3 Dénombrement des catégories des œufs

Après l'émergence de toutes les espèces de parasitoïde, les pontes ont été écaillées à l'aide d'un ruban adhésif afin de dénombrer les différentes catégories d'œufs de chaque lot (Fig. 28).

À partir du diamètre des trous de sorties, nous avons établi les catégories des œufs suivantes :

1 – Œufs éclos : Ces œufs ont un trou de sortie circulaire caractéristique des chenilles de processionnaire du pin. Ce sont des chenilles qui se sont développées avec succès en larves.

2 – Œufs non éclos : Ces œufs n'ont pas de trous d'émergence. Ils contiennent soit une larve morte (la mortalité naturelle des chenilles), soit un parasitoïde en diapause ou vide.

3 – Œufs parasités : Ces œufs présentent un trou d'émergence plus petit que celui de la chenille.

Nous avons réalisé, un comptage pour chaque statut d'œufs.

Ceci correspond à la méthode de Morel (2008) qui établit trois statuts pour le dénombrement des œufs :

- ❖ Œuf percé d'un gros trou qui correspond à la sortie de la chenille
- ❖ Œuf percé d'un petit trou qui correspond à la sortie d'un parasite oophage
- ❖ Œuf non éclos.

Nous avons obtenu ainsi des données concernant : l'effectif total des œufs de la processionnaire du pin, l'éclosion des chenilles, la mortalité naturelle des chenilles au stade embryonnaire et le parasitisme total.

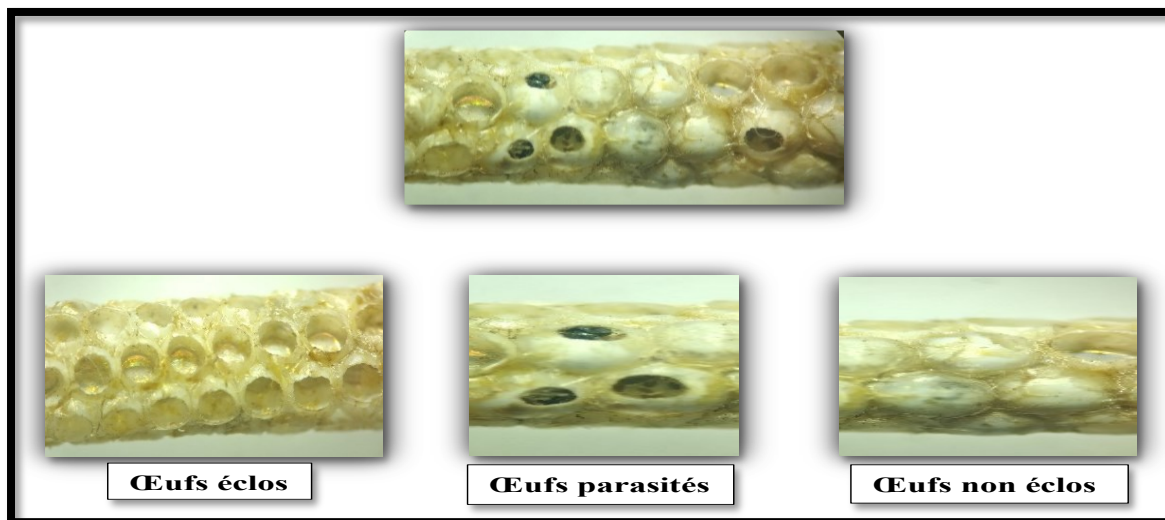


Figure 28 : Photos montrant les catégories d'œufs de la processionnaire du pin (Originale, 2019).

2.4 La fécondité réelle

Sous loupe binoculaire, nous avons procédé au comptage du nombre total d'œufs par ponte qui est égal au nombre d'œufs par rangée longitudinale multiplié par le nombre d'œufs par rangée circulaire du manchon plus ou moins une erreur type qu'on va déterminer en comptant le nombre d'œufs exact pour 10 pontes (Zamoum, 1998).

2.5 Taux d'éclosion

Les trous de sortie des chenilles néonates de la processionnaire du pin ont une forme circulaire de grande taille comparativement aux trous de sortie des parasites qui peuvent occuper toute la face supérieure de l'œuf. Afin d'évaluer la population des chenilles du premier stade larvaire, on procède au calcul du taux d'éclosion réel des pontes :

$$\text{Taux d'éclosion} = \frac{\text{Nombre d'œufs éclos}}{\text{Nombre total d'œufs pondus par la femelle}} \times 100$$

2.6 Taux de parasitisme

Les différentes espèces de parasitoïdes d'œufs sont capables de parasiter les pontes pendant toute la durée de l'embryogenèse de la processionnaire du pin. Le parasitisme commence dès que les œufs sont pondus par la femelle et peut encore avoir lieu quand la chenille est parfaitement formée dans l'œuf (Schmidt *et al.*, 1999).

Selon Imbert (2012), l'œuf parasité présente un trou d'émergence caractéristique plus petit que celui de la chenille et généralement excentré de l'axe de l'œuf.

Afin de calculer le taux de parasitisme, on comptabilise le nombre de trous de sortie caractéristique de chaque parasitoïde selon la formule de Schmidt *et al.* (1993) comme suit :

$$\text{Taux de parasitisme} = \frac{\text{Nombre d'œufs parasités}}{\text{Nombre total d'œufs dans l'œuplaque}} \times 100$$

2.7 Taux d'œufs avortés :

Le taux d'œufs avortés (non féconds) présente à l'intérieur un embryon de chenille à un stade plus ou moins avancé de développement. Il est calculé selon la formule préconisée par Ciesla *et al.* (2011).

$$\text{Taux d'œufs avortés} = \frac{\text{Nombre d'œufs vides (sans meconium)}}{\text{Nombre total d'œufs pondus}} \times 100$$

2.8 Contrôle des émergences des principaux parasitoïdes

Pour évaluer les facteurs de mortalité des populations de *T. pityocampa* et quantifier leur action pendant la période d'émergence, tous les parasitoïdes émergés seront comptés au fur et à mesure de leur apparition afin de tirer des informations sur la courbe des émergences (Fig. 29 et 30).



Figure 29 : Ponte parasitée (Originale, 2018).

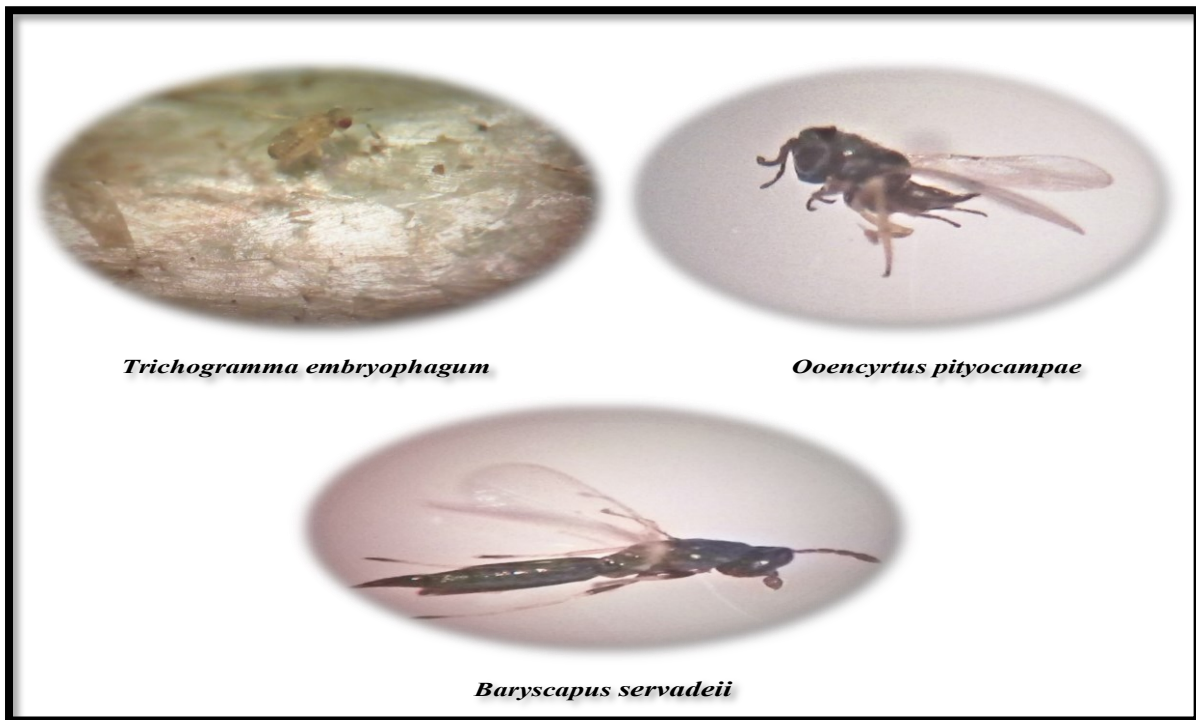


Figure 30 : Photos représentent les parasitoïdes oophages actifs de la processionnaire du pin (Originale, 2018).

2.9 Identification des parasitoïdes

Les œufs parasités examinés à la loupe binoculaire après l'émergence des parasitoïdes présentent trois statuts d'ouverture (Fig. 31) :

- 1- Œuf parasité par *Baryscapus servadeii* caractérisé par un trou ayant un diamètre plus réduit et qui se localise sur le flanc.
- 2- Œuf parasité par *Ooencyrtus pityocampae* a un petit trou arrondi et se localise au centre de l'œuf.
- 3- Œuf parasité par *Trichogramma embryophaguma* qui correspond à un très petit trou et qui est souvent situé sur les deux parties extrêmes des pontes, lesquelles ne sont pas protégées en totalité par des écailles.



Figure 31 : Photos montrant les trous d'émergence des parasitoïdes oophages (Originale, 2019).

2.10 Etude de la dynamique de parasitisme

Afin de déceler la dynamique de parasitisme de chaque parasitoïde, les pontes ont été divisées en neuf compartiments de haut en bas et ce, pour déduire le compartiment le plus convoité par les parasitoïdes (Fig. 32). Pour chaque compartiment, nous avons noté le nombre d'œufs parasités et des parasitoïdes trouvés (Schmidt *et al.*, 1999).



Figure 32 : distribution des parasitoïdes dans les différents secteurs des oothèques de la processionnaire du pin (Originale).

Les parasitoïdes peuvent être considérés comme des hyperparasites qui jouent un rôle important dans le maintien et l'évolution de la dynamique des populations du ravageur. Ses actions limitent potentiellement la prochaine génération (Lebreton, 2009). La compétition interspécifique entre deux ou plusieurs espèces - à choisir un seul hôte - est bien connue surtout lorsque les niches écologiques, ovo larvaire et nymphale sont occupées par des espèces (Hezil, 2019). La compétition est l'interaction entre les individus qui partagent un même besoin pour une nourriture disponible en quantités limitées, entraînant une réduction du taux de survie, de croissance et de reproduction d'individus en compétition (Goubault, 2003).

2.11 Exploitation des résultats par les analyses statistiques

Plusieurs méthodes de traitement statistique ont été effectuées pour avoir des informations sur :

- La population de la processionnaire du pin et l'action que peuvent avoir certains facteurs de milieu comme l'altitude et l'exposition
- L'évolution de l'insecte et ses parasitoïdes oophages
- La structure et la composition des pontes.

Toutes les analyses statistiques ont été traitées avec le logiciel SPSS en version 25.

2.11.1 Analyse descriptive

L'analyse descriptive est une étape préliminaire du traitement des données. Elle consiste à synthétiser les données quantitatives et qualitatives pour en tirer des informations utiles et les préparer en vue d'une analyse complémentaire.

Cette analyse est utile dans la mesure où elle permet de fournir des informations de base sur les variables d'un ensemble de données, de mettre en évidence les relations potentielles entre différentes variables et d'identifier les variations dans le temps. Il existe trois grands types d'analyse descriptive : l'analyse de la distribution, l'analyse de la tendance centrale (moyenne, médiane, mode, etc) et l'analyse de la dispersion (variance, écart-type, etc).

2.11.2 Distribution fréquentielle

Une distribution de fréquence est une représentation, sous forme graphique ou tabulaire, qui affiche le nombre d'observations dans un intervalle donné. La taille de l'intervalle dépend des données analysées et des objectifs de l'analyste. Les intervalles doivent être mutuellement exclusifs et exhaustifs.

Les distributions de fréquences sont généralement utilisées dans un contexte statistique. Généralement, elles peuvent être associées à la représentation graphique d'une distribution normale. L'utilisation d'une distribution de fréquence permet d'en savoir plus sur le contenu des données et de prendre des décisions sur la structure des données. A noter que ces données sont classées, puis regroupées dans un nombre restreint de classes.

Cette analyse est conduite afin de regrouper en classe les pontes en fonction de leur biométrie et de leur nombre d'œufs.

2.11.3 Régression linéaire

L'analyse de régression sert à prévoir la valeur d'une variable en fonction de la valeur d'une autre variable. Elle cherche à établir une relation linéaire entre une variable, dite expliquée, et une ou plusieurs variables, dites explicatives.

La régression linéaire consiste en la détermination d'une droite ou d'une surface qui réduit les écarts entre les valeurs de sortie prévues et réelles. Elle permet de mettre en corrélation différentes variables.

L'analyse a été effectuée pour tirer les corrélations et déduire les équations qui décrivent significativement les relations entre le nombre d'œufs et la taille des pontes.

2.11.4 Analyse de variance

L'analyse de la variance (ANOVA) est une formule statistique utilisée pour comparer les variances entre la ou les moyennes de différents groupes. Elle est utilisée dans de nombreux scénarios pour déterminer s'il existe une différence entre les moyennes de différents groupes. Ce test s'applique lorsque l'on mesure une ou plusieurs variables explicatives catégorielles qualitatives qui influencent la distribution d'une variable continue.

Ce traitement a été effectué pour tester les différences significatives entre les moyennes des mensurations des pontes, le dénombrement des œufs et les parasitoïdes oophages de la processionnaire du pin.

2.11.5 Analyse croisée

L'analyse croisée dérive de l'analyse canonique, elle permet d'avoir des informations sur la relation entre deux variables prises en considération. Elle est représentée par une boîte de 50 % de variation de la population qui borde un point central représentant la médiane ainsi que des étendues de variation de 50% en haut et en bas de la boîte. Les F observés et les probabilités de signification sont déterminés pour chaque combinaison de variables étudiées et qui sont des variables liées aux pontes en relation avec la longueur des pontes.

TROISIEME CHAPITRE : RESULTATS



TROISIEME CHAPITRE
RÉSULTATS

1. Analyse du matériel biologique**1.1 Analyses biométriques des pontes**

Les résultats des mensurations des pontes de la processionnaire du pin en provenance des 4 sites prospectés entre les années d'échantillonnage sont regroupés dans le tableau 10.

Tableau 10 : Analyse descriptive des pontes de la processionnaire du pin

Année	2017				2018				2019	
Sites	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 1	Site 3
Effectif total des pontes	60	60	60	60	47	20	35	14	44	22
Longueurs moyenne des pontes (mm)	33,32 ± 7,90	29,54 ± 7,55	31,13 ± 5,80	31,45 ± 6,17	27,06 ± 5,37	26,37 ± 4,46	28,68 ± 6,24	27,40 ± 6,24	24,84 ± 7,45	24,60 ± 6,69
Valeurs extrêmes des longueurs des pontes (mm)	22,11 - 67,92	17,05 - 51,19	20,98 - 45,66	22,75 - 60,8	16,76 - 50,39	18,15 - 36,09	16,69 - 50,95	16,72 - 42,02	3,11 - 40,19	7,33 - 36,14
Coefficient de variation des longueurs des pontes (%)	23,70	25,55	18,63	19,61	19,84	16,91	21,75	22,77	29,87	28,29
Diamètre moyen des pontes (mm)	8,97 ± 1,42	5,79 ± 2,83	8,77 ± 1,44	8,78 ± 1,43	8,04 ± 1,40	8,16 ± 1,77	8,46 ± 1,46	7,51 ± 1,30	7,55 ± 1,65	7,93 ± 1,28
Valeurs extrêmes des diamètres des pontes (mm)	5,63 - 12,37	1,73 - 11,46	4,73 - 12,88	5,49 - 11,56	5,02 - 11,41	5,6 - 11,76	4,94 - 11,21	5,01 - 9,12	4,44 - 11,75	5,43 - 11,23
Coefficient de variation des diamètres des pontes (%)	15,83	48,87	16,41	16,28	17,41	21,69	17,25	17,31	21,85	16,14

En 2017, les longueurs des pontes varient en moyenne de 29,54 mm à 33,32 mm avec des écarts-type et des coefficients de variation comparables entre eux. Les valeurs extrêmes obtenues varient de 17,05 mm dans le site 2 à 67,92 mm dans le site 1.

Les diamètres moyens des pontes varient entre 5,79 mm et 8,97 mm respectifs dans le site 2 et 1. Les valeurs extrêmes varient de 4,94 mm à 11,76 mm. Le coefficient de variation comparable entre eux à l'exception des pontes récoltées dans la station 2 dont le coefficient de variation est plus de 48%.

En 2018, les longueurs moyennes des pontes varient de 26,37 mm à 28,68 mm avec des écarts-type comparables entre eux. Les valeurs extrêmes des longueurs des pontes varient de 16,69 mm dans le site 3 à 50,95 mm dans le site 3.

Les diamètres moyens des pontes varient entre 7,51 mm et 8,46 mm respectifs dans le site 4 et 3. Les valeurs extrêmes des diamètres des pontes varient de 4,94 mm à 11,76 mm.

En 2019, les longueurs des pontes mesurées varient en moyenne de $24,60 \pm 6,69$ mm dans le site 3 à $24,84 \pm 7,45$ mm dans le site 1. Les valeurs extrêmes des longueurs des pontes varient de 3,11 mm dans le site 1 à 40,19 mm dans le même site.

Les diamètres moyens des pontes varient entre $7,55 \pm 1,65$ mm et $7,93 \pm 1,28$ mm respectif dans le site 1 et 3. Les valeurs extrêmes des diamètres des pontes varient de 4,44 mm à 11,75 mm.

D'après les résultats obtenus, les données recueillies dans la cédraie de Chélia sont variables d'un site à l'autre et d'une année à l'autre.

Cette variation a concerné l'analyse des variables altitudes, expositions et environnementales.

Nous avons procédé à une comparaison des moyennes par Anova pour tirer des informations sur la signification (Tab.11).

Tableau 11 : Anova des longueurs des pontes.

ANOVA					
Longueurs des pontes (mm)					
Source	Somme des carrés	Ddl	Carré moyen	F	Probabilité
Intergroupes	1178,891	1	1178,891	27,208	,000
Intragroupes	15338,336	354	43,329		
Total	16517,227	355			

Le tableau d'ANOVA décompose la variance de longueurs en deux composants : un composant intergroupe et un composant intragroupe. Le rapport F est un rapport de l'estimation intergroupe par rapport à l'estimation intragroupe, dans ce cas est égal à 27,208.

Comme la valeur de la probabilité est égale à $p = 0,000$ pour le test F qui est inférieur à 0,05, une différence très hautement significative entre les moyennes des longueurs des pontes d'une année à l'autre durant la période d'étude (Fig. 33).

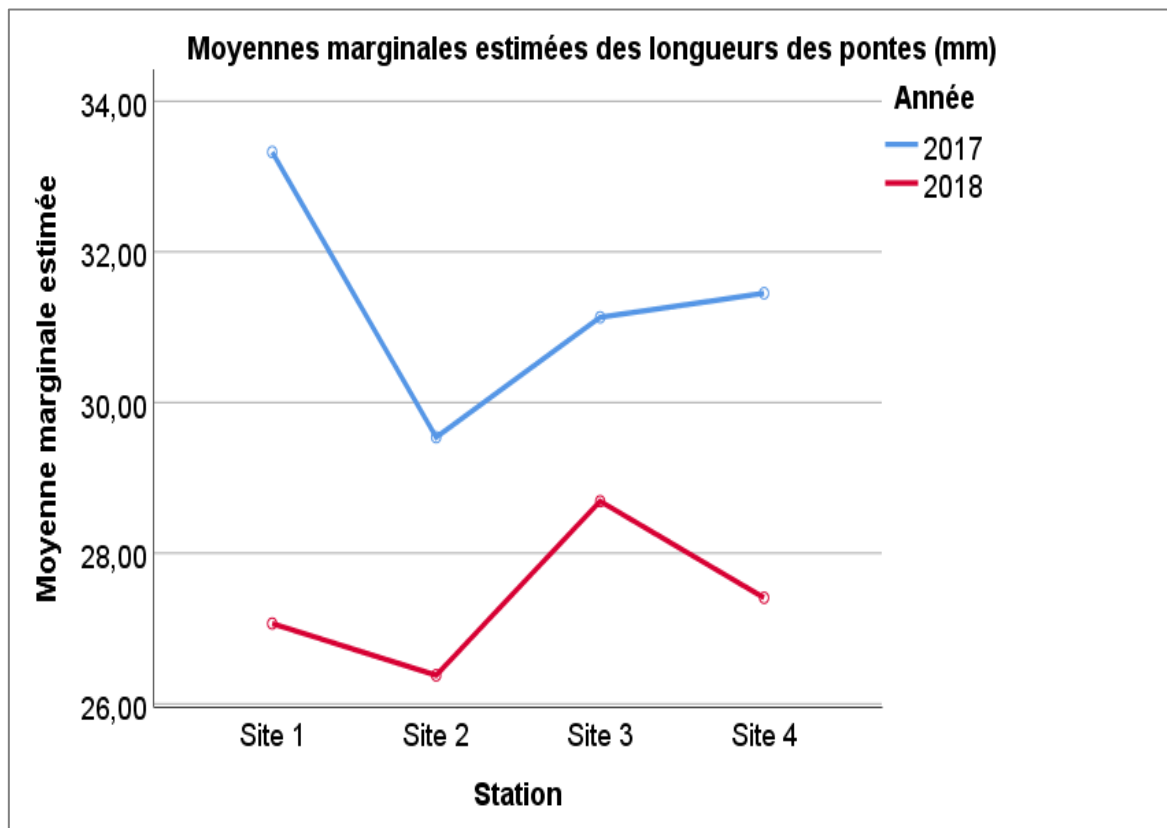


Figure 33 : Comparaison des moyennes de longueurs des pontes dans les quatre stations.

Nous avons procédé à une comparaison des moyennes par Anova, reporté dans le tableau 12 afin de tirer des résultats plus fiables.

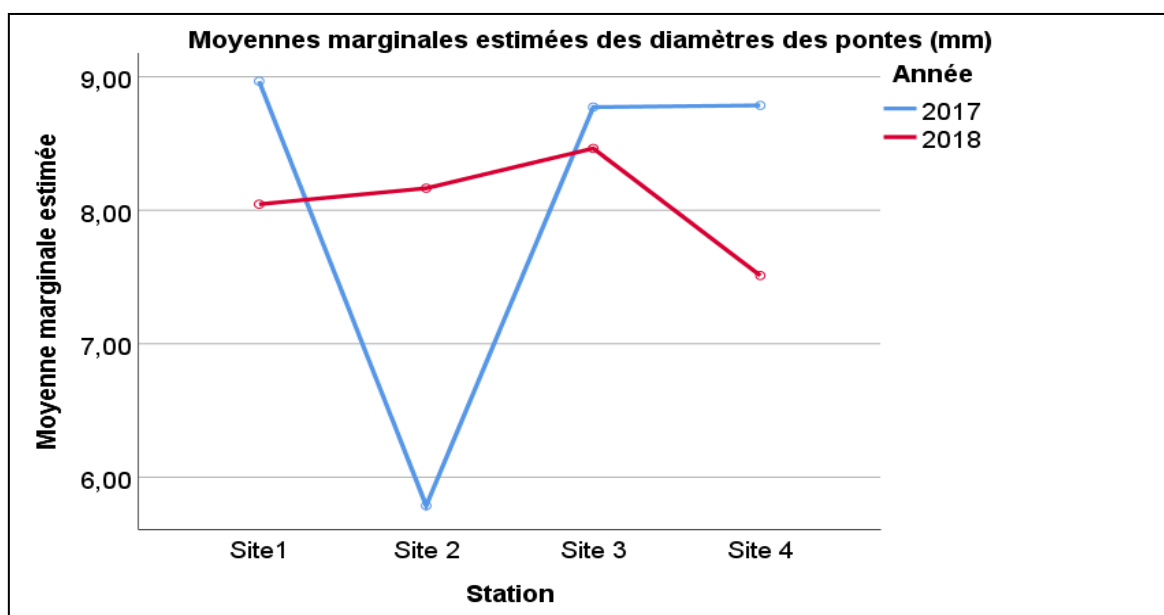
Tableau 12 : Anova des diamètres des pontes

Tests des effets inter sujets					
Variable dépendante : Diamètres des pontes (mm)					
Source	Somme des carrés de type III	Ddl	Carré moyen	F	Signification
Modèle corrigé	431,221 ^a	7	61,603	19,814	,000
Constante	17482,047	1	17482,047	5623,004	,000
Station	115,217	3	38,406	12,353	,000
Année	,068	1	,068	,022	,882
Station * année	126,477	3	42,159	13,560	,000
Erreur	1081,940	348	3,109		
Total	24836,314	356			
Total corrigé	1513,161	355			

a. R-deux = ,285 (R-deux ajusté = ,271)

La valeur de la probabilité est égale à $p = 0,000$ pour le test F qui est inférieur à 0,05, une différence statistiquement très hautement significative entre les moyennes des diamètres des pontes d'un niveau de station à l'autre au niveau de confiance de 95,0%.

Comme la valeur de la probabilité pour le test F est supérieure à 0,05 ($p = 0,882$), il n'y a pas une différence significative entre les moyennes des diamètres des pontes durant ces trois années considérées (Fig. 34).

**Figure 34** : Comparaison des moyennes de diamètre des pontes dans les quatre stations.

1.2 Comparaison planifiée pour les longueurs de pontes

Pour plus d'informations, le test LSD a été effectué pour comparer deux à deux les populations considérées dans les biotopes prospectés. Le tableau 13 met en évidence les significations possibles.

Tableau 13 : Test des étendues multiples pour les longueurs de pontes

Test LSD ; Variable Longueurs des pontes (mm)				
Différences significatives marquées à $p < ,05000$				
Stations	{1}	{2}	{3}	{4}
Site {1}				
Site {2}	,003			
Site {3}	,083	,208		
Site {4}	,139	,131	,800	

La comparaison des longueurs des pontes en provenance de la station 1 montre une différence hautement significative avec les longueurs des pontes récoltées dans la station 2, par contre la comparaison des longueurs des pontes en provenance de la station 1 ne montre pas de différence significative avec les stations 3 et 4.

1.3 Comparaison planifiée pour les diamètres de pontes

Le tableau 14 utilise la procédure des comparaisons multiples pour déterminer les moyennes qui sont significativement différentes les unes des autres.

Tableau 14 : Test des étendues multiples pour les diamètres de pontes

Test LSD ; Variable Diamètres des pontes (mm)				
Différences significatives marquées à $p < ,05000$				
Stations	{1}	{2}	{3}	{4}
Site {1}				
Site {2}	,000			
Site {3}	,573	,000		
Site {4}	,598	,000	,971	

Le site 1 montre une différence très hautement significative avec les diamètres des pontes récoltées dans le site 2, par contre avec les sites 3 et 4 il n'y a pas de différence significative. Une différence très hautement significative a été observée au niveau du site 2 avec les sites 1, 3 et 4.

1.4 Analyse fréquentielle des longueurs des pontes

L'analyse fréquentielle a été réalisée afin de regrouper les catégories en classes des longueurs des pontes de la processionnaire du pin.

Les classes des longueurs des pontes dans les quatre sites prospectés s'ajustent à une loi normale sont illustrées dans la figure 35. La probabilité calculée est très hautement significative ($p=0,0001$).

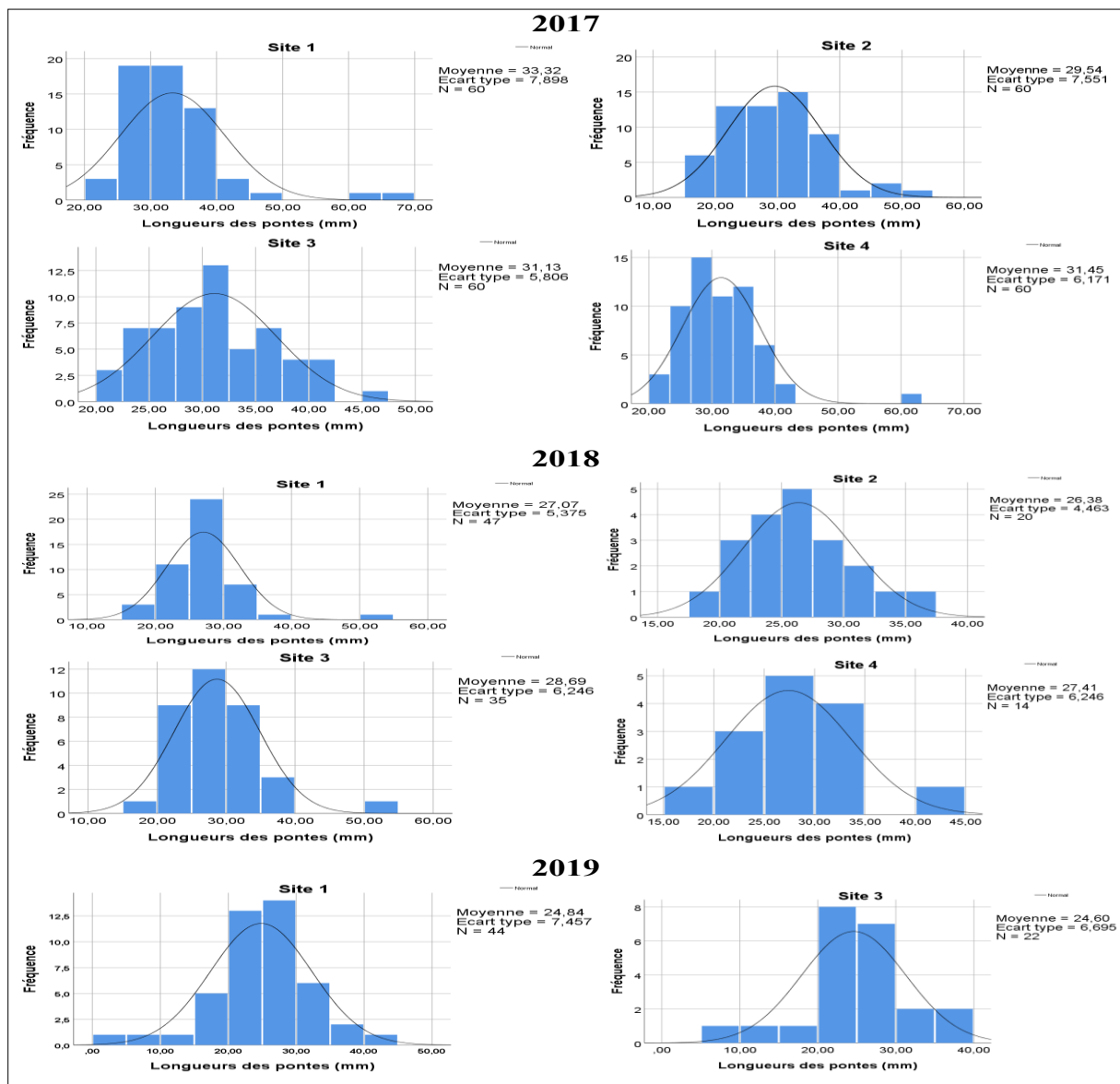


Figure 35 : Catégories des longueurs des pontes récoltées dans les sites prospectés.

L'analyse fréquentielle des longueurs des pontes en provenance de site 1 en 2017 fait ressortir huit classes s'ajustant à une loi normale, soit environ 63 % des pontes ont une longueur comprise de 25-35 mm concernent le plus grand nombre d'observations. La probabilité calculée est très hautement significative ($P=0,0001$).

Le second site regroupe huit classes dont la longueur des pontes renfermant entre 30 et 35 mm représente 25 % de l'effectif global de 60 cas.

Le troisième site regroupe un maximum des classes soient 10 classes, un pourcentage de 21 % à des longueurs appartenant à la classe 30 et 32,5 mm.

Le quatrième site renferme huit classes s'ajustant à une loi normale, 25 % ayant des longueurs comprises entre 26,66 et 30 mm avec une différence très hautement significative ($p=0,0001$).

En 2018, la longueur des pontes en provenance de site 1 définit six classes s'ajustant à une loi normale dont la longueur des pontes renfermant entre 25 et 30 mm représente 51,06 %.

Huit classes en provenance de site 2, soit 25 % des pontes ont une longueur comprise de 25-27,5 mm concernent le plus grand nombre d'observations.

Dans le site 3 six classes sont définies, la classe la plus significative de 25 à 30 mm représente 34,28 %.

Pour le site 4 regroupé cinq classes de distribution, 35 % ont des longueurs variantes entre 25-30 mm ont été observées sur 14 cas.

En 2019, les longueurs des pontes issues de site 1 définissent neuf classes dont la longueur des pontes les plus représentatives renfermant entre 25 et 30 mm représente 31,81 %.

Le site 3 regroupe sept classes, un pourcentage de 35 % à des longueurs mesurant entre 20 et 25 mm totalise un effectif de 22 cas.

Les données recueillies mettent en évidence une différence entre les lots testés provenant des quatre stations ($p=0,0001$).

1.5. Analyse fréquentielle des diamètres des pontes

L'analyse fréquentielle présentée par la figure 36 montre que les données considérées s'ajustent à une loi normale avec une probabilité très hautement significative ($p=0,0001$).

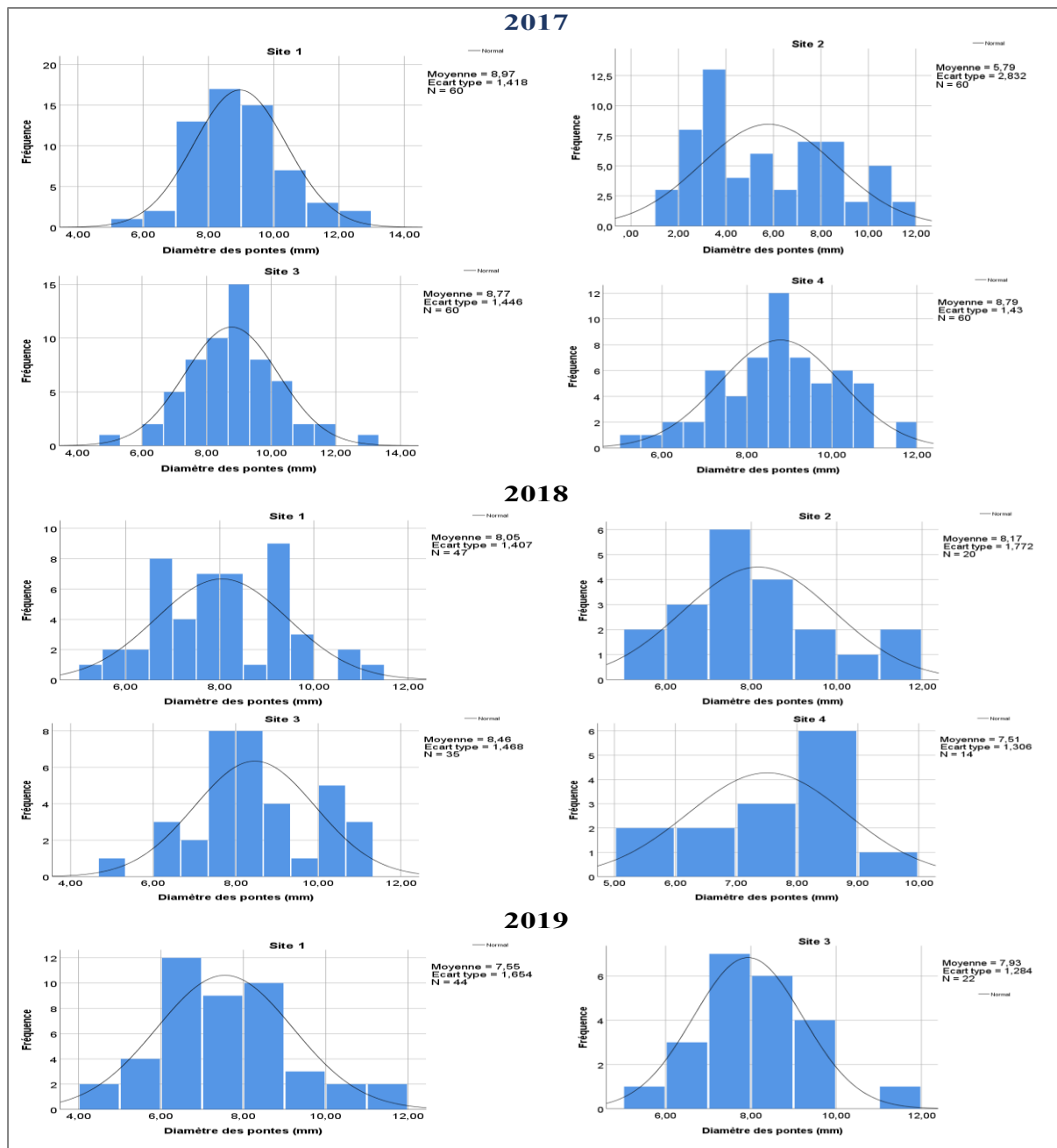


Figure 36 : Catégories des largeurs des pontes récoltées dans les sites prospectés.

La distribution fréquentielle des diamètres met en évidence différentes classes en relation avec la courbe de Gauss pour les lots récoltés dans les sites prospectés. Les pontes ayant un diamètre compris entre 8 et 9 mm présentent la classe la plus significative, renfermant le plus grand nombre d'observations.

Les classes inférieures à 6 mm représentent un nombre très limité d'observations à l'exception du site deux (2017) dont l'analyse fréquentielle fait ressortir des effectifs importants des diamètres compris entre 1 mm et 6 mm.

Les diamètres supérieurs à 12 mm caractérisent un minimum d'observations.

2. Analyse des effectifs des œufs

Les résultats de comptage des œufs de la processionnaire du pin sont reportés dans le tableau 15.

Tableau 15 : Analyse descriptive du nombre des œufs

Année	2017				2018				2019	
Sites	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 1	Site 3
Effectif total des pontes	60	60	60	60	47	20	35	14	44	22
Effectif total des œufs	19373	18602	17816	18325	14131	5857	11490	4178	11563	7551
Effectif moyen par pont	324,55 ± 86,05	307,83 ± 74,87	296,93 ± 64,63	304,58 ± 73,21	298,53 ± 73,23	292,85 ± 81,45	328,29 ± 75,99	298,43 ± 66,78	262,80 ± 65,52	274,09 ± 76,89
Valeurs extrêmes des œufs	187- 676	200- 546	147- 442	180- 644	182- 598	165- 486	200- 630	180- 418	144- 464	152- 459
Coefficient de variation des œufs (%)	26,51	24,32	21,76	24,03	24,53	27,81	23,14	22,37	24,93	28,05

Les 422 pontes prélevées sur le cèdre de l'Atlas et dans l'ensemble des sites prospectés au niveau de la forêt de Chélia pour les trois années d'échantillonnage ont permis d'analyser au total 128 886 œufs soit une moyenne de (301,38 ±75,694) œufs par pont.

Sur la base des résultats enregistrés, les pontes en provenance de la station 1 comptent une moyenne de 324,55, 298,53 et 262,80 respectivement pour les années 2017, 2018 et 2019 avec des coefficients de variation comparable. Il s'avère que le nombre d'œufs dans cette station est plus conséquent que celui dans les autres stations donc le premier site présente une fécondité des femelles de la processionnaire plus conséquente.

Les valeurs extrêmes notées varient de 144 pour les pontes récoltés en 2019 à 200 pour les deux années 2017 et 2018.

Pour chaque année d'études, nous avons comparé les moyennes des effectifs des œufs quantifiés sur les pontes entre les différentes stations à l'aide d'une analyse de la variance (Fig. 37).

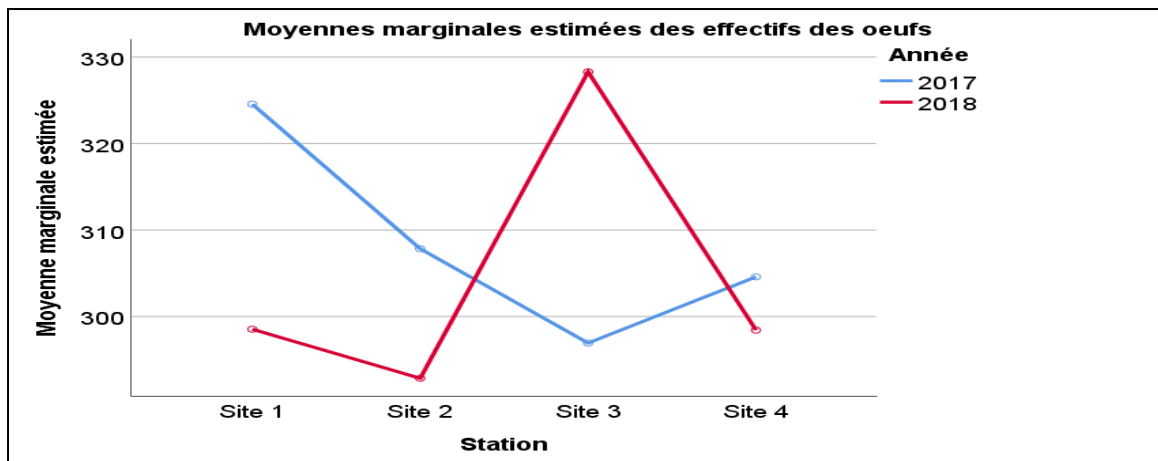


Figure 37 : Comparaison des effectifs moyens des œufs dans les différentes zones d'étude.

L'analyse de la variance fait apparaître une variabilité entre le nombre d'œufs en provenance des 4 stations. Les pontes collectées sur les différents sites étudiés en 2018 ont significativement moins d'œufs que les pontes collectées sur les différents sites étudiés en 2017.

Dans la cédraie de Chélia, la fertilité des femelles est très conséquente et le potentiel dynamique chez les femelles pondueuses de *Thaumetopoea pityocampa* est assez élevé.

2.1 Comparaison planifiée des effectifs des œufs

Pour plus d'informations, le test LSD a été effectué pour comparer deux à deux les populations considérées dans les biotopes prospectés. Le tableau 16 met en évidence les significations possibles.

Tableau 16 : Test des étendues multiples pour l'effectif des œufs

Test LSD ; Variable L'effectifs des œufs				
Différences significatives marquées à $p < ,05000$				
Stations	{1}	{2}	{3}	{4}
Site {1}				
Site {2}	,224			
Site {3}	,045	,427		
Site {4}	,147	,813	,577	

La comparaison des œufs des pontes quantifier en provenance de la station 1 montre une différence significative avec les œufs des pontes récoltées dans le site 3 par contre la comparaison des œufs des pontes en provenance de la station 1 ne montre pas de différence significative avec les sites 2 et 4.

2.2 Analyse fréquentielle des effectifs des œufs

Une analyse fréquentielle de dénombrement des œufs a été effectuée pour déterminer la répartition des effectifs en classes pour les lots récoltés dans 4 sites prospectés (Tab. 17).

Tableau 17 : Analyse fréquentielle des effectifs des œufs

2017							
Site 1		Site 2		Site 3		Site 4	
Classes	Taux (%)	Classes	Taux (%)	Classes	Taux (%)	Classes	Taux (%)
150-200	1,66	200-225	11,66	125-150	1,66	150-200	1,66
200-250	11,66	225-250	8,33	175-200	6,66	200-250	18,33
250-300	30	250-275	15	200-225	8,33	250-300	31,66
300-350	26,66	275-300	16,66	225-250	3,33	300-350	25
350-400	18,33	300-325	16,66	250-275	20	350-400	18,33
400-450	5	325-350	6,66	275-300	13,33	400-450	1,66
450-500	1,66	350-375	8,33	325-350	15	450-500	1,66
500-550	1,66	375-400	8,33	350-375	6,66	600-650	1,66
550-600	1,66	400-425	1,66	375-400	8,33		
650-700	1,66	450-475	1,66	400-425	3,33		
		500-525	3,33	425-450	1,66		
		525-550	1,66				

2018							
Site 1		Site 2		Site 3		Site 4	
Classes	Taux (%)	Classes	Taux (%)	Classes	Taux (%)	Classes	Taux (%)
166-200	4,25	150-200	10	200-250	11,42	150-200	14,28
200-233	17,02	200-250	15	250-300	20	225	7,14
233-266	14,89	250-300	35	300-350	35,42	250-300	14,28
266-300	19,14	300-350	20	350-400	35,42	300-350	50
300-333	12,76	350-400	10	400-450	2,85	375	7,14
333-366	14,89	450	5	600-650	2,85	425	7,14
366-400	14,89	500	5				
566-600	2,12						

2019			
Site 1		Site 3	
Classes	Taux (%)	Classes	Taux (%)
133-166	4,54	150-200	22,72
166-200	13,63	200-250	18,18
200-233	15,90	250-300	9,09
233-266	22,72	300-350	20,90
266-300	18,18	350-400	4,54
300-333	9,09	450-500	4,54
333-366	11,36		
400-433	2,27		
433-366	2,27		

P=0,0001***

L'analyse fréquentielle des œufs quantifiés sur les pontes en provenance de site 1 durant l'année 2017 définit plusieurs classes s'ajustant à une loi normale. La probabilité calculée est très hautement significative ($p=0,0001$).

La troisième classe, représentée par 18 cas, regroupe un maximum d'observations renfermant entre 250 et 300 œufs.

La dernière classe se limite 1 cas dont le nombre d'œufs est compris entre 650 et 700.

Les pontes en provenance de site 2 définissent un maximum des classes s'ajustant à une loi normale avec une probabilité calculée très hautement significative ($p=0,0001$). La première classe, représentée par 7 cas, regroupe les pontes ayant entre 200 à 225 œufs.

Les pontes ayant 275 à 325 œufs regroupent un maximum d'observations, soit 10 pontes,

La dernière classe se limite une seule ponte dont le nombre d'œufs est compris entre 525 et 550.

Les classes des effectifs des pontes dans le site 3 s'ajustent à une loi normale. La cinquième classe regroupe un maximum d'observations, soit 12 pontes, renfermant entre 250 et 275 œufs.

La sixième classe, représentée par 8 cas, regroupe les pontes ayant entre 275 à 300 œufs. La septième classe regroupe les pontes ayant 325 à 350 œufs avec 9 pontes.

Pour les pontes en provenance de site 4, cette analyse définit huit classes s'ajustant à une loi normale. La probabilité calculée est très hautement significative ($p=0,0001$).

La seconde et la cinquième classes représentées par 11 cas, regroupent les pontes ayant respectivement entre 200 à 250 et entre 350 à 400. La troisième classe regroupe les pontes ayant 250 à 300 œufs avec 19 pontes.

Le même constat a été obtenu avec les pontes en 2018, l'analyse fréquentielle des œufs quantifiés définit quatre classes en provenance de la station 1 s'ajustant à une loi normale. La probabilité calculée est très hautement significative ($p=0,0001$).

La première classe regroupe les pontes ayant 166 à 200 œufs avec 2 observations.

La quatrième classe représentée par un maximum d'observation, soit 9 cas, regroupe les pontes ayant entre 266 à 300 œufs. La dernière classe regroupe les pontes ayant 566 à 600 œufs avec 1 ponte.

Au niveau de la station 2, l'analyse fréquentielle définit cinq classes s'ajustant à une loi normale. La troisième classe représentée par 7 observations regroupe les pontes ayant entre 250 à 300 œufs. La quatrième classe regroupe les pontes ayant 300 à 350 œufs avec 4 pontes.

Les pontes en provenance de station 3 définissent six classes s'ajustant à une loi normale. La probabilité calculée est très hautement significative ($p=0,0001$). Les classes regroupent un maximum d'observations, soit 11 pontes, renfermant entre 300 et 400 œufs.

Les pontes en provenance de station 4 définissent trois classes s'ajustant à une loi normale.

La classe représentée un maximum d'observations, soit 7 pontes, regroupe les pontes ayant entre 300 à 350 œufs.

En 2019, L'analyse fréquentielle des œufs quantifiés sur les pontes en provenance de la station 1 définit neuf classes s'ajustant à une loi normale.

La quatrième classe regroupe un maximum d'observations, soit 10 pontes, renfermant entre 233 et 266 œufs.

Les pontes en provenance de la station 3, l'analyse fréquentielle définit six classes s'ajustant à une loi normale.

3. Relation entre la biométrie des pontes et le nombre des œufs

Afin de déterminer l'influence de longueur des pontes sur le nombre d'œufs pour les quatre sites d'expérimentation, une corrélation a été représentée dans les figures 38, 39, 40 et 41.

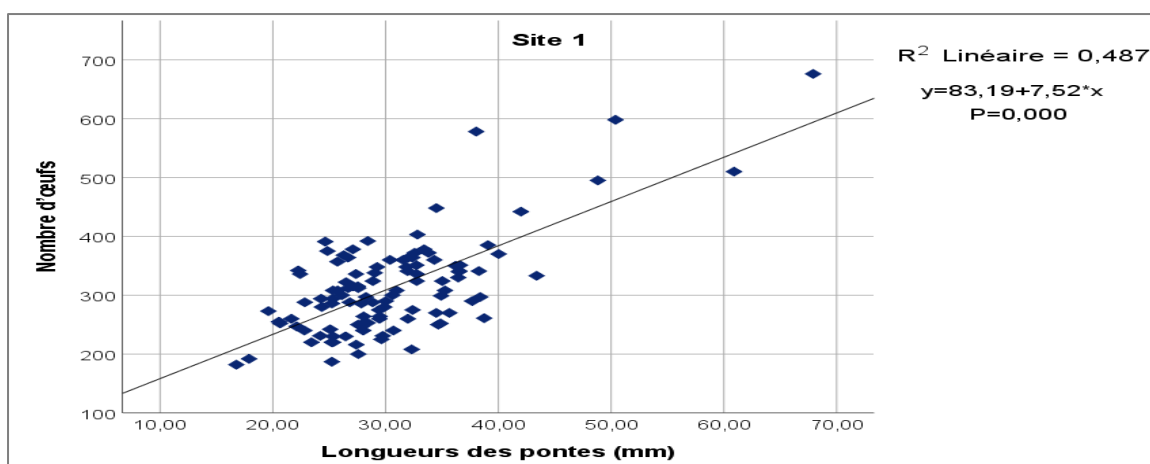


Figure 38 : Relation entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs au niveau du site 1.

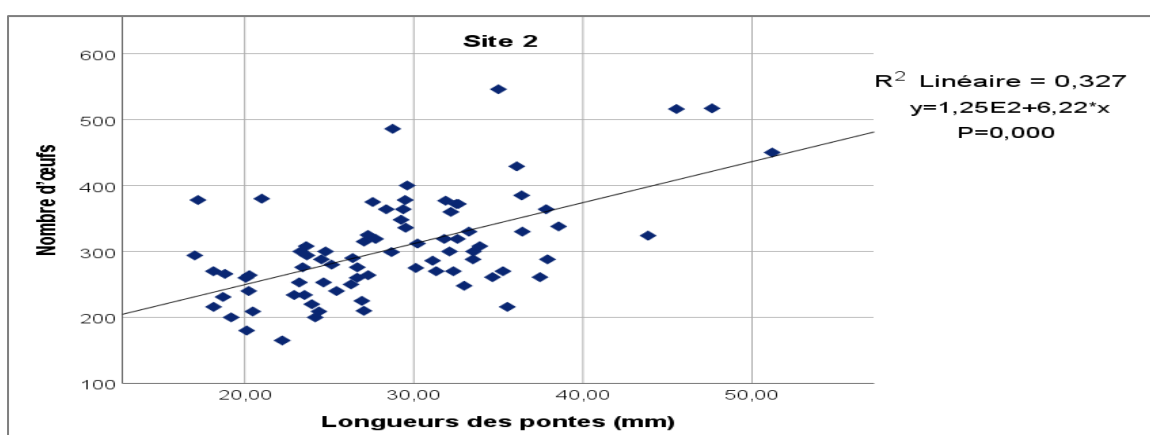


Figure 39 : Relation entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs au niveau du site 2.

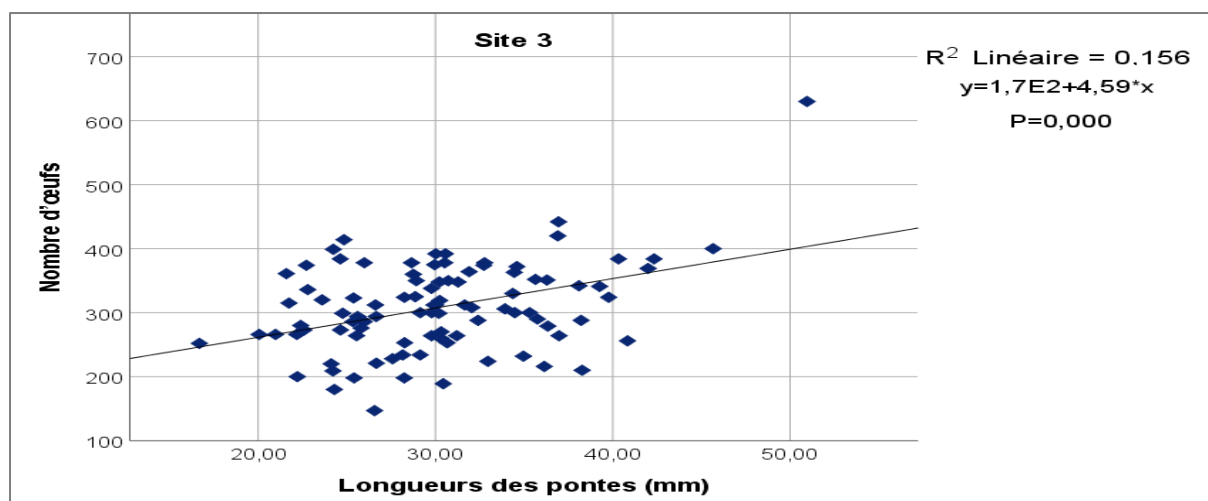


Figure 40 : Relation entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs au niveau du site 3.

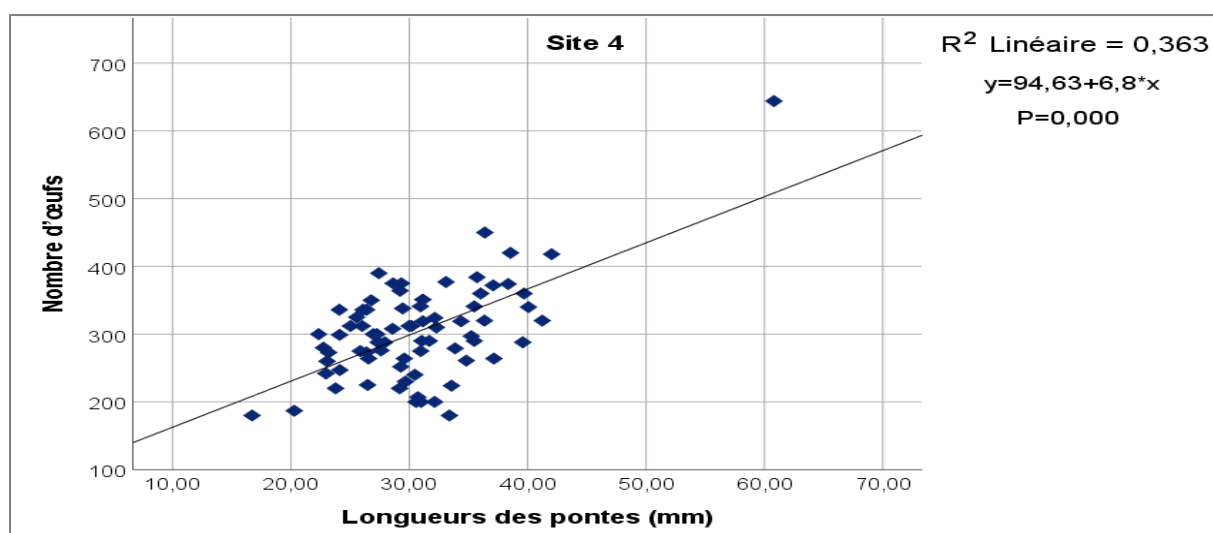


Figure 41 : Relation entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs au niveau du site 4.

L'analyse de la régression linéaire montre que la longueur des pontes et le nombre d'œufs sont positivement corrélés.

Ceci indique qu'il existe une relation très forte entre les deux variables avec une probabilité très hautement significative ($p=0,000$).

4. Analyse croisée entre les longueurs des pontes et le nombre d'œufs

Afin de tirer des données plus explicatives nous avons pris en considération le rapport des analyses croisées entre les longueurs des pontes et les effectifs des œufs pondus par les femelles de la processionnaire. Les rapports des analyses croisées entre les deux variables considérées dans les quatre sites correspondants sont illustrés dans les figures 42 à 45.

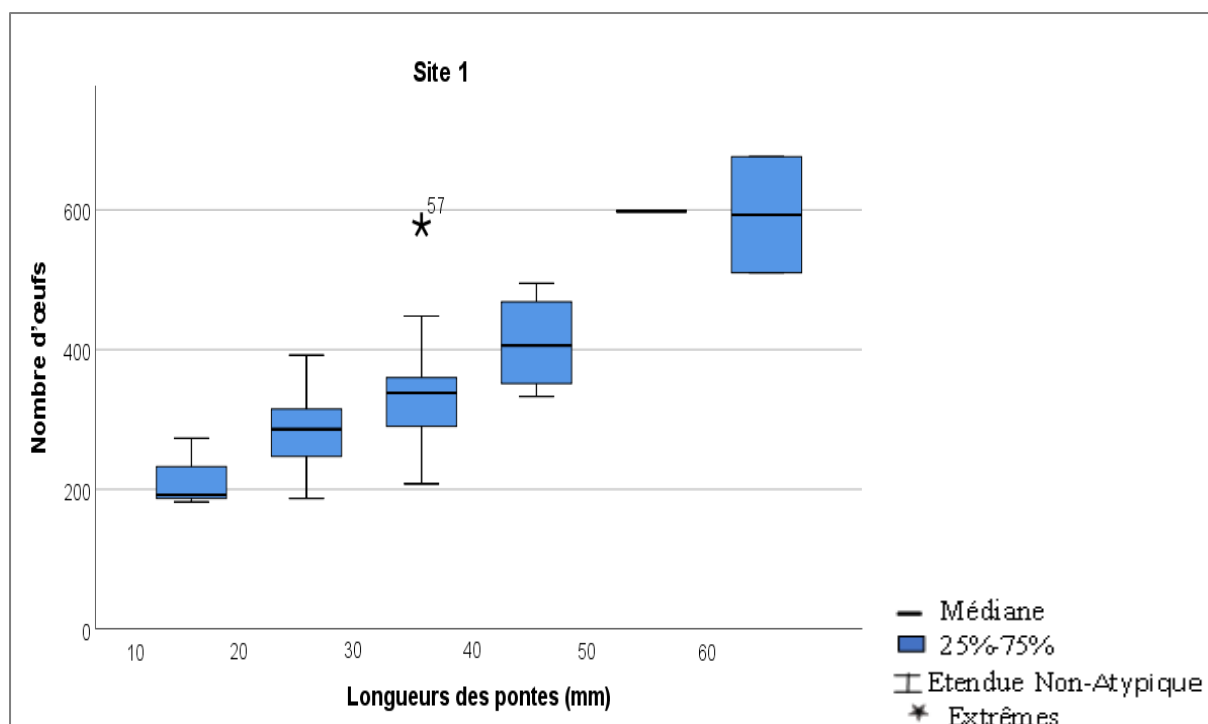


Figure 42 : Distribution du nombre d'œufs en fonction des longueurs des pontes dans le premier site

Au niveau du site 1, six catégories de classes de longueurs en relation avec le nombre d'œufs sont mises en évidence, il apparaît qu'à la première catégorie la valeur médiane est de 200 œufs pour la classe des longueurs des pontes de 10 à 20 mm, avec une variabilité allant de 190 à 280 œufs. L'examen de la classe comprise entre 20 et 30 mm met en évidence une valeur médiane de 290 œufs avec une variabilité allant de 190 à 400 œufs. A la troisième catégorie représente des longueurs comprises entre 30 et 40 mm avec une valeur médiane de 350 œufs et une variabilité des étendues allant de 200 à 450 œufs, avec une valeur extrême de 590 œufs est notée. La quatrième classe comprise entre 40 et 50 mm avec une valeur médiane de 400 œufs et une variabilité allant de 330 à 500 œufs. La dernière classe représente des longueurs supérieures à 60 mm avec une valeur médiane de 600 œufs et une variabilité des étendues allant de 500 à 700 œufs est notée.

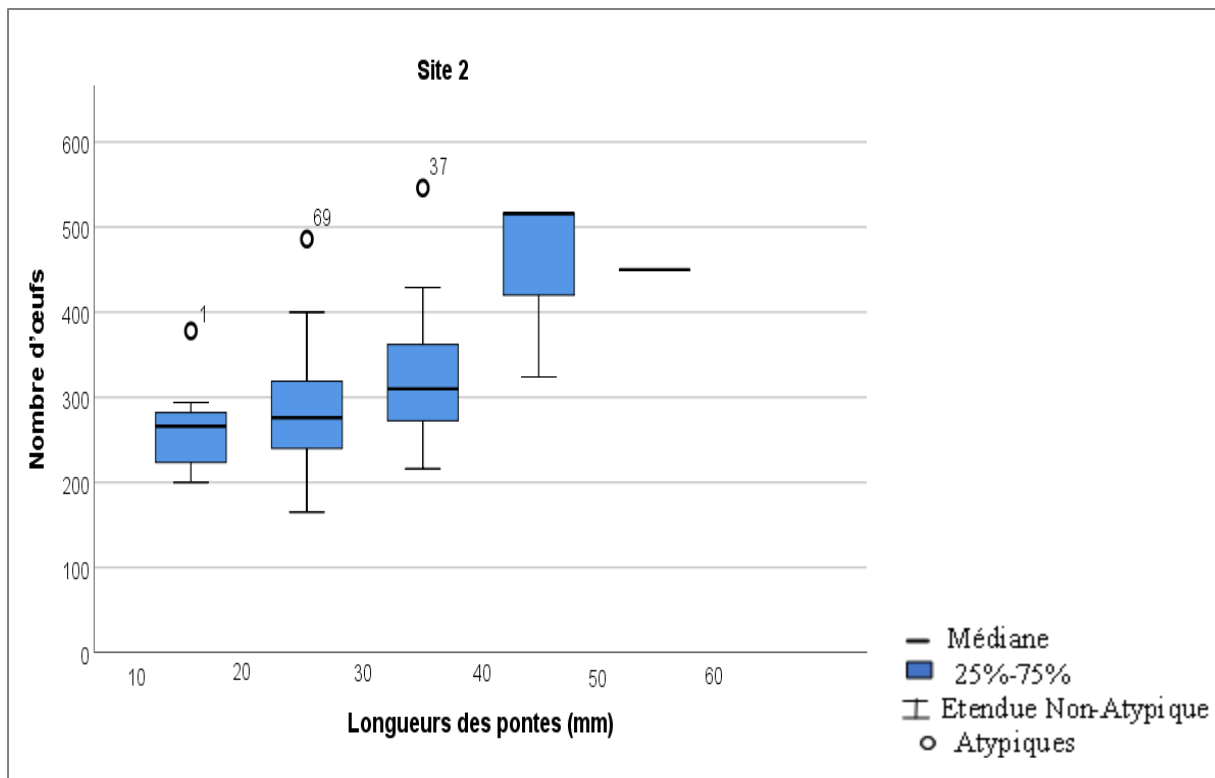


Figure 43 : Distribution du nombre d'œufs en fonction des longueurs des pontes dans le second site

Existence de cinq catégories de classes de longueurs de pontes en relation avec le nombre d'œufs dans le site 2, A la première catégorie la valeur médiane est de 265 œufs pour des pontes de 10 à 20 mm avec une variabilité allant de 200 à 300 œufs. La deuxième classe comprise entre 20 et 30mm compte de 165 à 400 œufs avec une valeur médiane de 270 œufs. L'examen de la classe comprise entre 30 et 40 mm met en évidence une valeur médiane de 310 œufs présente une variabilité allant de 210 à 420 œufs. La quatrième catégorie de longueurs comprise entre 40 et 50 mm regroupe 320 à 510 œufs avec une valeur médiane de 510 œufs, la cinquième classe de longueurs comprise de 40 à 50 mm avec une valeur médiane de 450 œufs. La répartition des valeurs médianes et de leurs étendues est très hétérogène.

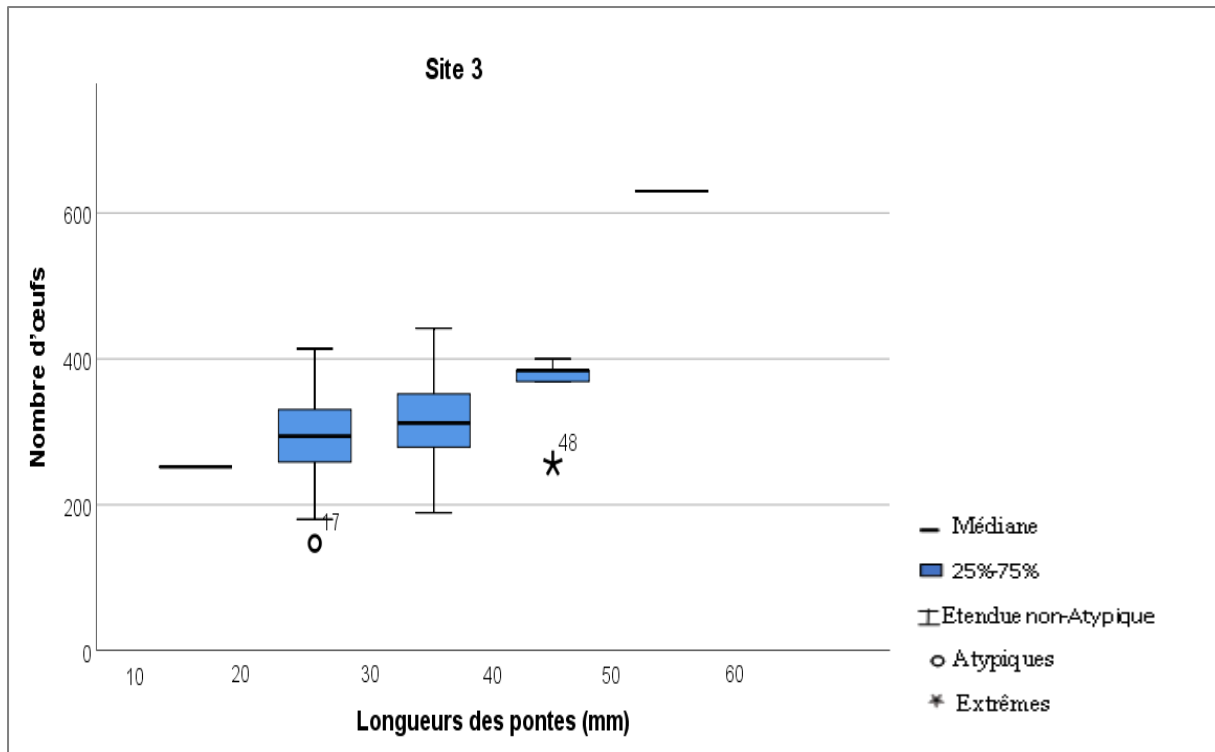


Figure 44 : Distribution du nombre d'œufs en fonction des longueurs des pontes dans le troisième site

En considérant cinq catégories de classes de longueurs de pontes en relation avec le nombre d'œufs pour le site 3, il apparaît qu'à la première catégorie la valeur médiane est de 250 œufs pour la classe des longueurs des pontes de 10 à 20 mm. L'examen de la classe comprise entre 20 et 30 mm met en évidence une valeur médiane de 300 œufs avec une variabilité allant de 180 à 410 œufs, avec une valeur atypique de 150 œufs est notée. A la troisième catégorie représente des longueurs comprises entre 30 et 40 mm avec une valeur médiane de 310 œufs est notée et une variabilité allant de 190 à 450 œufs. La quatrième classe met en évidence une valeur médiane de 380 œufs, avec une valeur extrême de 260 œufs est notée. La cinquième classe représente des longueurs comprises entre 50 et 60 mm avec une valeur médiane de 630 œufs. Les valeurs médianes croissent d'une catégorie de longueur à l'autre.

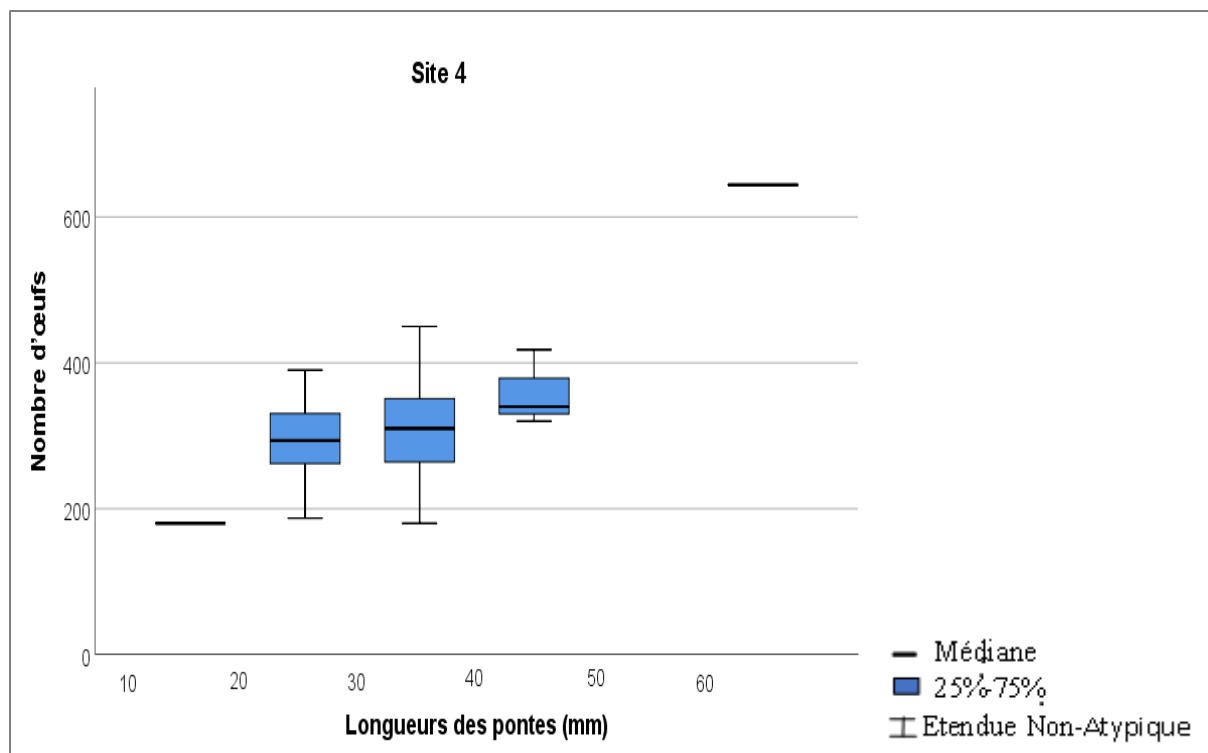


Figure 45 : Distribution du nombre d'œufs en fonction des longueurs des pontes dans le dernier site

Cinq catégories de classes de longueurs de pontes en relation avec le nombre d'œufs sont représentées dans le site 4, il apparaît qu'à la première catégorie la valeur médiane est de 180 œufs pour la classe des longueurs des pontes de 10 à 20 mm. La deuxième classe comprise entre 20 et 30 mm avec une variabilité allant de 190 à 390 œufs. L'examen de la classe comprise entre 30 et 40 mm met en évidence une valeur médiane de 310 œufs avec une variabilité allant de 180 à 460 œufs est notée. A la quatrième catégorie représente des longueurs comprises entre 40 et 50 mm avec une valeur médiane de 340 œufs et une variabilité des étendues allant de 320 à 420 œufs est notée. La cinquième classe représente des longueurs supérieures à 60 mm avec une valeur médiane de 650 œufs. La répartition des valeurs médianes et de leurs étendues est très hétérogène.

5. Analyse des catégories d'œufs

Le tableau 18 reporte la synthèse des données de dénombrement des catégories d'œufs

Tableau 18 : Analyse descriptive des catégories d'œufs examinées

Année	2017				2018				2019	
Sites	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 1	Site 3
Effectif total des œufs éclos	12931	13900	12401	14177	11109	4736	8829	3532	8769	5872
Effectif moyen par ponte des œufs éclos	215,52	231,67	206,68	236,28	236,36	236,80	252,26	252,29	199,30	197,50
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
Valeurs extrêmes des œufs éclos	31-432	11-465	5-356	75-508	9-500	4-456	103-426	123-360	62-385	0-423
Taux d'éclosion (%)	66,75	74,72	69,61	77,36	78,61	80,65	76,84	84,54	75,84	77,76
Effectif total des œufs non éclos	2982	2649	2402	2325	1483	874	1358	550	1200	667
Effectif moyen par ponte des œufs non éclos	49,70	44,15	40,03	38,75	31,55	43,70	38,80	39,29	27,27	30,32
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
Valeurs extrêmes des œufs non éclos	9-561	6-185	3-193	2-99	9-95	4-175	7-110	11-144	3-76	5-135
Taux de mortalité (%)	15,39	14,24	13,48	12,69	10,49	14,99	11,82	13,16	10,38	8,83
Effectif total des œufs parasité	3460	2053	3013	1823	1539	247	1303	96	1594	1012
Effectif moyen par ponte des œufs parasité	57,67	34,22	50,22	30,38	32,74	12,35	37,23	6,86	36,23	46,00
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
Valeurs extrêmes des œufs parasité	31-437	27-123	36-645	29-251	31-887	10-287	33-22	5-23	35-885	32-705
Taux de parasitisme (%)	17,86	11,04	16,91	9,95	10,89	4,36	11,34	2,30	13,79	13,40

Le nombre moyen des œufs éclos par ponte varie en moyenne de 215, 231, 206 et 236 respectivement pour les sites 1, 2, 3 et 4 en 2017.

Les populations des sites 1 et 3 ont un taux d'éclosion plus faible (66,40% et 69,61%) que les populations des sites 2 (75,26%) et site 4 (77,58%).

Le taux de mortalité naturelle des embryons de processionnaire du pin varie en moyenne de 12,72% à 15,31%. Le taux de parasitisme varie en moyenne de 9,98% à 17,77%.

Le taux d'éclosion des chenilles de *T. pityocampa* a été pour les sites 1, 2, 3 et 4 respectivement de 79,17%, 80,86%, 76,84% et 84,54% en 2018.

Le nombre d'œufs non éclos varie en moyenne de 31,55 œufs soit un taux de 10,57% dans le site 1 à 43,70 œufs dans le site 2 soit un taux de 14,92%. Le nombre d'œufs parasités varie en moyenne de 2,30 œufs dans le site 4 à 11,34 œufs parasités dans le site 3.

Il s'avère que le succès à l'éclosion des chenilles dans les sites 2 et 4 est plus conséquent que celui dans le site 1 et 3. Nous constatons également que le premier site se caractérise par un nombre d'œufs non éclos plus élevé que toutes les autres populations en 2017, par contre leur nombre est plus faible que celui dans le reste des sites pour les années 2018 et 2019. Par conséquent le taux de parasitisme plus faible observé dans les sites 2 et 4.

6. Comparaison des diverses catégories d'œufs

La comparaison des moyennes des œufs éclos, non éclos et œufs parasités entre les différentes zones étudiées représentées par les figures 46 et 47 afin de mettre en évidence les variations générales.

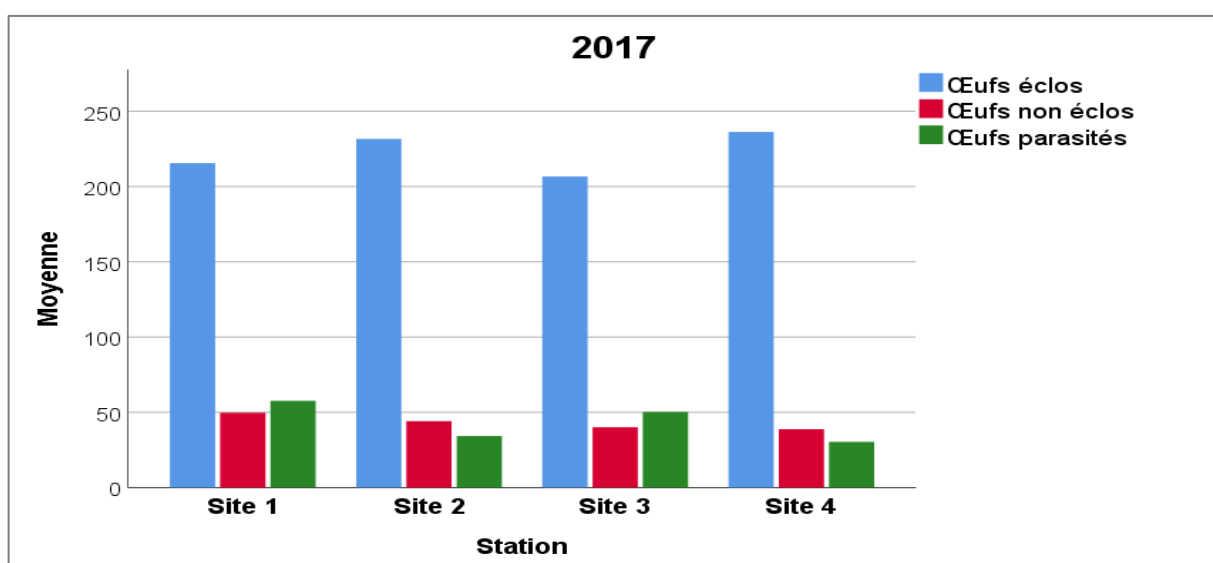


Figure 46 : Variation des moyennes des diverses catégories des œufs des pontes de la processionnaire du pin sur les différentes stations étudiées en 2017.

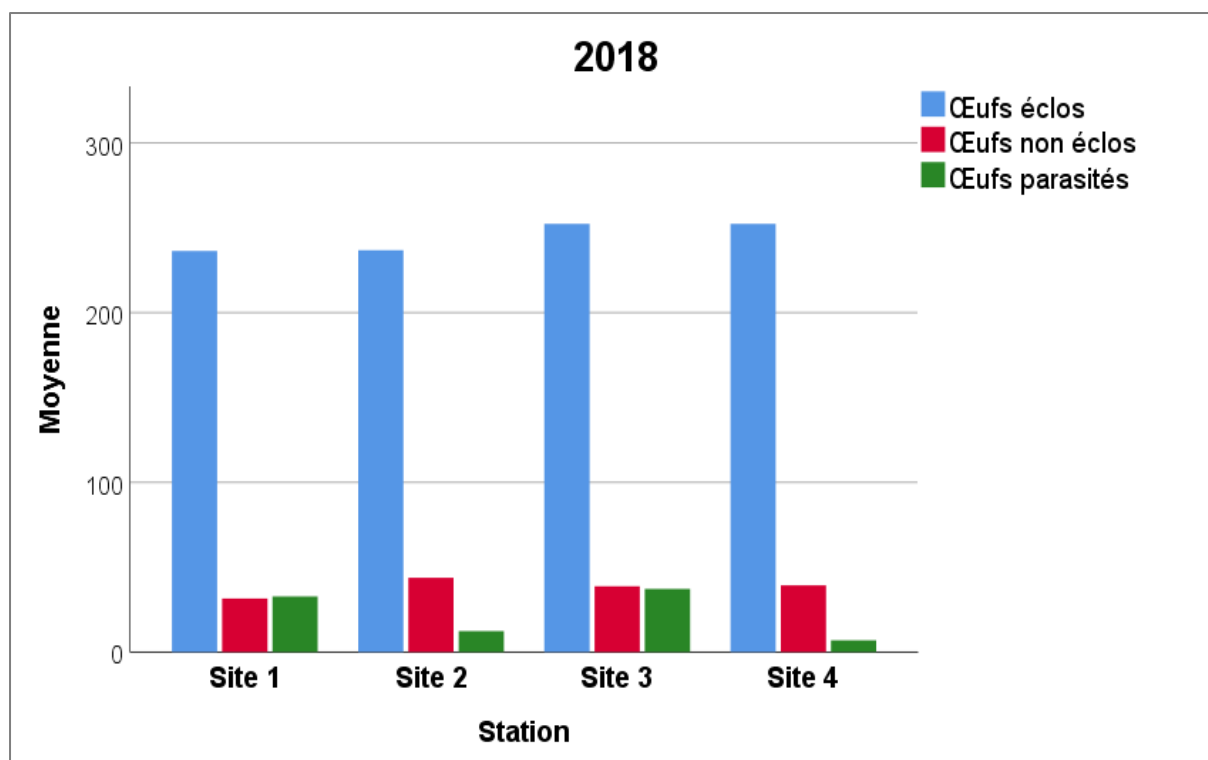


Figure 47 : Variation des moyennes des diverses catégories des œufs des pontes de la processionnaire du pin sur les différentes stations étudiées en 2018.

Les moyennes des œufs éclos montrent qu'il existe une différence pour les quatre biotopes prospectés.

Le nombre d'œufs éclos reste conséquent et significatif dans la cédraie de Chélia.

De même, la mortalité naturelle des chenilles de processionnaire du pin au stade embryonnaire est plus importante.

En ce qui concerne les moyennes des œufs parasités, elles présentent une plus grande signification pour les sites d'expérimentation.

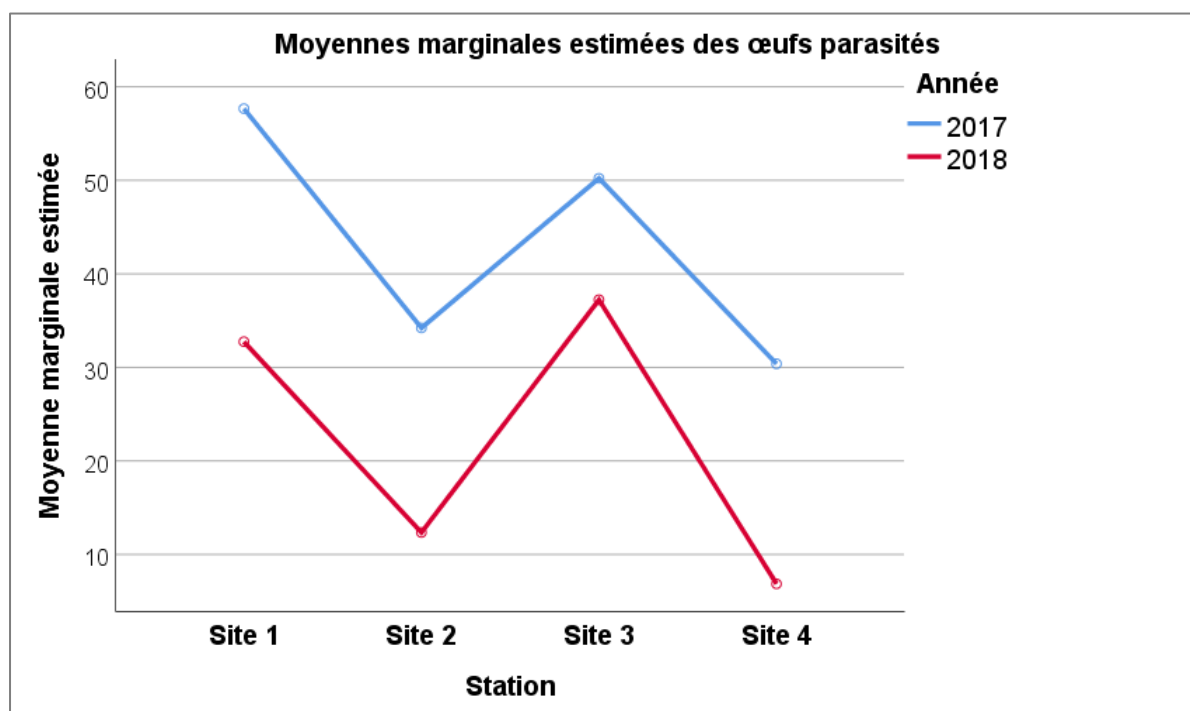
Nous avons procédé à une comparaison des moyennes par Anova représenté dans le tableau 19 pour tirer des informations sur la signification entre les populations considérées.

Tableau 19 : Anova pour les œufs parasités :

Tests des effets intersujets					
Variable dépendante : Œufs parasités					
Source	Somme des carrés de type III	ddl	Carré moyen	F	Signification
Modèle corrigé	64556,644 ^a	7	9222,378	10,072	,000
Constante	287748,878	1	287748,878	314,247	,000
Année	29164,009	1	29164,009	31,850	,000
Station	37590,726	3	12530,242	13,684	,000
Erreur	318655,255	348	915,676		
Total	897732,000	356			
Total corrigé	383211,899	355			

a. R-deux = ,168 (R-deux ajusté = ,152)

Le tableau d'Anova décompose la variance des œufs parasités. Comme la valeur de la probabilité est égale à $P = 0,000$ pour le test F qui est inférieur à 0,05, il y a une différence très hautement significative entre les moyennes des œufs parasités d'un niveau de station à l'autre et entre les années d'échantillonnage au niveau de confiance de 95,0% (Fig. 48).

**Figure 48** : Comparaison des effectifs moyens des œufs parasités dans les sites prospectés.

Les significations possibles des moyennes les unes des autres sont illustrés dans le tableau 20

Tableau 20 : Test de signification par station pour les œufs parasités (Méthode : 95,0 % LSD)

Test LSD ; Variable Les œufs parasités				
Différences significatives marquées à $p < ,05000$				
Stations	{1}	{2}	{3}	{4}
Site {1}				
Site {2}	,001			
Site {3}	,636	,000		
Site {4}	,000	,588	,000	

Dans le site 1, une différence hautement significative est notée avec les œufs parasités des pontes récoltées dans le site 2 et très hautement significative avec le site 4, par contre la comparaison des œufs parasités des pontes en provenance de site 1 ne montre pas de différence significative avec le site 3.

Une différence très hautement significative a été observée entre le site 2 et le site 3. Nous avons noté également une différence très hautement significative entre le site 3 et celui de site 4.

7. Les parasitoïdes embryonnaires de la processionnaire du pin et l'impact du parasitisme.

Trois espèces de parasitoïdes appartenant aux Hyménoptères chalcidiens parasitent les œufs de processionnaire dans la cédraie de Chélia : *Baryscapus servadeii*, *Ooencyrtus pityocampae*, et *Trichogramma embryophagum* (Tab. 21).

Tableau 21 : Les espèces oophages de la processionnaire du pin et leur impact.

Station	Parasitoïdes	Effectif des pontes parasitées	Effectif des œufs parasités	Moyenne	Taux de parasitisme
Site 1	<i>Trichogramma embryophagum</i>	25	144	2,40± 5,82	0,74
	<i>Baryscapus servadeii</i>	52	1298	21,63± 26,65	6,67
	<i>Ooencyrtus pityocampae</i>	12	20	0,33± 0,83	0,10
Site 2	<i>Trichogramma embryophagum</i>	32	252	4,20± 7,71	1,36
	<i>Baryscapus servadeii</i>	31	531	8,85± 16,07	2,87
	<i>Ooencyrtus pityocampae</i>	22	71	1,18± 2,41	0,38
Site 3	<i>Trichogramma embryophagum</i>	41	401	6,68± 11,14	2,25
	<i>Baryscapus servadeii</i>	41	1156	19,27± 21,61	6,49
	<i>Ooencyrtus pityocampae</i>	16	46	0,77± 1,87	0,26
Site 4	<i>Trichogramma embryophagum</i>	36	670	11,17± 20,30	3,67
	<i>Baryscapus servadeii</i>	33	733	12,22± 23,53	4,01
	<i>Ooencyrtus pityocampae</i>	12	37	0,62± 1,748	0,20
Site 1	<i>Baryscapus servadeii</i>	11	781	16,62± 29,78	5,57
	<i>Ooencyrtus pityocampae</i>	5	31	0,66± 1,34	0,22
Site 2	<i>Baryscapus servadeii</i>	6	57	2,85± 6,90	0,97
	<i>Ooencyrtus pityocampae</i>	8	26	1,30± 2,10	0,44
Site 3	<i>Baryscapus servadeii</i>	13	685	19,57± 35,12	5,96
	<i>Ooencyrtus pityocampae</i>	4	6	0,17± 0,51	0,05
Site 4	<i>Baryscapus servadeii</i>	1	11	0,79± 2,94	0,26
	<i>Ooencyrtus pityocampae</i>	4	12	0,86± 1,87	0,29
Site 1	<i>Baryscapus servadeii</i>	12	472	10,73± 21,77	4,08
	<i>Ooencyrtus pityocampae</i>	15	29	0,66± 1,11	0,25
Site 3	<i>Baryscapus servadeii</i>	9	379	17,23± 22,97	6,29
	<i>Ooencyrtus pityocampae</i>	3	4	0,18± 0,50	0,07

En 2017,

Au niveau du site 1, *Baryscapus servadeii* a parasité 1298 œufs appartenant à 52 pontes, soit un taux de 6,67% et le nombre moyen de cette parasitoïde de 21,63+ 26,65, contre 531 œufs parasités avec un taux de 2,87% dans le site 2 contre 1156 œufs parasités dans le site 3 soit un taux de 6,49% contre 733 œufs parasités dans le site 4 soit un taux de 4,01%.

Le nombre moyen de *Trichogramma embryophagum* est de 2,40+5,82, représente un taux de parasitisme de 0,74% pour le premier site et de 4,20 +7,71 soit un taux de 1,36% pour le

deuxième site et de 6,68+11,14 avec un taux de 2,25% pour le troisième site et de 11,17+ 20,30 soit un taux de 3,67% pour le dernier site.

Enfin, *Ooecyrtus pityocampa* est retrouvé à très faible abondance dont une proportion reste très limitée avec un taux de parasitisme qui varie en moyenne de 0,10% à 0,38%.

En 2018,

Dans cette année, deux espèces de parasitoïdes ont été identifiées. Le parasitisme est assuré par les espèces *B. servadeii* et *O. pityocampae*,

B. servadeii est majoritaire avec un taux très élevé au niveau de la station 1 et 3 variants respectivement de 5,57% à 5,96%, par contre des valeurs plus basses ont été enregistrées dans les deux autres sites 2 et 4 avec des proportions très faibles variant de 0,97% à 0,26% respectivement.

On retrouve *O. pityocampae* a un impact négligeable sur la processionnaire du pin dans les quatre zones d'étude.

Le *Trichogramma embryophagum* est absent durant cette année pour l'ensemble des populations de la processionnaire du pin qui attaque le cèdre d'Atlas alors qu'il y était présent en 2017.

En 2019,

Nous avons identifié deux espèces de parasitoïdes parasitent les œufs de processionnaire durant cette année. Au niveau de deux zones *B. servadeii* est le parasitoïde majoritaire. Le parasitisme infligé par la deuxième espèce, *O. pityocampae* est négligeable bien qu'elle soit également présente sur l'ensemble des quatre stations durant les trois années d'échantillonnage.

8. Analyse des parasitoïdes oophages et leur importance

Les parasitoïdes associés à la processionnaire du pin sont variables selon l'année et la zone étudiée mais la même tendance se retrouve sur l'ensemble de nos quatre sites. Nous avons retrouvé trois espèces de parasitoïdes. Le spécialiste *Baryscapus servadeii* est l'espèce majoritaire et est retrouvé sur l'ensemble de la zone d'étude. Le généraliste *O. pityocampae* a un impact négligeable sur la processionnaire du pin dans la cédraie de Chélia. Les résultats sont consignés dans les tableaux 22 et 23.

8.1 Fréquence de présence des parasitoïdes en 2017.

Tableau 22 : Fréquence des espèces oophages de la processionnaire du pin répertoriées en 2017.

Stations	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4
Fréquence de présence de <i>Trichogramma embryophagum</i> (%)	9,85	29,51	25,01	46,53
Fréquence de présence de <i>Baryscapus servadeii</i> (%)	88,78	62,18	72,11	50,90
Fréquence de présence de <i>Ooencyrtus pityocampae</i> (%)	1,36	8,31	2,87	2,57

Les deux espèces majoritaires sont *B. servadeii* et *T. Embryophagum* que l'on retrouve sur les populations considérées dans les biotopes prospectés. La troisième espèce identifiée est *O. pityocampae*, que l'on retrouve en très faible proportion entre 1,36 et 8,31% (Fig.49).

Au niveau de la station 4, les deux espèces majoritaires ont une abondance équivalente représentée plus de 46% du parasitisme total alors que dans la station 1, le parasitoïde spécialiste est le plus présent avec une fréquence de présence de l'ordre de 88,78% et *O. pityocampae* a quant à lui une fréquence négligeable s'élève à 1,36% (Fig. 49).

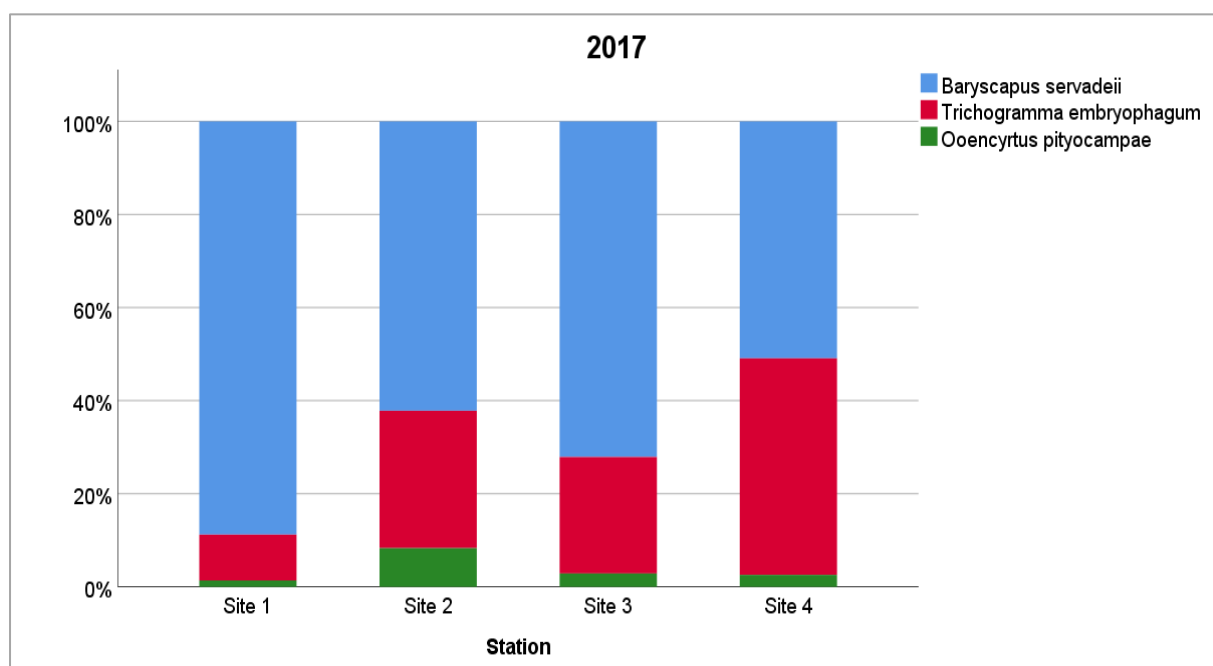


Figure 49 : Taux d'émergence des parasitoïdes dans les quatre sites en 2017.

8.2 Fréquence de présence des parasitoïdes en 2018 et 2019.

Tableau 23 : Fréquence des espèces oophages de la processionnaire du pin répertoriées en 2018 et 2019.

Année	2018				2019	
Stations	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 1	Site 3
Fréquence de présence de <i>Baryscapus servadeii</i> (%)	96,18	68,67	99,13	47,83	94,21	98,96
Fréquence de présence de <i>Ooencyrtus pityocampae</i> (%)	3,81	31,33	0,86	52,17	5,79	1,04

Le parasitoïde spécifique de la processionnaire *Baryscapus servadeii* assure la majorité du parasitisme dans les sites 1 et 3 soit un taux calculé plus de 94% et l'espèce polyphage, *Ooencyrtus pityocampa* est retrouvée à très faible abondance dont une proportion reste très limitée au cours de la période de 2018 et 2019 (Fig. 50 et 51).

Dans la station 4, l'essentiel du parasitisme est infligé par le généraliste *O. pityocampae* représentant un taux 52,17% de l'effectif global.

Dans la station 2, le parasitoïde généraliste *O. pityocampae* a également été observé en très grande abondance occupe un taux de 31,33%.

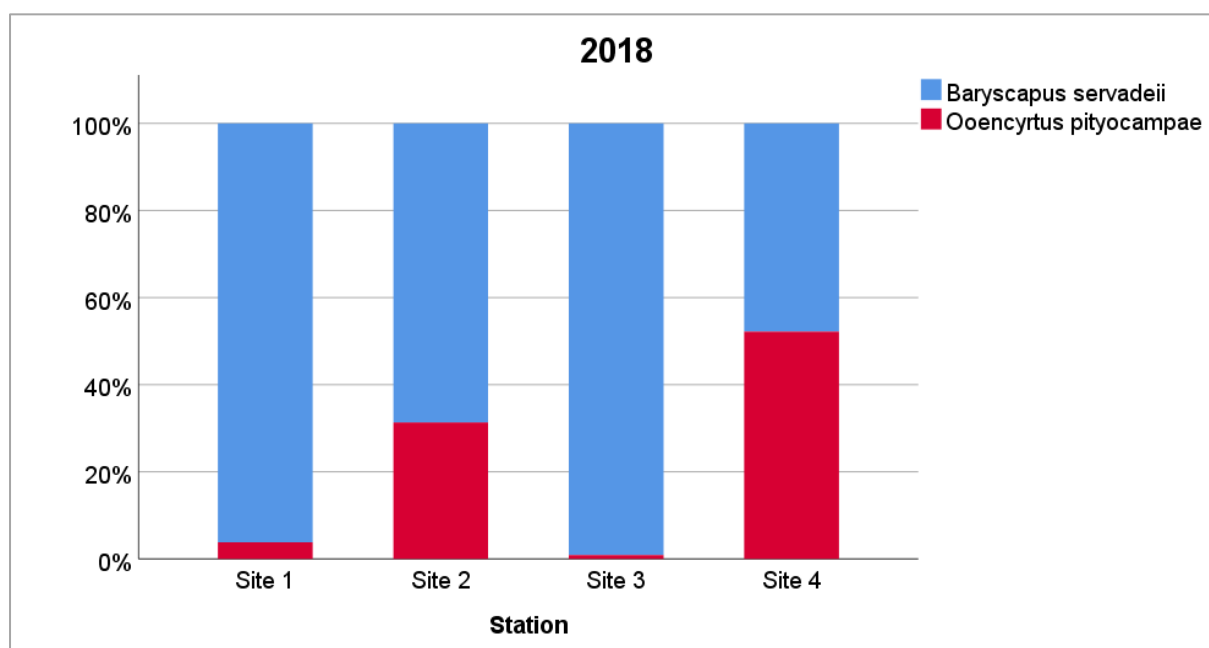


Figure 50 : Taux d'émergence des parasitoïdes dans les quatre sites en 2018.

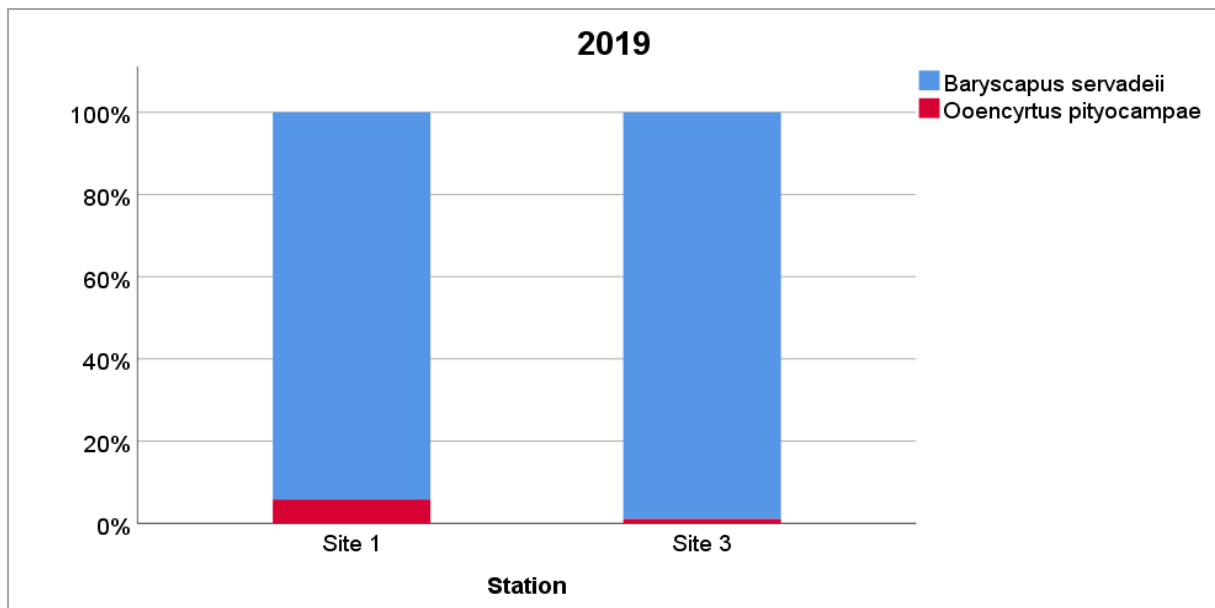


Figure 51 : Taux d'émergence des parasitoïdes dans les deux sites en 2019.

Afin de tirer plus de renseignements sur l'effet de l'exposition de l'altitude sur la répartition et l'émergence des parasitoïdes une analyse par Anova a été réalisée (Tab. 24, 26 et 28)

Tableau 24 : Test de significativité de l'espèce *Baryscapus servadeii*.

Tests des effets intersujets					
Variable dépendante : <i>Baryscapus servadeii</i>					
Source	Somme des carrés de type III	Ddl	Carré moyen	F	Signification
Modèle corrigé	13892,218 ^a	9	1543,580	2,733	,004
Constante	37790,137	1	37790,137	66,910	,000
Station	11967,506	3	3989,169	7,063	,000
Année	3515,100	2	1757,550	3,112	,046
Station * année	1632,219	4	408,055	,722	,577
Erreur	232694,676	412	564,793		
Total	334849,000	422			
Total corrigé	246586,893	421			

a. R-deux = ,056 (R-deux ajusté = ,036)

Comme la valeur de la probabilité est égale à $p = 0,000$ pour le test F qui est inférieur à 0,05, une différence très hautement significative entre les moyennes d'émergence de parasitoïde spécialiste *B. servadeii* d'un niveau de site à l'autre (Fig. 52).

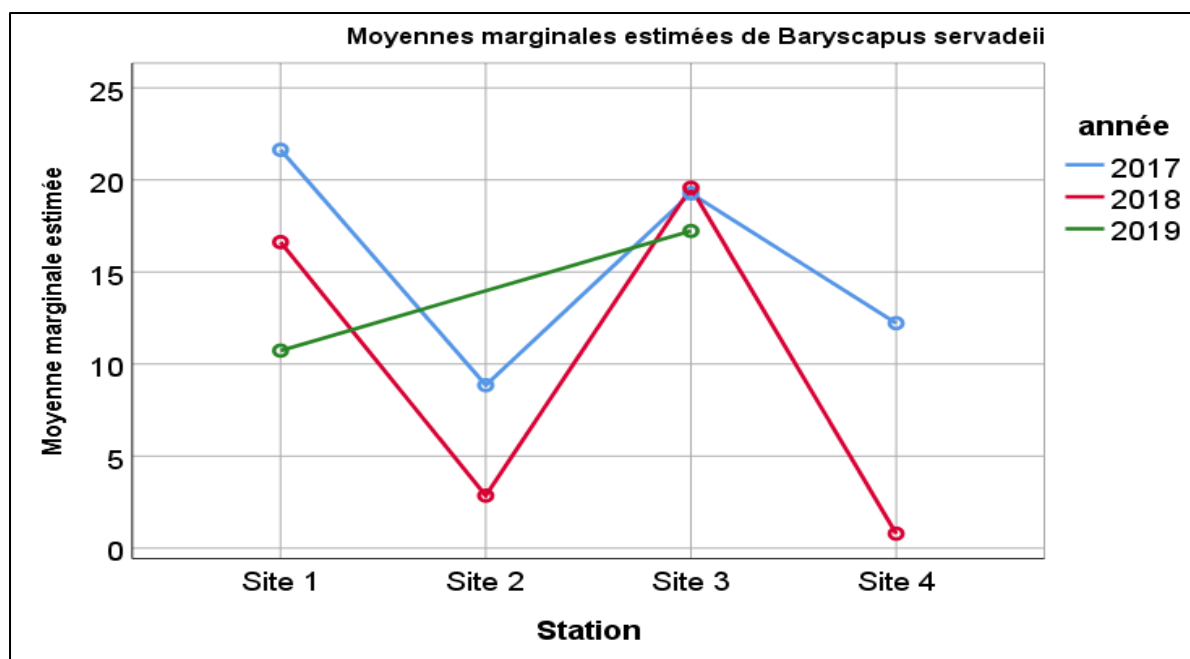


Figure 52 : Comparaison pour le parasitoïde oophage *Baryscapus servadeii* les différentes zones d'étude.

Pour déterminer quelles moyennes sont significativement différentes les unes des autres, le test des étendues multiples a été réalisé (Tab. 25).

Tableau 25 : Test LSD de l'espèce *Baryscapus servadeii*

Test LSD ; Variable <i>Baryscapus servadeii</i>				
Différences significatives marquées à $p < ,05000$				
Stations	{1}	{2}	{3}	{4}
Site {1}				
Site {2}	,004			
Site {3}	,479	,001		
Site {4}	,044	,483	,012	

La station 1 montre une différence hautement significative avec les parasitoïdes *Baryscapus servadeii* du site 2 et une différence significative avec le site 4, par contre avec le site 3 il n'y a pas de différence significative.

Une différence hautement significative est notée dans la station 2 avec les parasitoïdes *B.servadeii* des site 1 et 3, par contre avec le site 4 il n'y a pas de différence significative.

Tableau 26 : Test de significativité de l'espèce *Ooencyrtus pityocampae*

Tests des effets intersujets					
Variable dépendante : <i>Ooencyrtus pityocampae</i>					
Source	Somme des carrés de type III	Ddl	Carré moyen	F	Signification
Modèle corrigé	45,723 ^a	9	5,080	1,990	,039
Constante	129,953	1	129,953	50,902	,000
Station	27,980	3	9,327	3,653	,013
Année	,199	2	,100	,039	,962
Station * année	14,905	4	3,726	1,460	,214
Erreur	1051,831	412	2,553		
Total	1286,000	422			
Total corrigé	1097,555	421			

a. R-deux = ,042 (R-deux ajusté = ,021)

Comme la valeur de la probabilité est égale à $p = 0,013$ pour le test F qui est inférieur à 0,05, il y a une différence statistiquement significative entre les moyennes d'émergence de parasitoïde généraliste *O. pityocampae* d'un niveau de station à l'autre au niveau de confiance de 95,0% (Fig. 53).

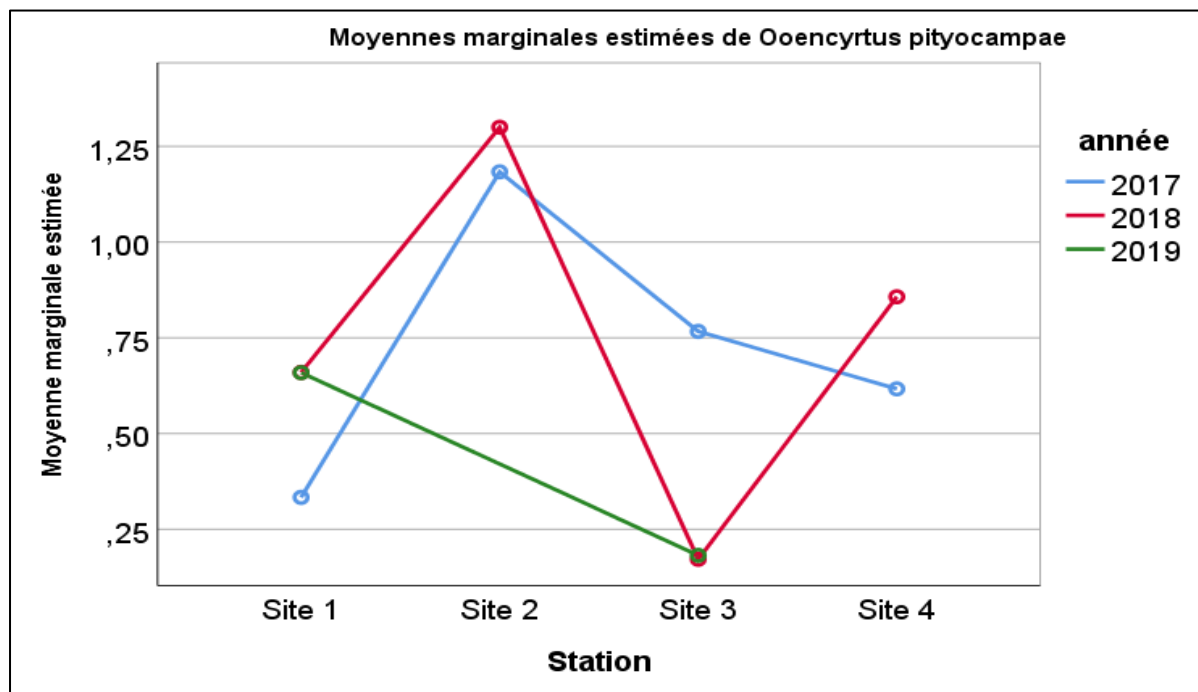


Figure 53 : Comparaison pour le parasitoïde oophage *Ooencyrtus pityocampae* les différentes zones d'étude.

Le tableau 27 regroupe les étendues multiples entre les stations prospectées.

Tableau 27 : Test LSD de l'espèce *Ooencyrtus pityocampae*

Test LSD ; Variable <i>Ooencyrtus pityocampae</i>				
Différences significatives marquées à $p < ,05000$				
Stations	{1}	{2}	{3}	{4}
Site {1}				
Site {2}	,002			
Site {3}	,795	,002		
Site {4}	,560	,033	,440	

La comparaison des parasitoïdes oophages *Ooencyrtus pityocampae* en provenance du site 2 montre une grande différence significative avec les sites 1 et 3 et significative avec le site 4.

Tableau 28 : Test de significativité de l'espèce *Trichogramma embryophagum*

ANOVA					
<i>Trichogramma embryophagum</i>					
Source	Somme des carrés	Ddl	Carré moyen	F	Signification
Intergroupes	2598,646	3	866,215	5,499	,001
Intragroupes	37177,317	236	157,531		
Total	39775,963	239			

Le rapport F qui dans ce cas est égal à 5,49 c'est un rapport de l'estimation intergroupes par rapport à l'estimation intragroupe. La valeur de la probabilité pour le test F est inférieure à 5% d'erreur qui est égale à $p = 0,001$, il y a une différence hautement significative entre les moyennes d'émergence de parasitoïde polyphage *T. embryophagum* d'un niveau de station à l'autre au niveau de confiance de 95,0% (Fig. 54).

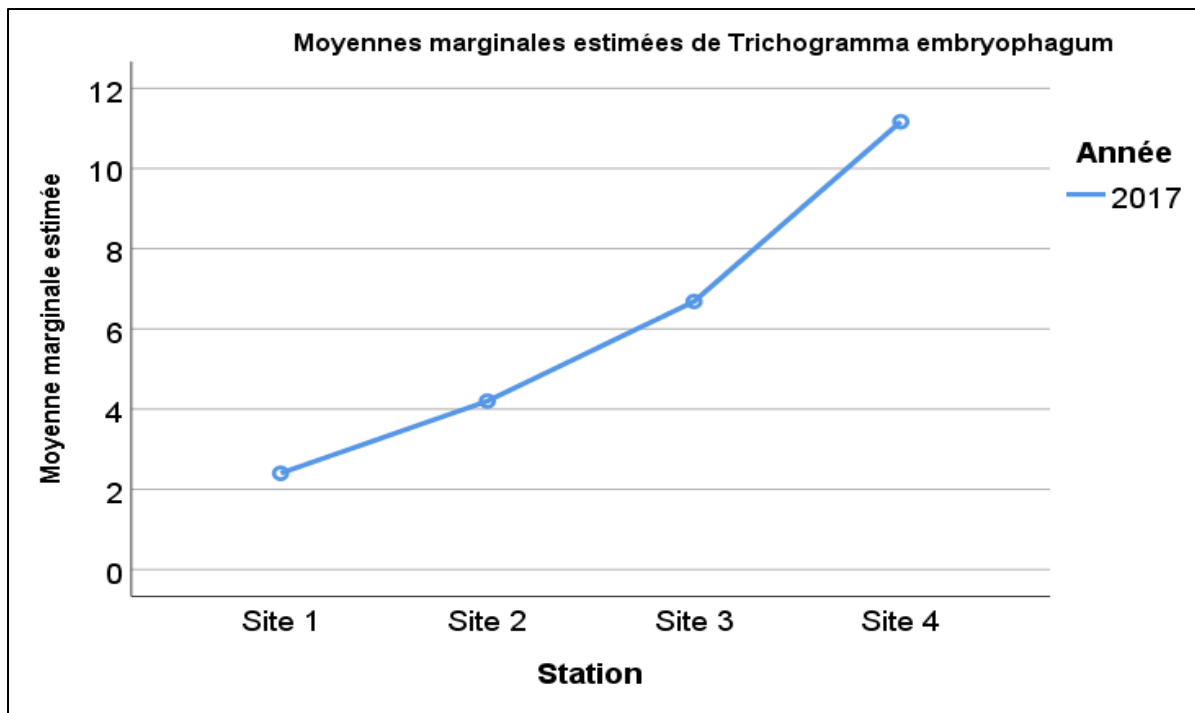


Figure 54 : Comparaison pour le parasitoïde oophage *Trichogramma embryophagum* les différentes zones d'étude.

Le test des étendues multiples permet de déterminer quelles moyennes sont significativement différentes les unes des autres (Tab.29).

Tableau 29 : Test LSD de l'espèce *Trichogramma embryophagum*

Test LSD ; Variable <i>Trichogramma embryophagum</i>				
Différences significatives marquées à $p < ,05000$				
Stations	{1}	{2}	{3}	{4}
Site {1}				
Site {2}	,107			
Site {3}	,846	,000		
Site {4}	,000	,000	,000	

Les parasitoïdes embryonnaires *Trichogramma embryophagum* en provenance de la station 3 montrent une différence très hautement significative avec les parasitoïdes *T. embryophagum* du site 4 et une différence significative avec le site 1 par contre avec le site 2 il n'y a pas de différence significative.

Une différence très hautement significative est notée dans la station 4 avec les sites 1, 2 et 3.

9. Chronologie des émergences des parasitoïdes actifs au niveau de la cédraie de Chélia

9.1 Émergence de *Baryscapus servadeii*

Le suivi de l'émergence de *Baryscapus servadeii* principale parasitoïde en provenance des sites prospectés a permis l'obtention la courbe cumulative portée sur la figure 55.

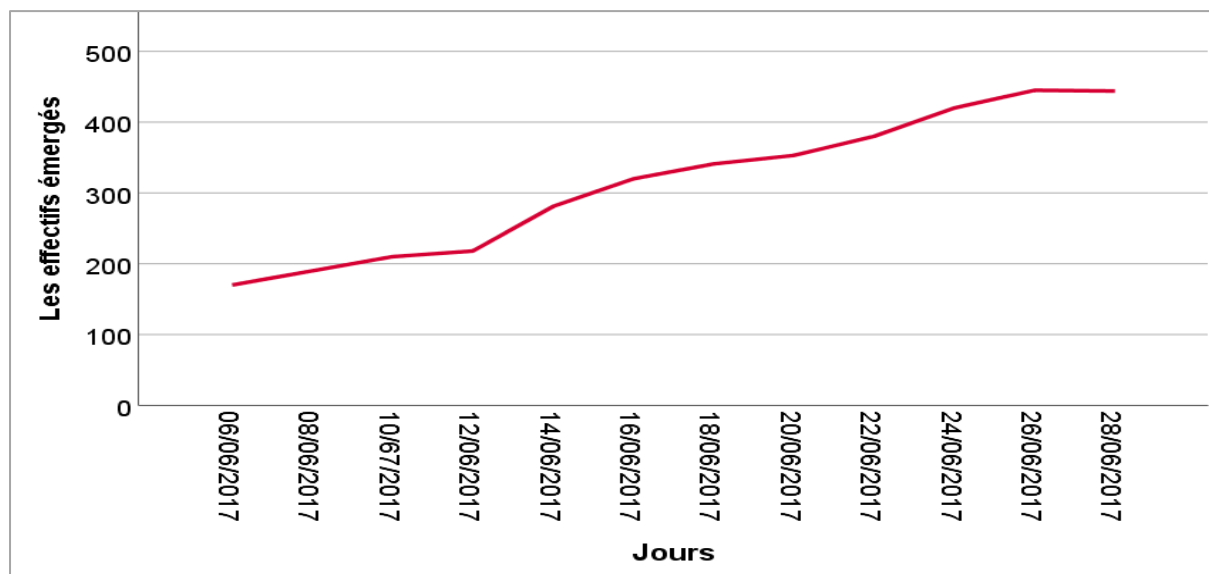


Figure 55 : Représentation du cumul des émergences de *Baryscapus servadeii*.

Sur la base de ces résultats, les premiers émergents de *Baryscapus servadeii* ont été notés à la première semaine du mois de juin 2017 avec un plus grand effectif. Les émergences se sont échelonnées sur 22 jours. La date de calage, correspondant à 50% de l'émergence de la population s'est effectuée le 12 juin 2017. L'espèce *B. servadeii* est plus fréquente dans la cédraie de Chélia.

9.2 Émergence de *Ooencyrtus pityocampae*

La courbe cumulative d'émergences de ce parasitoïde embryonnaire est représentée par la figure 56.

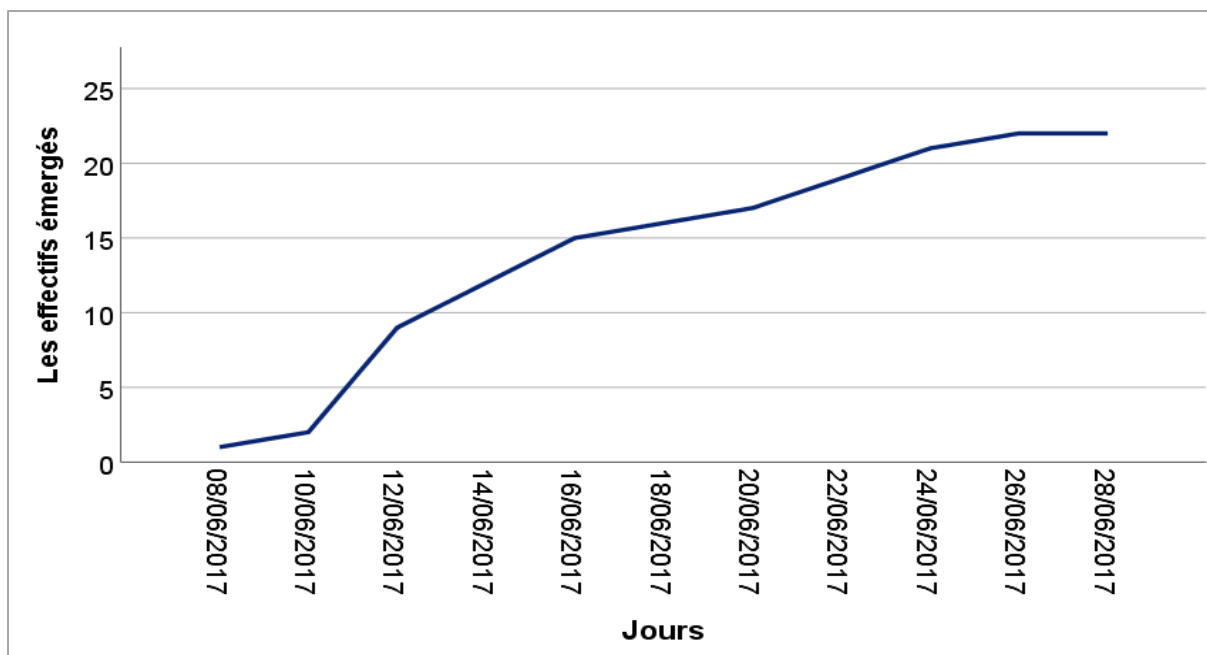


Figure 56 : Représentation du cumul des émergences de l'*Ooencyrtus pityocampae*.

D'après le graphe, on note que l'espèce *Ooencyrtus pityocampae* émergée avec un faible nombre. Les émergences se sont effectuées de la première semaine du mois de juin 2017 et se sont échelonnées pendant 20 jours. La date de calage, correspondant à 50% de l'émergence de la population s'est effectuée le 12 juin 2017.

9.3 Émergence de *Trichogramma embryophagum*

La figure 57 illustre la courbe des émergences de parasitoïde embryonnaire *T. embryophagum*.

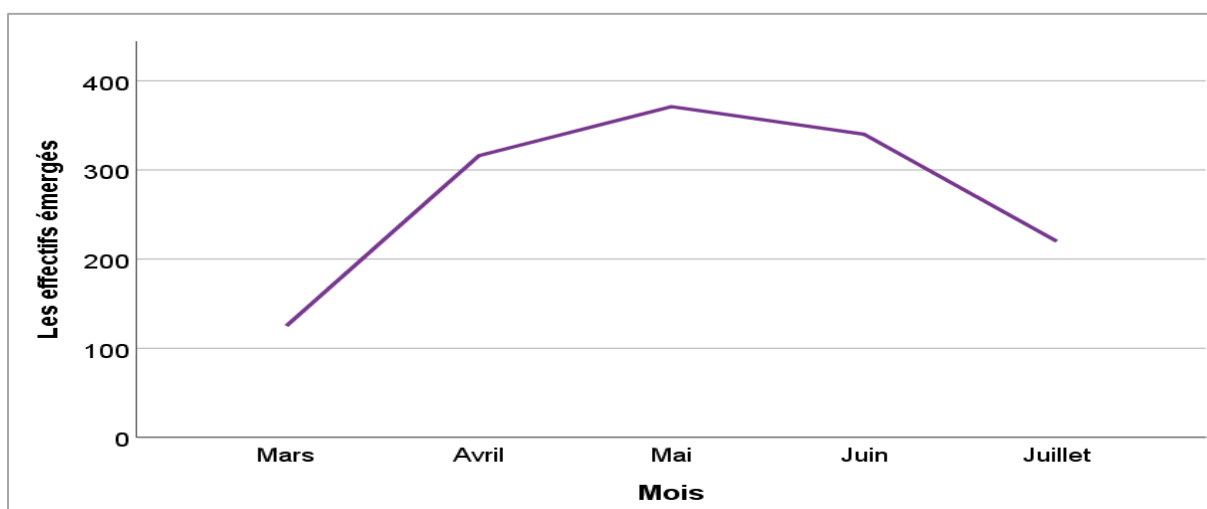


Figure 57 : Dynamique d'émergence de *Trichogramma embryophagum* au niveau de la cédraie de Chélia.

Les espèces de *Trichogramma embryophagum* ont débuté leur émergence à partir du mois de mars. La date de calage s'effectue le mois de mars 2017 à 50% d'émergence. L'échelonnement des émergences a été effectué sur 5 mois. Une distribution très hétérogène des populations des trois parasitoïdes est notée.

10. Etude de la dynamique du parasitisme

10.1 Répartition du parasitisme sur la surface des pontes

Le pourcentage de parasitisme sur chaque position de la ponte est présenté par la figure 58.

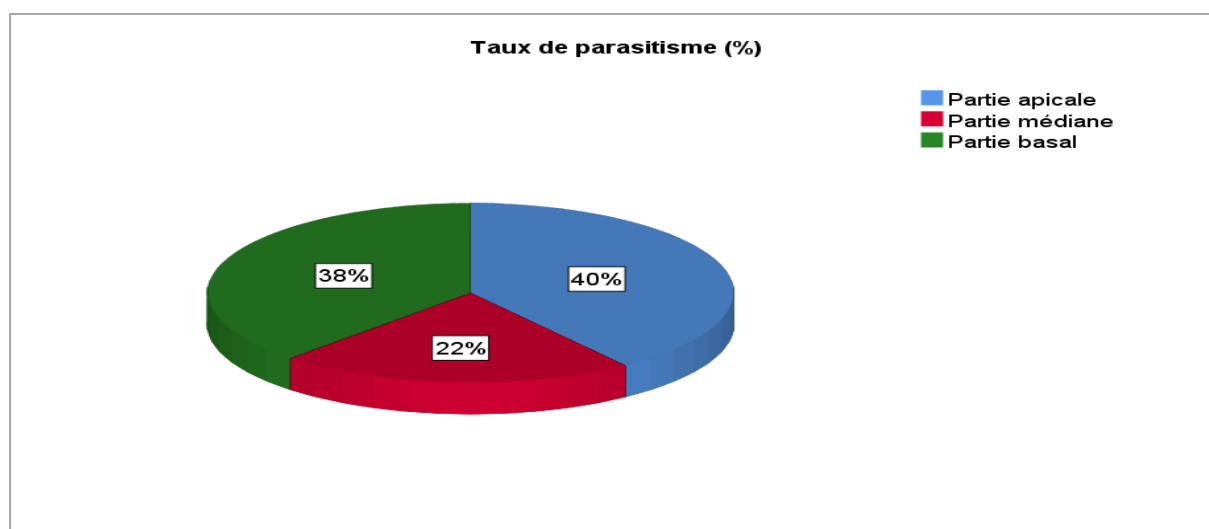


Figure 58 : Répartition des parasitoïdes sur la surface de la ponte.

Les données de la figure 58, portant sur le nombre de parasites aux trois positions de la ponte montrent que le nombre des œufs parasités est plus conséquent aux deux extrémités de la ponte de la processionnaire du pin bien que le taux de parasitisme soit significativement moins élevé dans la partie médiane. Les extrémités des pontes sont les plus recherchées par les parasitoïdes.

10.2 Parties convoitées par les parasitoïdes

De même on a étudié les trous de sortie des parasitoïdes sur les différentes parties de ponte, nous avons divisé chaque ponte en neuf compartiments de haut en bas pour chaque compartiment on note le nombre d'œufs parasités.

10.2.1 Trous de sorties centraux

Les résultats des taux relatifs aux trous de sorties centraux représentés par les figures 59.

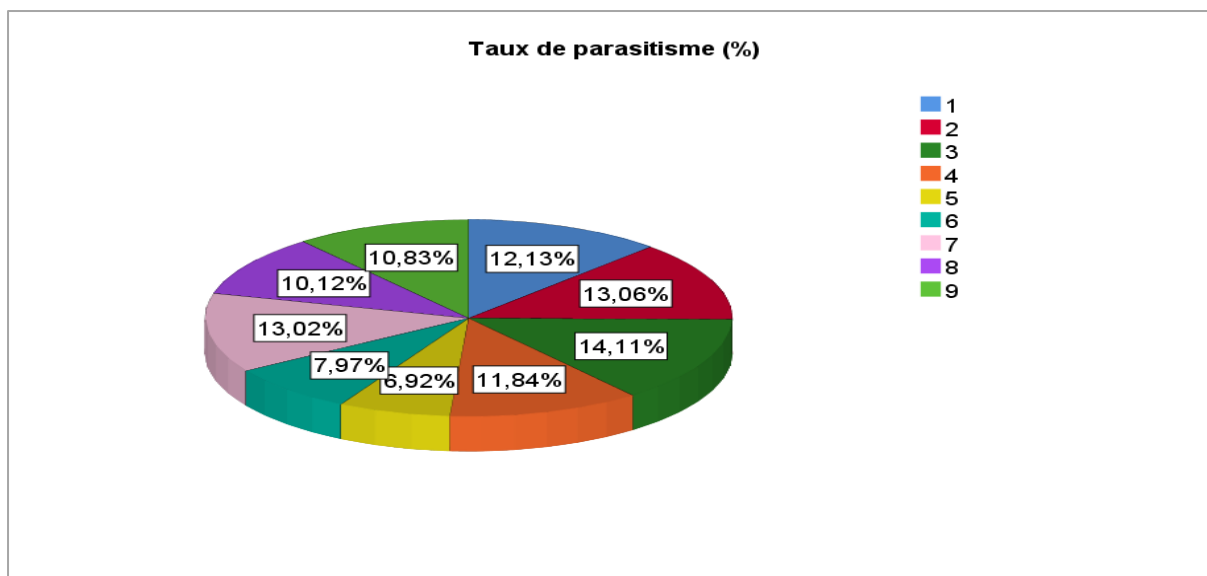


Figure 59 : Représentation sectorielle de trous centraux des parasitoïdes par compartiment de ponte de la processionnaire du pin.

L'analyse de la figure 59 permet de constater que la majeure partie des trous de sorties centraux se localise sur les deux parties extrêmes des pontes pour les compartiments de haut (1-2-3) et de bas (7- 8-9).

10.2.2 Trous de sorties latéraux

Les données relatives aux trous de sorties latéraux sont synthétisées dans la figure 60.

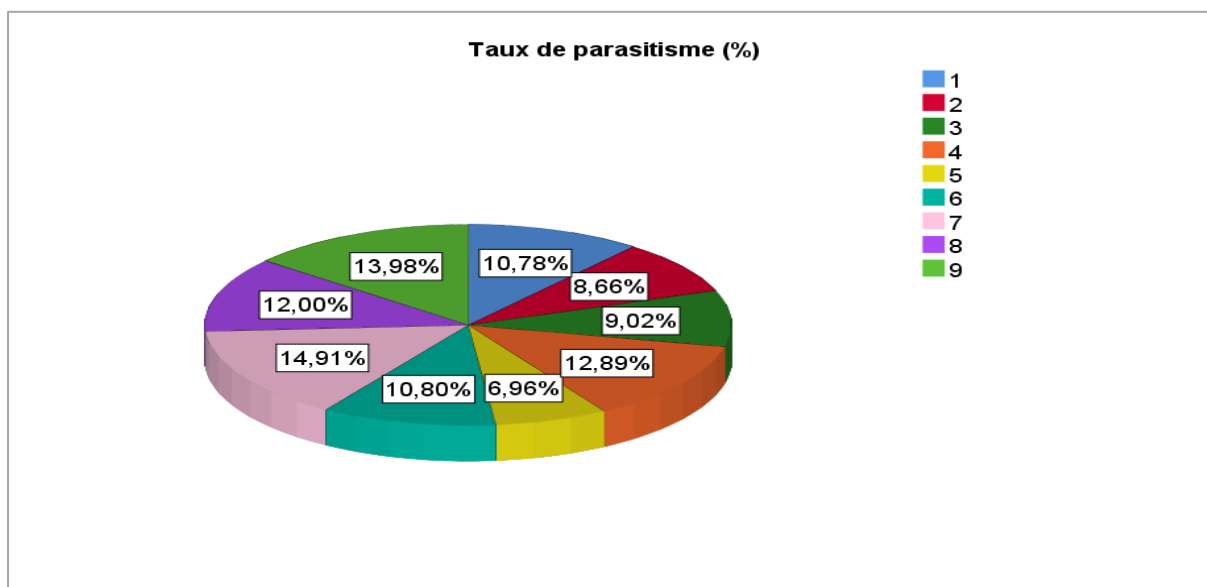


Figure 60 : Représentation sectorielle de trous latéraux des parasitoïdes par compartiment de ponte de la processionnaire du pin.

De même pour les trous de sorties latéraux, la distribution du parasitisme sur les parties médianes (4-5-6) est moins importante que les autres parties, donc ces parties sont moins touchées par les parasitoïdes.

11. Expansion de l'aire de réparation

Les résultats de degrés d'infestation en relation avec l'orientation sont illustrés par la figure 61.

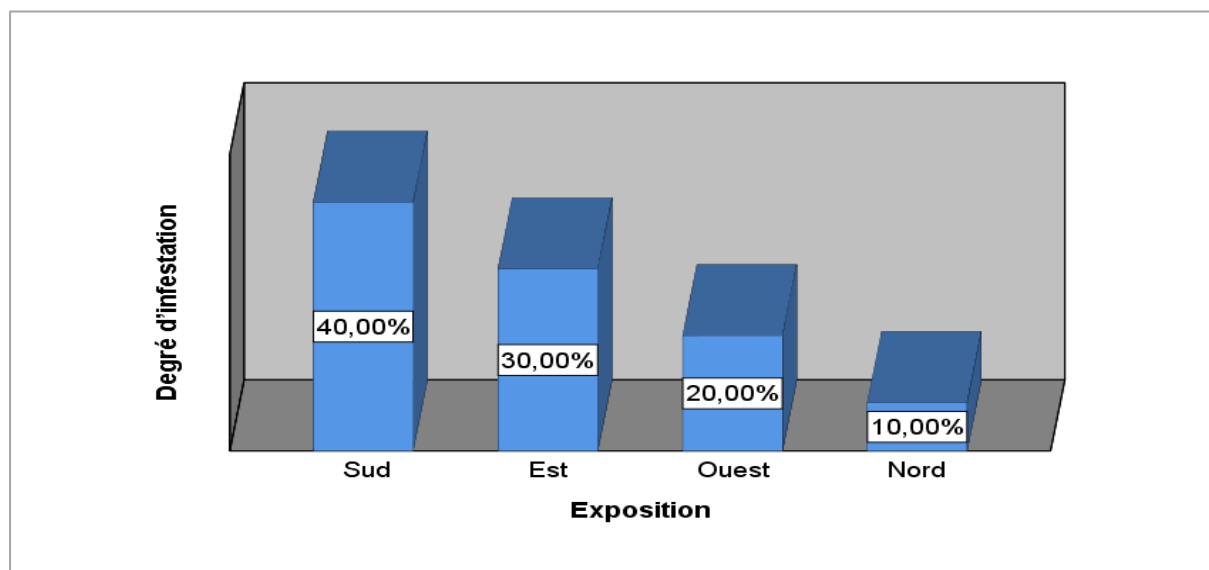


Figure 61 : Degré d'infestation en fonction d'exposition sur l'arbre.

La répartition des pontes en fonction de leur orientation sur l'arbre, met en évidence que l'orientation sud correspond au site favorable par les femelles de la processionnaire du pin pour pondre. L'exposition Est semble aussi offrir des conditions propices mais à un degré moins. Nous avons noté que l'exposition nord reste la moins recherchée par la processionnaire.

QUATRIEME CHAPITRE :
DISCUSSIONS



QUATRIEME CHAPITRE

DISCUSSIONS

1. Analyses des pontes de *T. pityocampa* sur le cèdre de l'Atlas

L'analyse des pontes de la processionnaire du pin réalisée sur trois années consécutives, dans les différents sites d'échantillonnage d'expansion de l'espèce, a permis de mettre en évidence l'impact de l'expansion de l'aire de répartition de ce défoliateur en altitude et sur sa relation avec ses parasitoïdes.

Cette étude a porté sur l'analyse des variables environnementales : altitude, expositions ainsi que d'autres variables liées à la répartition et l'extension des populations de la processionnaire du pin et ses parasitoïdes embryonnaires.

Au cours des dernières décennies, cet insecte a montré une progression rapide en altitude liée directement au changement climatique. Battisti *et al.* (2015) a confirmé d'ailleurs cette progression des populations de la processionnaire du pin en altitude vers des latitudes nord à la faveur de ce facteur climatique. Le réchauffement ayant permis une expansion de son aire de répartition vers des latitudes et altitudes plus élevées, cette espèce a continué ainsi à causer des incidences graves sur le fonctionnement des écosystèmes (Battisti *et al.*, 2005 ; Robinet *et al.*, 2007).

Nous avons échantillonné les pontes sur un seul et même hôte, pour limiter l'influence des facteurs incontrôlables sur nos résultats. Les différents hôtes potentiels de la processionnaire du pin ont une morphologie d'aiguilles différentes qui va influencer la structure des pontes de la processionnaire du pin et des espèces de parasitoïdes associés (Arnaldo et Torres, 2006).

Sur la base des résultats obtenus, l'analyse descriptive des mensurations des longueurs des pontes récoltés de la processionnaire du pin sur le cèdre de l'Atlas au niveau de la cédraie de Chélia, a montré une signification plus conséquente des longueurs des pontes récoltées durant l'année 2017 par rapport à celles de 2018 et 2019. Ainsi, si l'on compare les populations des quatre stations, on retrouvera des différences significatives d'une station à une autre et d'une année à une autre. L'effet de l'altitude et l'exposition est donc manifestement significatif.

En 2018 et 2019, une diminution remarquable est notée pour les quatre stations considérées. Les résultats obtenus montrent une nette différence entre les mensurations en diamètre des pontes en provenance des sites d'échantillonnage des pontes de la processionnaire du pin. Reste que la comparaison de diamètre des pontes durant les trois années

d'échantillonnage ne montre guère de différence significative entre les années de cette période d'étude.

Des résultats biométriques comparables ont été obtenus par Bouchou (2015) sur des échantillons de pontes de la processionnaire du pin sur les diverses cédraies d'Algérie. Ailleurs en Bosnie-Herzégovine notamment, sur des pontes en provenance de *Pinus nigra* récoltées dans Boracko Jezero, Mirchev *et al.* (2015) notent une longueur moyenne de pontes de $29,45 \pm 4,46$ mm et un diamètre moyen de $3,50 \pm 0,33$ mm. En Turquie, Mirchev *et al.* (2007) notent, quant à eux, que les pontes récoltées sur *Pinus nigra* et sur *Pinus brutia* selon un transect altitudinal, ont des longueurs moyennes variables de $25,4 \pm 6,60$ à $29,2 \pm 6,37$ mm et les diamètres moyens variables de $2,9 \pm 0,35$ à $3,3 \pm 0,19$ mm.

Dans ce registre, Pimentel *et al.* (2010) ont montré que la différence en longueur des pontes est liée à la distribution géographique des hôtes et à la morphologie de leurs aiguilles. Pour Arnaldo et Torres (2006), les œufs pondus par la femelle de la processionnaire du pin peuvent influencer la structure des pontes. La plante hôte joue ainsi un rôle déterminant sur la taille et la structure des pontes, ainsi que sur la stratégie d'occupation des œufs sur la ponte hôte.

L'analyse fréquentielle des longueurs des pontes regroupe différentes classes pour les lots récoltés dans les quatre sites prospectés soit un maximum de 10 classes et un minimum de 5 classes. Les données recueillies mettent en évidence une différence statistique significative entre les lots testés. De même, la distribution fréquentielle des diamètres indique différentes classes en relation avec la courbe de Gauss pour les lots récoltés dans les sites prospectés. Cette analyse a permis de regrouper les catégories des femelles pondeuses en classes en fonction de la longueur et du diamètre des pontes. L'analyse fréquentielle des longueurs et des diamètres des pontes de la processionnaire du pin a montré, tout au long de notre étude, une variabilité significative entre les quatre stations considérées.

En Algérie, sur la base de la structure génétique des populations de cet insecte ravageur, deux clades ont été mis en évidence : les populations ENA (Eastern-North Africa) clade et *pityocampa* clade. Si nous considérons les clades de la processionnaire du pin établi par Kerdelhué *et al.* (2009), il apparaît que les populations de ENA clade situées au nord-est de ce pays sont plus conséquentes en longueur que le clade *pityocampa*. La zone de contact des deux clades regroupe des longueurs variables. De même, Pimentel *et al.* (2010) ont également constaté que la morphologie des aiguilles avait affecté la longueur des pontes.

2. Dénombrement des œufs

Les 422 pontes prélevées sur le cèdre de l'Atlas et dans l'ensemble des sites prospectés au niveau de la forêt de Chélia pour les trois années d'échantillonnage, ont permis d'analyser un total de 128 886 œufs, soit une moyenne de 301 œufs par ponte. Les résultats obtenus sont plus conséquents et plus significatifs que ceux réalisés sur des échantillons en provenance de la cédraie de Chréa par Sebti (2011), et qui note une moyenne de 231 par ponte.

Huchon et Démolin (1970) précisent que lorsque le nombre d'œufs est proche de 300, la potentialité dynamique de la population devient particulièrement élevée. Myers (2000) note, lui, que les fluctuations de la fécondité des lépidoptères sont associées à la fluctuation de la densité de population. Ainsi, Huchon et Démolin (1970) ont pu montrer que lorsque la potentialité reproductive de la processionnaire du pin est élevée, elle peut avoir des conséquences importantes sur l'augmentation de la densité de la processionnaire du pin et, par conséquent, sur la défoliation des arbres.

A noter que les pontes récoltés en 2017 contiennent un nombre très élevé d'œufs dans les quatre stations. Ces résultats indiquent que cette année a été marquée par un effectif très élevé de la population de la processionnaire. Dans les sites en question, la fertilité de ses femelles a été ainsi très conséquente.

En 2018 par contre, la fécondité des femelles pondueuses de la processionnaire était plus faible dans les stations 2 et 4 (les moins ensoleillées) par rapport aux stations 1 et 3 (les mieux ensoleillées).

Mais en 2019, la fertilité semble être en déclin dans les zones colonisées par la processionnaire du pin notamment dans les sites 2 et 4 où l'insecte considéré est quasiment absent. Cela est dû à l'exposé sur lequel les pontes ont été collectées. En effet et contrairement aux premiers, les sites 1 et 3 sont les sites les plus exposés au soleil. Il faut rappeler ici que la femelle de la processionnaire du pin choisit souvent les endroits les mieux exposés au soleil pour pondre ses œufs (Bertella, 1987). De plus, les variations climatiques qui affectent la phénologie de la processionnaire du pin, ont contribué dans cette perceptible diminution de 2018 et 2019. La processionnaire du pin est sensible aux conditions climatiques, ce qui réduit leurs populations notamment dans les milieux qui lui sont défavorables.

Il faut savoir également que notre pays a connu un record d'ensoleillement en 2017. C'est ce qui a engendré une sécheresse exceptionnelle sur tout le territoire algérien. Comme il a été remarqué une période modérément sèche en 2016.

Les résultats de l'analyse du climat indiquent la présence d'un changement climatique affectant notamment la température et la précipitation. La température a ainsi augmenté et les précipitations ont également diminué dans la région des Aurès. D'après Bouhot-Delduc (2005), les dégâts ont été très importants au cours des années de sécheresse. L'influence des facteurs climatiques sur la croissance interannuelle des niveaux de la population, en particulier la variation de la température et de l'insolation annuelle, ont été clairement établies par Démolin (1967) qui a estimé que les gradations de ce ravageur sont, en partie, liées au climat. D'où cette migration de l'insecte vers le nord et son extension et expansion vers des altitudes plus élevées, suite à ce changement climatique (Battisti *et al.*, 2005).

De plus, l'ensemble des conditions environnementales de la plante hôte va profondément affecter la fertilité des femelles *T. pityocampa*. Bouchou (2015) affirme d'ailleurs que la fécondité de la population évoluant sur cèdre reste la plus conséquente par rapport à celle sur le pin d'Alep. La dynamique des populations de la processionnaire du pin dans les peuplements forestiers devrait donc faire l'objet d'un suivi régulier, selon un gradient altitudinal au niveau d'un grand nombre de placettes.

Il faut rappeler, par ailleurs, que cette dynamique des populations de la processionnaire du pin et l'extension de son aire de répartition ont été déjà étudiées en France entre 1981 à 2004 par Bouhot-Delduc (2005). Ce chercheur a pu montrer que les niveaux de population de la processionnaire du pin connaissent des pics de culmination qui durent de 1 à 3 ans, pendant lesquelles les chenilles engendrent de fortes pullulations dans leur aire naturelle, causant par-là d'énormes dégâts. Les gradations sont séparées par des périodes de cinq à huit ans, au cours desquelles les dégâts sont relativement limités car les chenilles sont absentes ou présentes à un faible niveau (une phase de latence). Robinet (2006) note, dans le même registre, que les niveaux d'infestation des chenilles de l'insecte en question connaissent des phases de pullulation, suivies de périodes de faible niveau d'infestation, selon une dynamique de population cyclique qui s'étend de 6 à 8 ans.

Ainsi, il faut tenir compte désormais de tous les paramètres pouvant influencer sur la dynamique de populations de l'insecte (exposition, altitude, topographie, structure du peuplement...).

Les populations de ce dangereux insecte montrent des fluctuations importantes liées à des divers facteurs particulièrement la nourriture, le climat, l'altitude et ses antagonistes (Démolin, 1969b). Les femelles choisissent le site de ponte qui peut maximiser leur survie larvaire à travers la quantité des ressources disponibles (Hódar *et al.*, 2002).

L'analyse fréquentielle des effectifs des œufs par ponte a permis de constater que les femelles pondeuses de la processionnaire peuvent déposer entre 255 et 350 œufs par ponte. Cela montre que le potentiel dynamique de la fécondité des femelles est très élevé dans le biotope de Chélia. Il faut savoir que la structure de la plante hôte et sa composition influencent la fécondité des femelles dans leur environnement. C'est ce qu'ont pu noter Tiberi *et al.*, (1999) qui ont souligné que la qualité et la quantité des ressources alimentaires disponibles chez la plante hôte sont le facteur écologique déterminant qui influence la productivité des œufs chez les femelles de la processionnaire du pin.

L'analyse de la régression linéaire a montré une relation entre les longueurs des pontes et le nombre d'œufs avec une probabilité très hautement significative, ceci au niveau des quatre stations prospectées.

Zamoum (1998) a également montré que la morphologie de la plante hôte a une influence primordiale sur la fécondité des femelles dans leurs habitats naturels. Le même auteur a noté qu'il existe une relation entre les longueurs des aiguilles et des rameaux et le nombre d'œufs. Les coefficients de corrélation entre ces paramètres sont ainsi hautement significatifs. De même, Démolin (1969 b) a encore constaté que la sélectivité de l'hôte est liée au critère relationnel entre l'oviposition de la femelle de la processionnaire, sa morphologie et le diamètre des aiguilles choisies.

3. Fécondité et facteurs de mortalité des embryons

Le taux d'éclosion des chenilles de la processionnaire du pin correspond au nombre de chenilles par ponte qui ont réussi leur développement embryonnaire et qui ont émergé de leurs œufs. Le nombre moyen d'œufs par lot représente les efforts de reproduction globaux d'une femelle (Battisti *et al.*, 2015). Nous avons décelé, au sein de nos sites en 2017, un effet d'expansion de l'aire de répartition de la processionnaire du pin sur le taux d'éclosion de ces chenilles. Donc un taux d'éclosion plus élevé en 2017 correspond à des colonies de processionnaire du pin plus populeuses qu'en 2018 et 2019.

Les pontes issues des populations des sites 1 et 3 ont présenté un taux d'éclosion de chenilles significativement plus bas que dans le reste des sites. Ce taux d'éclosion plus faible est dû à un taux de parasitisme plus élevé.

De la même façon pour l'année d'étude 2018, les pontes issues des sites 1 et 3 ont eu un taux d'éclosion significativement plus bas que les pontes issues des sites 2 et 4. Le fort succès à l'éclosion des chenilles se traduit par un taux de 77,36 % dans la station 4 concernant

l'année d'étude 2017, et 84,54 % dans la station 4 pour l'année d'étude 2018 sur l'effectif global des œufs examinés. Il semblerait que ce soit l'exposition qui joue un rôle sur la fertilité des femelles de la processionnaire du pin.

Les différences observées au niveau du taux d'éclosion sont liées à l'action d'ennemis naturels. Le taux d'éclosion est principalement affecté par deux facteurs : la mortalité naturelle des stades embryonnaires et l'impact des ennemis naturels.

Le nombre d'œufs non éclos varie en moyenne de 31,55 œufs, soit un taux de 10,57% dans le site 1 à 43,70 œufs dans le site 2 soit un taux de 14,92%. Selon Démolin et Millet (1981), les pontes non écloses sont dues au vol tardif de la population qui s'effectue après le mois de juillet. Elles ne donnent pas ainsi de descendance. Le taux de mortalité naturelle des embryons de notre insecte varie en moyenne de 12,72% à 15,31%. Le nombre important des œufs non éclos peut s'expliquer par la récolte des pontes tardives en altitude qui donne souvent des œufs non fertiles (Démolin, 1969a).

Il s'avère que le succès à l'éclosion des chenilles dans les sites 2 et 4 est plus conséquent que celui dans le site 1 et 3. Nous avons constaté également que le premier site se caractérise par un nombre d'œufs non éclos plus élevé que toutes les autres populations en 2017. Par contre leur nombre est plus faible que celui dans le reste des sites pour les années 2018 et 2019.

A ce propos, Ayache (2021) note que le nombre moyen des œufs éclos par ponte dans le Parc National de Chréa varie de 25,5 + 33,44 œufs dans la station des Glacières à 82 + 60 œufs dans la station de Beni Ali, et le nombre d'œufs non éclos varie en moyenne de 12,8 + 5,1 dans le site des quatre Bancs à 65 + 42 œufs dans le site Beni Ali.

Imbert (2012) relève, lui aussi, que le taux d'éclosion varie en moyenne de 65,26% à 96,73% alors que le taux de mortalité varie en moyenne de 2,82% à 12,24% sur des échantillons de pontes de la processionnaire dans le massif central en France.

Pour le nombre d'œufs parasités, nous avons constaté qu'il varie en moyenne de 2,30 œufs dans le site 4 à 11,34 œufs parasités dans le site 3. Le parasitisme global a augmenté ainsi à un taux de 17,77%.

Le taux de parasitisme observé est très variable. Il l'est selon les années et les sites. Plusieurs auteurs l'ont montré d'ailleurs en soulignant que les taux de parasitisme restent très fluctuants selon la région où les pontes ont été prélevées.

Dans la forêt de Chélia, en 2017, une année caractérisée par une extrême sécheresse, le taux de parasitisme observé a été beaucoup plus élevé, atteignant un maximum d'environ 18 %

sur le site 1. L'année suivante, le taux de parasitisme relevé était relativement bas avec un maximum d'environ 11% dans les populations échantillonnées en site 3.

Imbert *et al.* (2014) ont montré que le parasitisme des pontes au front était en moyenne de 7,3 % en 2003 avant de baisser à 1,5% en 2004. En 2008, il a frôlé les 11,5 % pour atteindre les 19,9 % en 2009. Il en ressort ainsi que le parasitisme est aussi extrêmement variable (Mirchev *et al.*, 2017).

Cependant, nos résultats montrent que les parasitoïdes répondent, de la même manière que leurs hôtes, à une diminution de la température en engendrant des mortalités importantes chez les parasitoïdes ou une désynchronisation de leur cycle avec celui de leur hôte. La température influe sur la phénologie de *T. pityocampa* et il pourrait y avoir une désynchronisation des parasitoïdes et de leurs hôtes dans les zones aux températures plus basses, ce qui explique le faible taux de parasitisme (Imbert, 2012).

Le taux de parasitisme le plus faible observé dans les sites 2 et 4 est dû à une densité plus faible de l'hôte dans ces mêmes zones. Si l'on admet que la densité de l'hôte influence la densité des parasites, alors le taux de parasitisme le plus faible observé au niveau des zones de colonisation est dû à une densité plus faible de l'hôte dans ces mêmes zones.

Le taux de parasitisme observé chez la processionnaire du pin varie de 6 % à 40 % sur l'ensemble des études qui ont déjà été réalisées dans de nombreux pays à travers le sud de l'Europe (Tiberi, 1990 ; Tsankov *et al.*, 1996 et Schmidt *et al.*, 1999).

4. Richesse spécifique des parasitoïdes embryonnaires.

Les parasitoïdes embryonnaires sont parmi les plus importants régulateurs naturels des populations de la processionnaire d'hiver, en particulier *Thaumetopoea pityocampa*. Ils peuvent avoir un effet notable sur la densité des espèces hôtes (Mirchev *et al.*, 1998).

Dans la cédraie de Chélia, nous avons retrouvé trois espèces de ces parasitoïdes parasitant les œufs de la processionnaire du pin : *Baryscapus servadeii*, *Ooencyrtus pityocampae* et *Trichogramma embryophagum*.

L'espèce *B. servadeii* y est la plus présente ; on l'a retrouvée tout au long des trois années d'échantillonnage dans l'ensemble du massif de Chélia. A noter que *Thaumetopoea* est principalement parasité par le monophage parasitoïde *Baryscapus servadeii* dans tout le bassin méditerranéen (Auger-Rozenberg *et al.*, 2015). Ce parasitoïde est un spécialiste de la processionnaire du pin, tandis qu'*O. pityocampae* est considéré comme un généraliste car il

peut parasiter d'autres hôtes. L'abondance et la richesse spécifique de tous ces parasitoïdes associés à la processionnaire du pin sont variables, selon l'année et la station étudiée.

Quant au parasitisme infligé par le polyphage *O. pityocampae*, il faut dire qu'il est négligeable sur la processionnaire du pin bien qu'il ait été également présent sur l'ensemble des quatre stations et ce, durant les trois années d'échantillonnage. Cette espèce bien qu'elle soit hyperparasitoïde, se caractérise par une faible incidence parasitaire. Cela serait dû à la présence de barrières des écailles protectrices des pontes de *Thaumetopoea pityocampa* (Biliotti, 1958 ; Palmeri et Pulvirenti, 2004).

En Italie et en Grèce, c'est *B. servadeii* qui a une abondance plus importante que *O. pityocampae* (Tsankov *et al.*, 1999 ; Zovi *et al.*, 2006). En Turquie par contre, c'est plutôt *O. pityocampae* qui est plus abondant que *B. servadeii* (Mirchev *et al.*, 2007).

Les études faites sur les parasitoïdes de la processionnaire du pin ont toujours mis en évidence la prédominance de ces deux espèces de parasitoïdes : le spécialiste *Baryscapus servadeii* et le généraliste *Ooencyrtus pityocampae* avec, toutefois, des proportions qui varient selon les régions. Il faut noter néanmoins que, dans notre échantillonnage de 2017, nous avons retrouvé sur le matériel biologique examiné une prédominance de deux parasitoïdes : *Baryscapus servadeii*, et *Trichogramma embryophagum*.

Ce dernier parasitoïde a été jugé plus efficace dans la cédraie de Chélia. Cette espèce est endoparasite des œufs, polyphage et se caractérise par une polyembryonie. Dans un même œuf, plus de 10 individus peuvent se développer, et cela permet d'en détruire une grande partie (Zamoum *et al.*, 2017).

T. embryophagum a été absent durant les deux années de suite 2018 et 2019 dans l'ensemble des populations de la processionnaire du pin qui attaque le cèdre d'Atlas alors qu'il y était présent en 2017. Étant polyphage, il n'est pas un parasite obligatoire de *Thaumetopoea pityocampa* ; son absence est due à une mauvaise synchronisation des parasitoïdes avec leur hôte les obligeant à parasiter un hôte alternatif. Le genre *Trichogramma* a une gamme d'hôtes très large (Tsankov et Mirchev, 2003). Durant les trois années, nous n'avons pas trouvé de parasitoïdes diapausants dans nos échantillons, mais il est possible que des conditions particulières des deux années aient induit une diapause chez *T. embryophagum* dont les individus n'auraient émergé que dans les années à venir. Ils n'auraient donc pas pu parasiter les œufs pondus durant 2018 et 2019.

Géri (1980) avait montré l'existence de diapausants dans les populations de parasitoïdes dans le sud de la France avec un fort pourcentage d'individus présentant une diapause de deux années

après le dépôt des œufs. *T. embryophagum* se reproduit par la parthénogenèse thélytoque et présente deux générations par an. Zamoum (1998) note, lui, que les larves de la première génération terminent leur développement avant les éclosions des chenilles, tandis que la seconde génération entre en diapause et hiverne à ce stade jusqu'à la fin de printemps.

La richesse spécifique et l'abondance des parasitoïdes semblent être très variables tout au long des années de l'étude. Les résultats obtenus mettent en évidence une faible incidence des parasites embryonnaires au cours des années 2018 et 2019 dans les quatre stations prospectées. L'abondance des parasitoïdes est liée à l'abondance de leur hôte. Tsankov *et al.* (1998) notent l'existence d'une corrélation entre la densité de la population de notre insecte et la densité de ses parasitoïdes. La diminution du taux de parasitisme est ainsi corrélée à la réduction de la densité de population de *Thaumetopoea pityocampa*.

5. Facteurs de régulation écologique et impact du parasitisme

En ce qui concerne la fréquence de présence des parasitoïdes oophages, le parasitoïde spécifique de la processionnaire *Baryscapus servadeii* se charge de l'essentiel du parasitisme. On le retrouve d'ailleurs en très grande proportion jusqu'à atteindre les 99 %. Le généraliste *O. pityocampae*, quant à lui, a une fréquence négligeable.

En Turquie par exemple, le taux de parasitisme observé chez la processionnaire du pin est respectivement de 42 %, 32 % et 26 % pour *O. pityocampae*, *B. servadeii* et *A. bifasciatus*, (Şahin *et al.*, 2020).

En 2017, la présence de *T. Embryophagum* a été très remarquable. Au niveau de la station 4, les deux espèces majoritaires *B. servadeii* et *T. embryophagum* ont une abondance équivalente à plus de 46% du parasitisme total. Ailleurs, Mirchev *et al.* (2007) ont noté qu'en Turquie, le *T. embryophagum* a été observé avec un taux de parasitisme qui varie en moyenne de 0,3% à 21,8% selon les régions où les pontes ont été prélevées. En Bulgarie, des études ont montré un pourcentage encore plus élevé de ce parasitoïde (Mirchev *et al.*, 2017).

En 2018 dans la station 4, l'essentiel du parasitisme a été infligé par le généraliste *O. pityocampae* atteignant un taux de 52,17% de l'effectif global. Mêmes résultats réalisés au Maroc par Schmidt *et al.* (1997), au Portugal par Mirchev et Tsankov (2000), en Italie par Zovi (2006), en Bosnie-Herzégovine par Mirchev *et al.* (2015), en Grèce par Georgieva *et al.* (2020) et en Bulgarie par Mirchev *et al.* (2021).

À ce propos, une diversité spécifique comparable à celle des parasitoïdes embryonnaires a été notée dans les œufs de diverses espèces de la processionnaire. Nous pouvons citer là : *T.*

Bonjeani en Algérie (Rahim *et al.*, 2016), *T. wilkinsoni* au Liban (Nasr *et al.*, 2013) et en Turquie (Erkaya, 2020), *T. ispartaensis* en Turquie (Avcı, 2003) et *T. pinivora* en Espagne (Battisti *et al.*, 2015).

Afin de tirer plus d'enseignements sur l'effet de l'altitude sur la répartition et l'émergence des parasitoïdes, une analyse a été réalisée par ANOVA. Les résultats ont montré une différence statistiquement significative entre les moyennes d'émergence de trois espèces de parasitoïdes. Cette différence s'explique par la position en altitude du site prospecté. Les différences climatiques en latitude ou en altitude modifient le cycle de développement de la processionnaire du pin (Démolin, 1969a). Ce qui est à même d'affecter la période de ponte et, par conséquent, le moment où les œufs seront disponibles pour les parasitoïdes. Une émergence prématurée des parasitoïdes embryonnaires réduira ainsi la probabilité de trouver des œufs à parasiter. La synchronisation entre l'hôte et le parasitoïde ou l'ennemi naturel, peut disparaître dans de nouvelles conditions de température comme dans le cas de la processionnaire du pin (Battisti *et al.*, 2006). L'auteur précité note que la capacité de vol des parasitoïdes est plus faible, ils sont donc incapables de suivre la vitesse d'expansion de leur hôte, mais le climat pourrait intervenir pour jouer hasardeusement un rôle sur leur capacité à suivre leur hôte.

Pour un parasitoïde généraliste comme *O. pityocampae*, on peut supposer qu'il serait capable de trouver un hôte alternatif en cas d'absence d'œufs de la processionnaire du pin, mais pour le parasitoïde spécialiste *B. servadeii*, cette désynchronisation pourrait provoquer une chute de ses populations (Imbert, 2012).

Mirchev *et al.* (2015) montrent que l'action des parasitoïdes polyphages présente une large gamme d'hôtes et leur présence dans un biotope spécifique est accidentelle. Un antagonisme entre les parasitoïdes a été observé concernant leur capacité à parasiter les œufs de la chenille processionnaire dans les quatre sites prospectés.

Les mêmes auteurs (2021) notent qu'en Bulgarie, l'impact de *O. pityocampae* et *B. servadeii* diminue dans les altitudes les plus élevées, contrairement aux deux autres parasitoïdes importants (*Anastatus bifasciatus* et *Trichogramma sp.*) qui voient leur efficacité augmentée en altitude. Cela est dû probablement, selon eux, à la réduction de concurrence de *O. pityocampae* et *B. servadeii*. Cet avis est partagé par Hódar *et al.* (2021) qui estiment que plus on monte en altitude plus le taux de parasitisme diminue pour les deux principaux parasitoïdes de la chenille processionnaire du pin *O. pityocampae* et *B. servadeii* dans la chaîne de montagnes de la Sierra Nevada (sud-est de l'Andalousie, Espagne), avec toutefois une diminution plus accentuée pour

le spécialiste *B. servadeii*. Nous avons noté, quant à nous, que l'espèce *B. servadeii* est plutôt actif car elle assure l'essentiel du parasitisme dans les sites d'altitude prospectés.

6. Dynamique des émergences des parasitoïdes des œufs

L'étude de la chronologie de développement des parasitoïdes dans les sites prospectés nous a permis de suivre la dynamique des populations au cours de leur gradation. Les adultes des trois parasitoïdes oophages *B. servadeii*, *O. pityocampae* et *T. embryophagum* mènent une vie éphémère - quelques jours d'existence -, durant laquelle ils effectuent leur vol entre les mois de mars à juin. Les dates d'émergence de *B. servadeii* correspondent avec la période de présence des œufs de la processionnaire. Les premiers individus à émerger sont capables de parasiter à nouveau les pontes de notre insecte immédiatement après leur émergence, ce qui leur permet de réaliser deux générations par an (Dulaurent, 2010). Les individus de l'autre parasitoïde *O. pityocampae* émergent deux mois avant la période de présence des œufs de la processionnaire, et sont également capables de donner naissance à deux générations par an (Dulaurent, 2010). Quant au *T. embryophagum*, il semble marquer une diapause hivernale à l'intérieur de l'œuf de son hôte puisque nous en avons relevé deux vagues d'émergence (Gachi, 2004).

Dans ce registre, Arnaldo et Torres (2006) rapportent que, dans les pinèdes du nord du Portugal, *B. servadeii* et *O. pityocampae* émergent en deux périodes : la première à l'automne de la même année pendant de la période des pontes, et la seconde au printemps de l'année suivante, après qu'ils aient passé l'hiver en diapause.

Selon Bellin *et al.* (1990), les parasitoïdes émergent en septembre et octobre après l'émergence des chenilles. Mais Tsankov *et al.* (1996) ont un autre avis. Même si l'émergence des parasitoïdes était, rapportent-ils, enregistrée avant l'hiver, la plupart des *B. servadeii* émergent en juin, tandis que les *O. pityocampae* apparaissent en mai. Au Maroc, le généraliste *O. pityocampae* termine la période d'émergence des adultes avant l'hiver et 50% des adultes du spécialiste *B. servadeii* émergent après une diapause hivernale.

7. Distribution des parasitoïdes oophages sur les pontes

Sur le nombre de parasites aux trois positions de la ponte, nos résultats montrent que le nombre des œufs parasités est plus conséquent aux deux extrémités de la ponte de la processionnaire du pin, bien que le taux de parasitisme soit significativement moins élevé dans la partie médiane. Ils corroborent ainsi ceux de Tsankov *et al.* (1996) en Bulgarie, Schmidt *et al.* (1999) dans la péninsule Ibérique et Mirchev *et al.* (2004) en Turquie.

Tsankov *et al.* (1996) affirment que *O. pityocampae* et *B. servadeii* s'attaquent préférentiellement aux deux extrémités de la ponte surtout en cas de faible taux de parasitisme. Ces parasitoïdes commencent à s'en prendre aux parties médianes au cas où il y a absence d'espèces compétitrices. Masutti (1964) note que *B. servadeii* a la faculté de se glisser entre les écailles pour atteindre les œufs. Mirchev *et al.* (2004) ont constaté, eux, que *O. pityocampa* recherche principalement la partie apicale de la ponte, tandis que *B. servadeii* préfère, lui, la partie basale de la ponte.

Contrairement à leur comportement au Maroc, Schmidt *et al.* (1997) constatent que *B. servadeii* préfère la partie apicale alors que *O. pityocampae* choisit fréquemment la partie basale. Les résultats qu'ils ont obtenus en 2012 montrent que les parties extrêmes sont les plus recherchées par les parasitoïdes. De même, ils ont rapporté en 2004 que les œufs parasités par *Trichogramma* sp se localisent sur la partie supérieure et inférieure de la ponte. Les œufs des deux extrémités de la ponte ne sont pas en partie couverts par des écailles. C'est ce qui peut faciliter ainsi l'action des parasitoïdes (Tsankov *et al.*, 1996).

Les écailles sont disposées régulièrement à la surface des œufs, elles sont en mesure de jouer un rôle de protection pour les œufs contre l'action des différents ennemis naturels dont les parasitoïdes et autres. Ceci peut donc réduire à la fois l'influence des parasitoïdes et leur surface de répartition sur les œufs. D'après Biliotti (1958), la faible efficacité parasitaire de *Ooencyrtus pityocampae* serait due à la présence des écailles recouvrant les œufs de *T. pityocampa*. Toutefois, l'action parasitaire de *T. embryophagum* est fortement contrariée par la présence des écailles sur les œufs ; son efficacité parasitaire restera donc très faible car localisée sur les deux parties extrêmes des pontes qui ne sont pas protégées en totalité par les écailles.

Le parasitisme des œufs de la processionnaire du pin est un processus complexe, dépendant de nombreux facteurs (Mirchev *et al.*, 2021). Nous pouvons en citer entre autres : la densité de population de la processionnaire du pin, la structure de la plante hôte ainsi que d'autres facteurs abiotiques notamment l'altitude et la température qui peuvent influencer le développement et la distribution des parasitoïdes dans leur aire de répartition.

8. Progression et stratégie d'occupation

Dans les sites prospectés, les orientations sud et est sont les plus recherchés par les femelles de la processionnaire du pin pour pondre. L'orientation sud correspond aux sites où l'optimum thermique est assuré pour l'évolution des chenilles. Le nombre de pontes est très limité au nord à cause de l'insuffisance de l'ensoleillement. L'étude effectuée par Geri (1983)

dans les montagnes corses en France ont confirmé d'ailleurs que les attaques de la processionnaire du pin sont plus dévastatrices sur les arbres exposés sud que chez ceux exposés nord. En parlant de cela, Démolin (1969a) a constaté que les sites les plus ensoleillés de l'arbre sont les plus recherchés par la processionnaire du pin.

Sur la base d'échantillonnage des pontes de la processionnaire du pin qui a été relevé au niveau de la cédraie de Chélia, le degré d'infestation est significatif dans les zones exposées au sud. A ce propos Géri (1983) a noté que, en 1970, la population est plus faible en exposition nord qu'en exposition sud dans la vallée de Niolo en Corse.

Si l'on considère l'année 2017, les emplacements à l'exposition nord sont aussi conséquents à Chélia.

L'évolution de l'aire de répartition de l'insecte ravageur entre les années 1969 et 1996 a été étudiée par Démolin *et al.* (1996) qui n'ont pas manqué de souligner une progression de cette espèce vers le nord de la France. Cette progression est due au réchauffement climatique observé depuis le début des années 70 au nord de l'Europe.

Rousselet *et al.* (2010) ont constaté, eux aussi, que depuis le début des années 90, ce ravageur opère un mouvement progressif et continu vers le nord, ce qui concorde avec l'augmentation constatée des températures en hiver. La vitesse de progression dépend des capacités de la processionnaire du pin à coloniser les régions à climat plus favorable. De même, le changement de l'aire de répartition peut entraîner des changements d'hôtes et des décalages du cycle, comme au Portugal où les chenilles se développent en été (Kerdelhué *et al.*, 2009). De plus, les dernières études ont montré une extension du défoliateur vers le nord du bassin méditerranéen suite à ce changement climatique.

Les sites d'échantillonnages 1 et 3 sont les mieux ensoleillés, favorisant ainsi leur colonisation par les populations en expansion de la processionnaire du pin. A noter que ce ravageur n'est présent que dans des régions où la durée moyenne annuelle d'insolation est supérieure à 1800 heures (Huchon et Démolin, 1970). Une telle durée est nécessaire au développement des chenilles processionnaires. Démolin (1969a) évoque, à ce sujet, que la moyenne d'ensoleillement journalière joue un rôle important dans la détermination de la limite nord de la répartition.

Par contre, les sites 2 et 4 occupent des peuplements de cèdre fermés et mal ensoleillés, ce qui engendre une concurrence verticale entre eux et éloigne les femelles de la processionnaire. Huchon et Démolin (1970) indiquent que la femelle montre une attirance plus nette vers la crête et les arbres isolés.

Cependant l'intensité des dégâts est variable car elle dépend tout aussi de l'essence et du type de peuplement. Nous avons remarqué, à titre d'exemple, que dans les peuplements fermés de la plaine, elle colonise principalement les lisières, notamment celles orientées vers le sud. Les plantations pures, les bordures de peuplement et les arbres isolés sont ainsi les plus sensibles aux attaques. Dulaurent (2010) note que les peuplements forestiers purs subissent plus de dégâts d'insectes herbivores que les peuplements mélangés.

La répartition géographique de la processionnaire du pin dépend de nombreux facteurs écologiques, comme l'ensoleillement, la température, la photopériode, la latitude et l'altitude. C'est pourquoi certaines régions sont plus propices que d'autres au développement de ce défoliateur.

CONCLUSIONS GENERALES



CONCLUSIONS GENERALES

Le cèdre de l'Atlas, *Cedrus atlantica*, est l'un des résineux les plus importants dans le nord de l'Afrique, tant du point de vue économique qu'écologique et même esthétique. Cet arbre connaît malheureusement, ces deux dernières décennies, un dépérissement inquiétant, suite à l'interaction de plusieurs facteurs destructeurs, entre autres, la processionnaire d'hiver, *Thaumetopaea pityocampa* (Lep., Thaumetopoeidae). Cet insecte est considéré comme l'un des plus redoutables défoliateurs du cèdre de l'Atlas ; ses attaques ont été d'ailleurs dévastatrices notamment durant les années coïncidant avec les périodes de sécheresse qui ont frappé cette région du monde.

En Algérie, la cédraie du Chélia constitue une des ressources les plus précieuses pour l'environnement, en raison de ses avantages écologiques, économiques, spirituels et sociaux. Mais malgré cette importance, nous constatons, de plus en plus, une augmentation de dégâts provoqués par cette processionnaire du pin qui a connu, ces dernières années avec le réchauffement climatique, une expansion spectaculaire en altitude dans cette belle cédraie des Aurès.

En effet, les niveaux d'infestation de *T. pityocampa* connaissent, selon une dynamique de population cyclique, des phases de pullulation qui pourront entraîner d'énormes dégâts se traduisant par des pertes de croissance des arbres et affectant, en plus, d'autres espèces végétales qui en sont dépendantes. Reste que ces phases sont suivies de périodes de faible niveau d'infestation durant lesquelles les niveaux de populations sont réduits et les dégâts relativement limités.

Une pullulation exceptionnelle de processionnaire du pin a été signalée durant l'hiver 2016-2017, elle a provoqué des défoliations importantes sur les cèdres et engendré un retard de croissance annuelle en diamètre et en hauteur pour les jeunes plantations. Comme il est prédit aussi que l'augmentation des pullulations de ce défoliateur entrainera une diminution importante de la productivité des forêts sans que leur impact réel ne soit, jusque-là, quantifié et compris.

Après cette invasion massive, les niveaux de la population de chenilles ont diminué pour atteindre le seuil de latence passant par la phase de rétrogradation qui s'échelonne sur la période de 2018 à 2020 pendant laquelle les dommages ont été relativement limités. Il faut dire que les conditions météorologiques défavorables ont participé au phénomène de rétrogradation de ces populations. La dynamique des populations de *T. pityocampa* dépend extrêmement de la température et l'ensoleillement.

En Algérie, l'année 2017 a été marquée par une succession infernale de périodes de sécheresse. Ce réchauffement dû au changement climatique va accroître l'intensité et la fréquence des pullulations de cet insecte. En effet, le développement larvaire hivernal de ses chenilles les rend particulièrement sensibles aux variations de température durant cette période de l'année où le réchauffement climatique est le plus marqué.

Les effets du changement climatique sur les populations de la processionnaire du pin se produisent soit directement par l'influence de climat sur la physiologie et le comportement de ce ravageur, soit indirectement par des effets physiologiques sur leurs hôtes, entraînant un affaiblissement et permettant ainsi de réduire leur résistance aux ravageurs.

Cet insecte constitue donc un bon modèle biologique pour l'étude du changement du climat. Ce facteur ajouté à la présence de prédateurs et parasites et à la quantité et la qualité des ressources alimentaires, participent aux importantes variations de niveaux de populations de cet insecte ravageur.

La disponibilité en nutriments dans la plante hôte peut favoriser également la performance et la ponte de la processionnaire du pin qui fait augmenter l'ampleur des dommages occasionnés.

Reste que les données sur les pontes sont le facteur déterminant de l'état de l'infestation et de l'évolution de la gradation. En effet, sur la base de ces données recueillies sur le cèdre de l'Atlas au niveau de la cédraie de Chélia, il a été constaté des mensurations biométriques des pontes indiquant une variabilité entre leur taille et ce, d'une station à une autre et d'une année à une autre. La structure de la plante hôte et sa composition affecte celle des pontes et influe sur la fécondité des femelles.

L'aspect visuel d'un arbre peut rendre compte de son état de santé, ce qui peut jouer un rôle supplémentaire dans le choix de l'hôte pour la prise alimentaire et l'oviposition. Lors de la recherche effectuée au site d'oviposition, il a été constaté en effet que la femelle effectue un choix sélectif dans les arbres hôtes à investir.

La fécondité de *T. pityocampa* varie donc d'année en année à Chélia. Pour cet insecte à caractère gradationnel périodique, les années précédant la culmination de la gradation sont traduites par une fécondité maximale. Une forte densité de pontes se traduit par une grande densité de populations de la processionnaire du pin et, par-là, une défoliation de plus en plus importante.

Au niveau des zones d'expansion de la processionnaire du pin que nous avons étudiées, la densité de population y est moins importante et les pontes deviennent de plus en plus difficiles

à trouver, ce qui explique que nous en avons moins. Ces fluctuations sont dues à l'intervention de nombreux facteurs capables d'influencer sur la multiplication et la survie des populations. Nous pouvons en citer, entre-autres, les conditions climatiques notamment les températures hivernales qui jouent un rôle prépondérant, dans la mesure où certaines populations de la processionnaire du pin y subissent une phase de rétrogradation avec une grande hétérogénéité selon les régions.

Le taux d'éclosion enregistré est élevé, montrant fort bien le succès reproducteur des femelles. Ce taux est favorisé principalement par deux facteurs : la mortalité naturelle des stades embryonnaires et l'impact des ennemis naturels. Il faut savoir ici que les communautés d'ennemis naturels sont connues pour leur contribution dans le contrôle de la chenille processionnaire du pin, avec plus de 50 % de la réduction de ses populations notamment dans certaines conditions écologiques (Biliotti, 1958).

Dans la cédraie de Chélia, une diversité de trois parasitoïdes oophages a été relevée : *Baryscapus servadeii*, *Ooencyrtus pityocampa* et *Trichogramma embryophagum*. Les parasitoïdes des œufs de la processionnaire du pin sont essentiellement des hyménoptères de la famille des chalcidiens et sont utilisés pour la régulation des populations des processionnaires, par des méthodes d'élevage et des lâchers périodiques. Ces ooparasitoïdes constituent une approche de lutte biologique qui peut s'avérer très performante, si l'on respecte bien entendu les règles écologiques de stabilité et d'équilibre (Jactel *et al.*, 2015).

De même, nous avons constaté des variations dans l'action des trois parasites, laquelle variabilité est liée à l'hôte. L'abondance des parasitoïdes est donc à mettre en relation avec l'abondance de leurs hôtes. Une corrélation entre la densité de population de la processionnaire du pin et la densité de ses parasitoïdes fait que la diminution du taux de parasitisme a été corrélée à la réduction de la densité de population de *Thaumetopoea pityocampa*.

L'aire de répartition du parasitoïde spécialiste *B. servadeii* est intimement liée à celle de son hôte. Concernant les parasitoïdes généralistes *O. pityocampa* et *T. embryophagum*, leur capacité à avoir de multiples hôtes ont permis leur survie dans des refuges différents ; leur répartition ne semble pas alors liée à celle de la processionnaire du pin.

Le spécialiste de la processionnaire du pin assure la majorité du parasitisme que l'on retrouve en très grande proportion. Le généraliste *O. pityocampae* a, quant à lui, une fréquence de présence négligeable. Une efficacité parasitaire chez *Trichogramma embryophagum* a été notée dans la cédraie de Chélia.

Le climat joue un rôle primordial et déterminant sur la distribution géographique, le développement de l'espèce ainsi que sur son abondance et ses parasitoïdes.

Dans les sites prospectés de la cédraie de Chélia, la distribution interannuelle des pontes sur l'arbre, montre que l'exposition sud est la plus adéquate pour les femelles pondant leurs œufs. Le comportement de ponte et du choix de l'hôte peuvent permettre d'identifier le type de dynamique des populations de cet insecte. Ce comportement est géré notamment par la température et l'ensoleillement. L'altitude et la latitude peuvent tout autant influencer fortement le déclenchement en différents stades.

Nos résultats révèlent que les deux extrémités faiblement recouvertes par les écailles protectrices des pontes sont les plus recherchées par les parasitoïdes oophages.

La dynamique de la population *B. servadeii* évolue très significativement par rapport à *O. pityocampa*. L'émergence des deux auxiliaires parasites s'est échelonnée parallèlement. Les dates de calage sont très importantes pour la lutte biologique à base d'ooparasites contre la population de la processionnaire du pin.

Ces dernières années, la protection de la cédraie de Chélia s'impose de plus en plus comme une préoccupation majeure. Il est donc indéniable que l'expansion des insectes ravageurs, à l'image de la processionnaire du pin, doit dorénavant passer par une gestion optimale pour minimiser ses effets sur l'environnement. La méthode classique de lutte chimique contre ce défoliateur, jadis considérée comme panacée, fait de plus en plus place à la lutte intégrée, c'est-à-dire une lutte biologique par utilisation de prédateurs, de parasitoïdes, de micro-organismes et de méthodes dites physiques dans lequel l'utilisation de traitements chimiques détruit ce cortège des auxiliaires parasites contre la processionnaire.

La mortalité causée par les parasitoïdes est plus importante en nature que celle attribuée aux prédateurs et aux microorganismes combinés et plus particulièrement les parasitoïdes oophages, dont les larves se développent aux dépens des embryons de *T. pityocampa*.

Dans ce contexte, un projet de recherche en protection biologique contre la processionnaire du pin est en chantier avec une étude de parasitoïdes embryonnaires pouvant contrôler les populations de ce ravageur dès le premier stade de leur développement.

Ce projet mettra en jeu l'élevage en masse qui se définit par la production de parasitoïdes capables d'atteindre les objectifs d'un programme de lutte biologique et les lâcher en forêt, en période de ponte de *T. pityocampa*. Ce qui permettra à ces parasitoïdes de développer une stratégie pour réinstaurer l'équilibre naturel, à condition que le milieu de leur évolution ne soit pas agressé par des actions anthropiques.

Les parasitoïdes produits doivent être de bonne qualité, c'est-à-dire qu'ils doivent être capables de lutter efficacement contre les ravageurs ciblés. Il est nécessaire donc d'en produire en grand nombre et à des couts raisonnables.

Ces auxiliaires seront, comme précédemment, élevés de façon massive et relâchés dans le site où sévit ce ravageur. Après les lâchers de ces parasitoïdes, l'on doit procéder à une évaluation de leur capacité à supprimer ce ravageur redoutable. Si maintenant la lutte n'est pas concluante, une autre investigation avec un autre ennemi naturel doit être envisagée et entreprise.

Il en ressort enfin que la mise en place de programmes de lutte biologique, bien qu'elle puisse paraître laborieuse, est plus efficace que le développement de nouveaux insecticides chimiques à des conséquences néfastes sur l'environnement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdessemed, K. H. (1981) Le Cèdre de l'Atlas dans les massifs de l'Aurès et du Belezma- Étude phytosociologique et problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse de Doc, Fac. St. Jérôme, Marseille, 199 p.
- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., Mcgowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., LIM, J.H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010) A global overview of drought and heat- induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660-684.
- Alpert, P., Ben-Gai, T., Bahard, A., Benjamini, Y., Yekutieli, D., Colacino, M., Diodato, L., Ramis, C., Homar, V., Romero, R., Michaelides, S., & Manes, A. (2002) The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophys. Res. Lett*, 29, 1-4.
- Ayache, S. (2021) Caractéristiques des écophases et importance des parasitoïdes de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* (Denis et Schiffermuller, 1775) dans le Parc National de Chrea. Thèse de Doc, ENSA. El Harrach, Algérie, 138p.
- Ayache, S., El Mokhefi, M., Bonifácio, L., & Chakali, G. (2021) Egg batches parasitism of processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera, Thaumetopoeidae), from two Atlas cedar ecotypes in algeria. *Zooidiversity*, 55(3), 239-250.
- Arnaldo, P.S., & Torres, L.M. (2006) Effect of different hosts on *Thaumetopoea pityocampa* populations in northeast Portugal. *Phytoparasitica*, 34, 523-530.
- Arnaldo, P.S., Chacim, S., & Lopes, D. (2010) Effects of defoliation by the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* on biomass growth of young stands of *Pinus pinaster* in northern Portugal. *Iforest-Biogeosciences and Forestry*, 3, 159-162.
- Auger-Rozenberg, M.A., Torres-Leguizamon, M., Courtin, C., Rossi, J.P., & Kerdelhué, C. (2015) Incongruent evolutionary histories of two parasitoids in the Mediterranean basin: Influence of host specialization and ecological characteristics. *Biogeography*, 42, 1040–1051.
- Aussenac, G. (1984) Le cèdre, essai d'interprétation bioclimatique et écologique. *Bull. Soc. Bot. Fr., Actuel Bot.*, (2/3/4), 385-398.
- Avcı, M. (2003) Parasitism of egg-batches of the cedar processionary moth *Traumatocampa ispartaensis* in Turkey. *Phytoparasitica*, 31, 118-123.

- Bagnouls, H., & Gaussen, S. (1953) Saisons sèches et indice xérothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, 33, 193-239.
- Barbaro, L., Couzi, L., Bretagnolle, V., Nezan, J., & Vetillard, F. (2008) Multi-scale habitat selection and foraging ecology of the eurasian hoopoe (*Upupa epops*) in pine plantations. *Biodiversity and Conservation*, 17, 1073-1087.
- Bariteau, M., Panetsos, K. P., M'Hirit, O., & Scaltsoyiannes, A. (1999) Variabilité génétique du cèdre de l'atlas en comparaison avec les autres cèdres méditerranéens. *Forêt méditerranéenne*, XX (4), 175-190.
- Basso, A., Negrisolo, E., Zilli A., Battisti, A., & Cerretti P. (2016) A total evidence phylogeny for the processionary moths of the genus *Thaumetopoea* (Lepidoptera : Notodontidae : Thaumetopoeinae). *Cladistics*, 1-17.
- 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.
- Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., & Larsson, S. (2005) Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecol. Applic*, 15, 2084-2096.
- Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E., & Larsson, S. (2006) A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12, 662-671.
- Battisti, A., Avcı, M., Avtzis, D.N., Ben Jamaa, M.L., Berardi, L., Berretima, W., Branco, M., Chakali, G., El Alaoui, E.I., Fels, M.A., Frérot, B., Hódar, J.A., Ionescu-Mălăncus, I., İpekçi, K., Larsson, S., Manole, T., Mendel, Z., Meurisse, N., Mirchev, P., Nemer, N., Paiva, M.R., Pino, J., Protasov, A., Rahim, N., Rousselet, J., Santos, H., Sauvard, D., Schopf, A., Simonato, M., Yart, A., & Zamoum, M. (2015) Natural history of the processionary moths (*Thaumetopoea* spp.): New insights in relation to climate change. In A. Roques (Ed.), *Processionary moths and climate change: An update, chapter 2*. Springer, Quae, Dordrecht-Versailles. France, 15–79.
- Beghami, Y. (2013) Écologie et dynamique de la végétation de l'Aurès : analyse spatio-temporelle et étude de la flore forestière et montagnarde. Thèse de Doc, Univ Mohamed Khider, Biskra. Algérie, 193 p.
- Bellin, S., Schmidt, G.H., & Doumapetridou, E. (1990) Structure, Ooparasitoid Spectrum and Rate of Parasitism of Egg-Batches of *Thaumetopoea-Pityocampa* (Den and Schiff) (Lep

- Thaumetopoeidae) in Greece. *Journal of Applied Entomology-Zeitschrift Fur Angewandte Entomologie*, 110, 113-120.
- Belloula, N. (2020) Caractérisation des facteurs écologiques influents sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas - Cas des cédraies du massif du Aurès. Thèse de Doc, Univ. Batna 1. Algérie, 99 p.
- Benabid, A. (1994) Biogéographie phytosociologie des cédraies de l'Atlas à *Cedrus atlantica* Manetti. *Ann. Rech. For. Maroc*, 27, 62-76.
- Bentouati, A., & Bariteau, M. (2006) Réflexion sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, t. XXVII. 4, 317-322.
- Bentouati, A. (2008) La situation du cèdre de l'Atlas dans les Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, t. XXIX. 2, 203-208.
- Bertella, N. (1987) Bioécologie de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. (Lepidoptera, Thaumetopoeidae) dans quelques régions de l'Algérie. Mémoire de Mag, INA, El-Harrach, 168 p.
- Biliotti, E. (1958) Les parasites et prédateurs de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. (Lepidoptera). *Entomophaga*, 3, 23-34.
- Boivin, G. (1999) Integrated management for carrot weevil. *Integrated Pest Management Reviews*, 4, 21-37.
- Bonnet, C., Martin, J.C., & Mazet, R. (2008) La processionnaire du pin. *Stantari - histoire naturelle et culturelle de la Corse*, 14, 29-33.
- Boucherf, D. (2010) Étude spatio-temporelle et prévision saisonnière des températures sur le Nord de l'Algérie. Mémoire de Mag, Univ. Houari-Boumediène, Algérie, 144 p.
- Bouchou, L. (2015) Les parasitoïdes embryonnaires de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Schiff et leur importance dans quelques peuplements de pin et de cèdre du Nord de l'Algérie. Thèse de Doc, ENSA. El Harrach, Algérie, 131p.
- Boudy, P. (1950) Economie forestière Nord-Africaine : monographie et traitement des essences forestières. *Éd. Larose*, 2, 529-619.
- Boudy, P. (1955) Economie forestière Nord Africaine, description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. *La rose édit., Paris*, IV, 483 p.
- Bouhot- Delduc, L. (2005) Dynamique des populations de la processionnaire du pin et extension de son aire de colonisation de 1981 à 2004 en France. Bilan de santé des forêts en 2004. Département de santé des forêts. Échelon central, Paris. 6p

- Boutaba, H. (2018) Contribution à l'étude typologique et cartographique des cédraies dans quelques monts du Chelia (W. Khenchela) : corrélation dendrométrique, pédologique et éco-physiologique (croissance, nutrition N.P.K). Mémoire de Mag, Univ Hadj Lakhdar, Batna 1, 111 pp.
- Bouzar- Essaidi, K. (2013) Modulation de la fitness de la processionnaire du pin (insecte : lepidopteres) et effets de l'anthropisation sur des stations a pinedes littorales. Approche d'une methode de lutte alternative contre ce ravageur. Mémoire de Mag, Univ. Saad Dahleb de Blida, Algérie, 210 p.
- Buffo, E., Battisti, A., Stastny, M., & Larsson, S. (2007) Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the Italian Alps. *Agr. For. Entomol*, 9(1), 65- 72.
- Carus, S. (2004) Impact of defoliation by the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*) on radial, height and volume growth of Calabrian pine (*Pinus brutia*) trees in Turkey. *Phytoparasitica*, 32, 459-469.
- Chenchouni, H., Zanati, K., Rezougui, A., Briki, A., & Arar, A. (2010) Population monitoring of pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*) by pheromone trapping at the southern limit of distribution of *Pinus halepensis* in eastern Algeria. *Forest Science and Technology*, 6, 67-79.
- Ciesla, W.M., Erkanat, M., & Akeson, C. (2011) Predicting defoliation by pine processionary caterpillar, *Thaumetopoea wilkinsoni* (Lepidoptera : Notodontidae) in young *Pinus* plantations in northern Cyprus. *Silva Lusitana*, N° Especial, 79-88.
- Dajoz, R. (1971) Précis d'écologie. Ed. Dunod, Paris, 434 p.
- Dajoz, R. (1998) les insectes et la forêt. Ed. Lavoisier tec & doc, Paris, 594 p.
- Dajoz, R. (2002) les coléoptères carabidés et ténébrionidés. Ed. Tec & doc, 521p.
- Debazac, E.F. (1964) Manuel des conifères. Nancy, *École nationale des Eaux et Forêts*, 172 p.
- De Kouaci, M. (2001) Les possibilités de la lutte microbiologique, Emphase sur le champignon entomopathogène *B. bassiana*. *Vertigo*, la revue électronique en sciences de l'environnement, volume 2 numéro 2.
- Demarteau, M., Francois, L., Cheddadi, R., & Roche, E. (2007) Réponses de *Cedrus atlantica* aux changements climatiques passés et futurs. *Geo-Eco-Trop*, 31, 105-146.
- Démolin, G. (1962) Comportement des chenilles de *Thaumetopoea pityocampa* au cours des processions de nymphose. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 254, 733–744.

- Démolin, G. (1967) Grégarisme et subsocialité chez *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Nid d'hiver – activité de tissage. *C. R. Ve congrès de l'union internationale pour l'étude des insectes sociaux*, 69-77.
- Démolin, G. & Delmas, J. (1967) Les éphippigères (Orthoptères Tettigonidae) prédateurs occasionnels, mais importants de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. *Entomophaga*, 12, 399-401.
- Démolin, G. (1969a) Bioecologica de la processionaria del pino, *Thaumetopoea pityocampa*. Incidencia de los factores climaticos. *Bol. Serv. Plagas Forest*, 23, 9-24.
- Démolin, G. (1969b) Comportement des adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff : dispersion spatiale, importance écologique. *Annales des Sciences Forestières*, 26, 81-102.
- 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. *Ann. Zool. – Écol. Anim*, Hors-série, 33-56.
- Démolin, G. (1974) Réflexions générales sur la diapause et les diapauses renforcées chez la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiff, Lepidoptera Thaumetopoeidae. Compte-rendu de la Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique.
- Démolin, G., & Millet, A. (1981) Essais insecticides contre la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.). Action comparative de différentes spécialités commerciales Bactospéine, Dipel, Thuricide et Dimilin. *Annales des Sciences Forestières*, 38(3), 389–404.
- Démolin, G., Frerot, B., Chambon, J.P., & Martin, J.C. (1994) Réflexions biosystématiques sur toutes les processionnaires du genre *Thaumetopoea* Lep. Thaumetopoeidae, considérées comme ravageurs importants des cèdres *Cedrus libani* Barel et *Cedrus atlantica* Manetti sur le pourtour du bassin méditerranéen. *Ann. Rech. For. Maroc*, T (27), 577- 581.
- Démolin G., Abgrall, J.F., & Bouhot-Delduc, L. (1996) Evolution de l'aire de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiff. (Lep., *Thaumetopoeidae*) en France. *Les cahiers du DSF*, 1, 26-28.
- D.G.F. (Direction Générale des forêts) (2014) Direction générale des forêts, BILAN DE lutte contre la chenille processionnaire du pin campagne 2013/2014. Ministère de l'agriculture et du développement rural, Algérie, 22p

- Dirik, H. (2000) Effet du stress hydrique osmotique sur la germination des graines chez les provenances de cèdre de Liban (*Cedrus libani* A.Rich.) d'origine turque. *Ann. For. Sci.* 57. INRA, EDP Science, 361-367.
- Ducrey, M. (1993) Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au climat méditerranéen. Aspect écophysologique de sa réaction à la sécheresse. *Ann. Rech. For. Maroc*, 27, 139-153.
- Dulaurent, A.M. (2010) Effet de la diversité des essences forestières sur les niveaux de population de la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*), à différentes échelles, spatiales dans la forêt des Landes de Gascogne. Thèse de Doc, Univ Bordeaux I, 165p.
- Dumerle, P., (1979) Biologie de la larve planidium de *Villa Brunnea* Beck., Diptère Bombyliide parasite de la processionnaire du pin. Infestation de l'hôte. *Annales de Zoologie, Ecologie Animale*, 11, 305-326.
- El Azzouzi, K., & Keller, R. (1998) Propriétés technologiques du bois de cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). *Forêt méditerranéenne*, t. XIX. 1, 11-33.
- El Mokhefi, M., Chakali, G., Zamoum, M., Bensidi, A., & Battisti, A. (2015) Detail of the Past and Situation of the Pine Processionary Moths, *Thaumetopoea pityocampa* and *T. wilkinsoni*, in North Africa and Asia Minor. In : Roques A (Ed) Processionary moths and climate change : an update. *Springer-Quae, Dordrecht/Versailles*, 133-134.
- El Yousfi, M. (1989). The cedar processionary moth, *Thaumetopoea bonjeani* (Powell). Boletín de Sanidad Vegetal, *Plagas*, 15, 43–56.
- El Yousfi, M. (1994) La santé du Cèdre de l'Atlas au Maroc. *Ann. Rech. For.*, T (27), 593-611.
- Emberger, L. (1938) Contribution à la connaissance des Cèdres et en particulier du Deodar et du Cèdre de l'Atlas. *Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale*, 77-92.
- Erkaya, I. (2020) Predators and parasitisms of pine processionary moth (*Thaumetopoea wilkinsoni* Tams) in Western Mediterranean region in Turkey. *Bilge International journal of Science and Technology Research*, 4 (1), 7-13.
- Fabre, J.P. (1976) Extension du cèdre et risques d'attaques d'insectes. *R.F.F.* 27 (4), 261-269.
- Fabre, J.P., Mouna, M., Du Merle, P., & Benhalima, S. (1999) Le point sur certains ravageurs du Cèdre de l'Atlas en Afrique du Nord, en France et en Europe. *Rev. For. Médit.*, 20 (4), 203-219.
- Faurel, L., & Laffite, R. (1949) Facteurs de répartition des cédraies dans les massifs de l'Aurès et du Belezma. *Bull.Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord. Alger*, 178 p.

- Ferrandes, H. (1986) Cèdres. *Rev. for. française*, XXXVIII, 139-141.
- Ferron, P. (1978) Biological control of insects pests by entomogenous fungi. *Ann. Rev. Entomol*, 23, 409-442.
- Fraival, A. (2007) Les processionnaires 1ères partie- La processionnaire du pin. *Insectes*, 147, 35-39.
- Gachi, M. (1994) Note sur la présence en Algérie de la processionnaire du cèdre : *Thaumetopoea bonjeani* Powell (Lepidoptera ; Thaumetopoeidae). *Ann. Rech. For. Maroc*, T (27), 527-537.
- 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, 17p.
- Gachi, M. (2004) Contribution à l'étude de l'eco-biologie de la processionnaire d'été *Thaumetopoea bonjeani* p. (LEP., Thaumetopoeidae) dans la cedraie du Belezma (Aurès). Mémoire de Mag, Univ. Houari- Boumediene d'Alger, Algérie, 99 p.
- Gagnon, A.È., Arsenault-Labrecque, G., Bourgeois, G., Bourdages, L., Grenier, P., & Roy, M. (2013) Études de cas pour faciliter une gestion efficace des ennemis des cultures dans le contexte de l'augmentation des risques phytosanitaires liés aux changements climatiques. *Ouranos, Rapport final projet # 550004*, PXI, 183 p.
- Gault, G. (2012) Impact sur la santé des chenilles processionnaires, 46p.
- Gaussen, H. (1967) Les gymnospermes actuelles et fossiles. *Trav. Lab. For. Toulouse*, VII, 283-280.
- Georgieva, M., Georgiev, G., Matova, M., Zaemdzhikova, G., Mirchev, P., & Boyadzhiev, P. (2020) Egg parasitoid complex of the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*) on the Thasos Island, Greece. *Silva Balcanica*, 21(2), 35-44.
- Géri, C. (1980) Application des méthodes d'études démécologiques aux insectes défoliateurs forestiers. Cas de *Diprion pini* I. (Hyménoptère Diprionidae). Dynamique des populations de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* (Lépidoptère Thaumetopoeidae) dans l'île de Corse. Thèse de Doc, Univ Paris-sud Centre d'Orsay, Paris, France, 260 p.
- Geri, C. (1983) Répartition et évolution des populations de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Schiff., (Lep., Thaumetopoeidae) dans les montagnes corses. *Acta OEcologica – OEcolog. Applic*, 4(3), 247-268.

- Gilman, S.E., Urban, M.C., Tewksbury, J., Gilchrist, G.W., & Holt, R.D. (2010) A framework for community interactions under climate change. *Trends in Ecology and Evolution*, 25, 325–331.
- Goubault, M. (2003) Exploitation des hôtes chez un hyménoptère parasitoïde solitaire : conséquences adaptatives de la compétition intraspécifique sur les stratégies comportementales des femelles. Thèse de Doc, Univ., Rennes I, 196p.
- Graf, P., & M'zibri, M. (1994) L'infestation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) par la chenille processionnaire (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) au Maroc et son impact sur la productivité. *Ann. Rech. For. Maroc*, 27, 613-624.
- Granier, A., Reichstein, M., Bre'da, N., Janssens, I.A., Falge, E., Ciais, P., Grünwald, T., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Facini, O., Grassi, G., Ilvesniemi, H., Keronen, P., Knohl, A., Köstner, B., Lagergren, F., Lindroth, A., Longdoz, B., Loustau, D., Mateus, J., Montagnani, L., Nys, C., Moors, E., Papale, D., Peiffer, M., Pilegaard, K., Pita, G., Pumpanen, J., Rambal, S., Rebmann, C., Rodrigues, A., Seufert, G., Tenhunen, J., Vesala, T., & Wang, Q. (2007) Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agric. For. Meteorol*, 143, 123-145.
- Guerrero, A., Camps, F., Coll, J., & Riba, M. (1981) Identification of a potential sex pheromone of the processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera, Notodontidae). *TetrahedronLett*, 22(21).
- Hezil, S. (2019) Expansion de la processionnaire du pin et de ses parasites embryonnaires dans les pinèdes de la région de Djelfa. Thès de Doc, ENSA. El Harrach, Algérie, 151p.
- Hódar, J. A., Zamora, R., & Castro, J. (2002) Host utilisation by moth and larval survival of pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* in relation to food quality in three *Pinus* species. *Ecological Entomology*, 27, 292–301.
- Hódar, J.A., Castro, J., & Zamora, R. (2003) Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warming. *Biol. Conserv*, 110, 23-129.
- Hódar, J.A., Cayuela, L., Heras, D., Perez-Luque, A.J., & Torres-Muros, L. (2021) Expansion of elevational range in a forest pest : can parasitoids track their hosts ? *Ecosphere*, 12 (4), 1-14.

- Houamel, A. (2012) Contribution à l'étude du dépérissement de la cédraie dans la région de Batna (cas du parc national du Belezma). Mémoire de Mag, Univ. Tlemcen. Algérie, 84 p.
- Huchon, H., & Démolin, G. (1970) La bioécologie de la processionnaire du pin. Dispersion potentielle, dispersion actuelle. *Revue Forestière Française*, 22, 11-20.
- Imbert, C.E. (2012) - Expansion d'un ravageur forestier sous l'effet du réchauffement climatique : la processionnaire du pin affecte-t-elle la biodiversité entomologique dans les zones nouvellement colonisées. Thèse de Doc, Univ D'Orléans. INRA Orléans, France, 196 p.
- Imbert, C.E., Auger-Rozenberg, M.A., Kerdelhue, C., Torres-Leguizamon, M., Denux, O., Goussard, F., Garcia, J., & Roques, A. (2014) Expansion of Pine Processionary Moth and Parasitoid Responses. In A. Roques (Ed.), *Processionary moths and climate change: An update*. Springer, 312–324.
- Jacobson, E. R. (1984) Biology and diseases of reptiles, in Fox, J. G., Cohen, B. J., and Loew, F. M., Eds. *Laboratory Animal Medicine*, Academic Press, New York, 449 p.
- Jacquet, J.S., Orazio, C. & Jactel, H. (2012) Defoliation by processionary moth significantly reduces tree growth: a quantitative review. *Annals of Forest Science*, 69, 857–866
- Jactel, H., Barbaro, L., Battisti, A., Bosc, A., Branco, M., Brockerhoff, E., Castagneyrol, B., Dulaurent, A.M., Ho'dar, J. A., Jacquet, J.S., Mateus, E., Paiva, M.R., Roques, A., Samalens, J.C., Santos, H., & Schlyter, F. (2015) Tree Interactions in *Thaumetopoea pityocampa*. In A. Roques (Ed.), *Processionary moths and climate change: An update*. Springer, 265-310.
- Kanat, M., Alma, M.H., & Sivrikaya, F. (2005) Effect of defoliation by *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) on annual diameter increment of *Pinus brutia* Ten. in Turkey. *Annals of Forest Science*, 62, 91-94.
- Kerdelhué, C., Zane, L., Simonato, M., Salvato, P., Rousset, J., Roques, A., & Battisti, A. (2009) Quaternary history and contemporary patterns in a currently expanding species. *BMC. Evolutionary Biology*, (9), 220-226.
- Kimoto, T., Duthie-Holt, M., & Dumouchel, L. (2006) Guide des insectes forestier exotiques. Ed. ACIA, Canada, 12 p.
- Laborde, J.P., Goubesville, P., Assaba, M., Demmak, A., & Belhouli, L. (2010) Climate evolution and possible effects on surface water resources of North Algeria. *Curr. Sci*, 98, 1-7.

- Lafitte, R. (1939) Esquisse géologique de l'Aures. Thèse science. Paris, France, 484 p.
- Laurent-Hervouët, N. (1986) Mesure des pertes de croissance radiale sur quelques espèces de Pinus dues à deux défoliateurs forestiers. I-Cas de la processionnaire du pin en région méditerranéenne. *Ann. Sci. For.*, 43(2), 239-262.
- Lebreton, S. (2009) Stratégies de ponte en situations de compétition chez une guêpe parasitoïde. Thèse de Doc, Univ. François – Rabelais de Tours, France, 143p.
- Lewis, W.J., Stapel, J.O., Cortesero, A.M., & Takasu, K. (1998) Understanding how parasitoids balance food and host needs : importance to biological control. *Biol. Control*, 11, 175–183.
- Logan, J.A., Régnière, J., & Powell, J.A. (2003) Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics. *Front Ecol Environ*, 1, 130–137.
- Loudhaief, R. (2018) Effets des bio-insecticides à base de *Bacillus thuringiensis* sur la physiologie intestinale de la Drosophile. Thèse de Doc, Univ Nice Sophia Antipolis, France, 209p.
- Maley, J. (1983) Histoire de la végétation et du climat de l'Afrique nord-tropicale au Quaternaire récent. *Bothalia, Prétoria*, 14 (3, 4), 377-389.
- Markalas, S. (1989) Influence of soil moisture on the mortality, fecundity and diapause of the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.). *Journal of Applied Entomology*, 107, 211- 215.
- Martin, J. C. (2005) La processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* (Denis et Shiffermüller). Biologie et protection des forêts. INRA.
- Martin, J.C., Bonnet, C., & Mazet, R. (2009) La processionnaire du pin : vers un contrôle écologique et raisonné. In : conférence sur l'entretien des espaces verts, jardins, gazons, forêts, zones aquatiques et autres Zones Non Agricoles. Angers (France) : AFPP, Association Française de Protection des Plantes, 9p.
- Masutti, L. (1964) Ricerche sui parassiti oofagi della *Thaumetopoea pityocampa* (Schiff.). *Annali del Centro di Economia Montana delle Venezie*, 4, 205-271.
- Masutti, L., & Battisti, A. (1990) *Thaumetopoea pityocampa* (Den and Schiff) in Italy - Bionomics and perspectives of integrated control. *J. Appl. Ent.*, 110, 229-234.
- Meddour, R. (1994) La cédraie de l'atlas blidéen (Algérie). Valeur bioclimatique, syntaxonomique et dynamique. *Ann. Rech. For. Maroc*, 27, 105-127.
- Messaoudène, M., Loukkas, A., Janin, G., Tafer, M., Dilem, A., & Gonçalez, J. (2004) Propriétés physiques du bois d'éclaircie des cèdres (*Cedrus atlantica*), contenant du bois

- de compression, provenant de l'Atlas du Djurdjura (Algérie). *Ann. For. Sci*, 61, 589-595.
- M'hirit, O. (1982) Etude écologique et forestière des cédraies du Rif Marocain : Essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la production du cèdre de l'atlas. *Ann. Rech. For. Maroc*, 2(1), 499 p.
- M'hirit, O. (1994) Le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). Présentation générale et état des connaissances à travers le réseau Silva Mediterranea "Le Cèdre". *Annales de la recherche forestière au Maroc*, 4-21.
- M'hirit, O. (1999) Le cèdre de l'atlas à travers le réseau Silva mediterranea « cèdre ». Bilan et perspectives. *Forêt Méditerranéenne*, t. XX. 3, 91-100.
- M'hirit, O., & Benzyane, M. (2006) Le cèdre de l'Atlas : mémoire du temps. *Éditions Mardaga*, 288 p.
- Mirchev, P., Schmidt, G.H., & Tsankov, G. (1998) The egg parasitoids of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Den. and Schiff.) in the Eastern Rhodopes, Bulgaria. *Bollettino di Zoologia Agraria e di Bachicoltura*, 30, 131-140.
- Mirchev, P., & Tsankov, G. (2000) Parasitism of egg-batches of pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Den. et Schiff.) (Lepidoptera : Notodontidae) collected in Portugal. *Forest Science*, 4, 65-71.
- Mirchev, P., Schmidt, G.H., Tsankov, G., & Avci, M. (2004) Egg parasitoids of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Thaumetopoeidae) and their impact in SW Turkey. *Journal of Applied Entomology*, 128, 533-542.
- Mirchev, P., Tsankov, G., Avci, M., & Matova, M. (2007) Study of some aspects of ecology of pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (den. & schiffe.) (lep., Thaumetopoeidae) and its egg parasitoids in Turkey. *Silva Balcanica*, 8(1), 66-78.
- Mirchev, P., Georgiev, G., Boyadzhiev, P., & Matova, M. (2012) Impact of entomophages on density of *Thaumetopoea pityocampa* in egg stage near Ivaylovgrad, Bulgaria. *Acta Zoologica Bulgarica*, Supplement, 4, 103-110.
- Mirchev, P., Dautbašić, M., Mujezinović, O., Georgiev, G., Georgieva, M., & Boyadzhiev, P. (2015) Structure of egg Batches, Hatching Rate and Egg Parasitoids of the Pine Processionary Moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Denis and Schiffermüller, 1775) (Lepidoptera: Notodontidae), in Bosnia and Herzegovina. *Acta Zoologica Bulgarica*, 67(4), 579- 586.

- Mirchev, P., Georgiev, G., & Tsankov, G. (2017) Long-term Studies on Egg Parasitoids of Pine Processionary Moth (*Thaumetopoea pityocampa*) in a New Locality in Bulgaria. *J. Entomol. Res. Soc*, 19(3), 15-25.
- Mirchev, P., Georgiev, G., Georgieva, M., Markoff, I., Zaemdzhikova, G., & Matova, M. (2021) Abundance and impact of egg parasitoids on the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*) in Bulgaria. *iForest*, 14, 456-464.
- Morel, E. (2008) La chenille processionnaire du pin et ses parasites oophages, vers un moyen de lutte biologique ? Recherche et Médiation scientifique Sous un angle de muséographie. *Rapport de stage. Ecol., Gest., Biodivers., Micropolis. INRA*, 66p.
- Mouna, M. (2013) Les insectes du cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le Nord de l'Afrique. Travaux de l'Institut Scientifique. *Série Zoologie*, 48, 1–81.
- Myers, J.H. (2000) Population fluctuations of the western tent caterpillars in southwestern British Columbia. *Population Ecology. Springer*, 42, 231–241.
- Nasr, J., Hammad, E.A.F., Demolin, G., Nemer, N. (2013) Eggmass Structure and Parasitism of *Thaumetopoea wilkinsoni* (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) in Lebanon. *Advances in Crop Science and Technology*, 1(3) 110, 1-6.
- Netherer, S., & Scholf, A. (2010) Potential effects of climate change on insect herbivores in European forests-General aspects and the pine processionary moth as specific example. *Forest Ecology and Management*, 259, 831-838.
- Nirakar, R. (2007) Biopesticides : an Economic Approach for Pest Management. *Orissa Review. Plant Protection, KVK, Rayagada, Gunupur*, 77-79.
- Paiva, M. R., Mateus, E., Santos, M. H., Branco, M. (2011) Pine volatiles mediate host selection for oviposition by *Thaumetopoea pityocampa* (Lep., Notodontidae). *Journal of Applied Entomology*, 135, 195–203.
- Palmeri, V., & Pulvirent, A. (2004) *Pediobius bruchicida* (Rondani) (Hymenoptera, Eulophidae) hyperparasitoid of *Ooencyrtus pityocampae* (Mercet) in Italy. *Bollettino di Zoologia Agraria e di Bachicoltura*, 36(1), 157-161.
- Pimentel, C.S.M.G., (2004) Pine Processionary Moth (*Thaumetopoea pityocampa*) and Great Tit (*Parus major*) in Portugal : Population Dynamics and Interactions. Thèse de Doc, Univ. Nova de Lisboa, Portugal, 267p.
- Pimentel, C., Ferreira, C., & Nilsson, J.A. (2010) Latitudinal gradients and the shaping of life-history traits in a gregarious caterpillar. *Biological Journal of the Linnean Society*, 100, 224-236.

- Pujos, A. (1964) Les milieux de la cédraie marocaine. Etude d'une classification des cédraies du Moyen Atlas et du Rif en fonction du sol et du climat de la régénération actuelle dans les peuplements. *Ann. Rech. For. Maroc*, 8, 283 p.
- Quézel, P., & Santa, S. (1962) Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. 1-2. *C. N.R. S., Paris*, 1170 p.
- Quézel, P. (1980) Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen. In PESSON : *Actualités d'écologie forestières*. Paris, Bordas, 205-256.
- Quézel, P. (1995) La flore du bassin méditerranéen : origine, mise en place, endémisme. *Ecol. Med.*, XXI (1/2), 19-39.
- Quézel, P. (1998) Cèdres et cédraies du pourtour méditerranéen : signification bioclimatique et phytogéographique. *Forêt méditerranéenne*, 19, 243-260.
- Rahim, N., Chakali, G., & Battisti, A. (2016) Egg mortality in the cedar processionary moth, *Thaumetopoea bonjeani* (Lepidoptera: Notodontidae) in an outbreak area of Algeria. *Journal : Biocontrol Science and Technology*, 26(6), 849–860.
- Resco de Dios, V., Fischer, C., & Colinas, C. (2007) Climate change effects on Mediterranean forests and preventive measures. *New Forests*, 33, 9-40.
- Rivière, J. (2011) Les chenilles processionnaires du pin : évaluation des enjeux de santé animale. Thèse de Doc. Médecine de Créteil, École nationale vétérinaire d'Alfort, 167p.
- Robinet, C. (2006) Modélisation mathématique des phénomènes d'invasion en écologie : exemple de la chenille processionnaire du pin. Thèse de Doc, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, France, 208 p.
- 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. and Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France. *Glob Ecol Biogeogr*, 16, 460–471.
- 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. *Biological Invasions*, 14, 1557-1569.
- Roques, A. (2014) Processionary moths and climate change an update. *CIRAD, INRA. Springer Quae*, France, 427 P.
- Rousselet, J., Zhao, R., Argal, D., Simonato, M., Battisti, A., Roques, A., & Kerdelhue, C. (2010) The role of topography in structuring the demographic history of the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera: Notodontidae). *Journal of Biogeography*, 37, 1478-1490.

- Sabatier, S., Baradat, P., & Barthelemy, D. (2003) Intra- and interspecific variations of polycyclism in young trees of *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex. Carrière and *Cedrus libani* A. Rich (Pinaceae). *Ann. For. Sci.*, 60, 19-29.
- Şahin, A. K., Avci, H. İ., Çam, T., & Özpınar, A. (2020) Egg parasitoids of *Thaumetopoea pityocampa* (Den & Schiff.) (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) and natural effectiveness in Terzioğlu Campus (Çanakkale). *Türk. Biyo. Mücadele Derg*, 11 (2), 199-211.
- Sbabdji, M. (2015) Effect of Periodic Defoliations by *Thaumetopoea Pityocampa* Schiff on Radial Growth in Cedar Woodland in Chréa, Algeria. *Revue d'Ecologie (Terre et Vie)*, 70 (4), 15p.
- Schmidt, G.H., & Douma-Petridou, E. (1989) A contribution to parasitism of egg batches *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lepidoptera : Thaumetopoeidae) on the Peloponnes (Greece). *Bollettino di Zoologia Agraria e di Bachicoltura*, Ser, II. 21, 141–151.
- Schmidt, M. W., Baldrige, K.K., Boatz, J. A., Elbert, S. T., Jensen, J. H., & Windus, T.L. (1993) General atomic and molecular electronic. *Journal of Computational Chemistry*, 14 (11), 1347-1363
- Schmidt, G.H., Mirchev, P., & Tsankov, G. (1997) The egg parasitoids of *Thaumetopoea pityocampa* in the Atlas mountains near Marrakech (Morocco). *Phytoparasitica*, 25(4), 275-281.
- Schmidt, G.H., Tanzen, E., & Bellin, S. (1999) Structure of egg-batches of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. And Schiff.) (Lep., Thaumetopoeidae), egg parasitoids and rate of egg parasitism on the Iberian Peninsula. *J. Appl. Ent*, 123, 449-458.
- Sebti, S. (2011) Caractéristiques biologiques et écologiques de la Processionnaire, *Thaumetopoea pityocampa* Schiff (Lepidoptera : Thaumetopoeidae) sur le Cedre de l'Atlas *Cedrus atlantica* Manetti dans le Parc National de Chrea. Mémoire de Mag, Univ. Saad Dahleb, Blida, 128p.
- Slimani, S. (2014) Reconstitutions dendrochronologiques du climat et de l'historique des incendies dans les régions des Aurès et de Kabylie, nord de l'Algérie. Thèse de Doc, Univ. Mouloud Mammeri. Algérie, Tizi Ouzou, 150 p.
- Slimani, S., Derridj, A., & Gutiérrez, E. (2014) Ecological response of *Cedrus atlantica* to climate variability in the Massif of Guetiane (Algeria). *Forest Systems*, 23 (3), 448-460.

- Sohngen, B. (2008) Climate change, agriculture, forests, and biofuels. *International Agricultural Trade Research Consortium*. December 7-9, 2008 Scottsdale, Arizona, 21 p.
- Stewart, P.H. (1969) Quotient pluviométrique et dégradation de la biosphère. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord. Alger*, 14-59.
- Tafer, M., Slimani, S., Kherchouche, D., Bekdouche, F., & Messaoudène, M. (2021) Événements climatiques extrêmes et croissance radiale de *Cedrus atlantica* (Manetti) dans les massifs du Belezma et du Chélia (Algérie). *Bois et Forêts des Tropiques*, 350, 43-56.
- Terrab, A., Paun, O., Talavera, S., Tremetsberger, K., Arista, M., & Stuessy, T. F. (2006) Genetic diversity and population structure in natural populations of Moroccan Atlas cedar (*Cedrus atlantica*; Pinaceae) determined with cpSSR markers. *American Journal of Botany*, 93, 1114 – 1121.
- Terrab, A., Hampe, A., Lepais, O., Talavera, S., Vela, E., & Stuessy, T.F. (2008) Phylogeography of North African Atlas cedar (*Cedrus atlantica*, Pinaceae): combined molecular and fossil data reveal a complex Quaternary history. *Am. J. Bot.*, 95, 1262-1269.
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., de Siqueira, M. F., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A. S., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Peterson, A. T., Phillips, O. L., & Williams, S. E. (2004) Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145-148.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araujo, M. B., Sykes, M. T., & Prentice, I. C. (2005) Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 8245-8250.
- Tiberi, R., Niccoli, A., Curini, M., Epifano, F., Marcotullio, M.C., & Rosati, O. (1999) The role of monoterpene composition in *Pinus* ssp. needles, in host selection by the pine processionary caterpillar, *Thaumetopoea pityocampa*. *Phytoparasitica*, 27(4), 263-272.
- Toth, J. (1970) Plus que centenaire et plein d'avenir : le cèdre en France. *Revue forestière française, AgroParisTech*, 22 (3), 355-364.
- Toth, J. (1978) Contribution à L'études de la fructification et de la régénération du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans le sud de la France. Thèse de Doc, Fac. St. Jérôme. Marseille. France, 136p.

- Toth, J. (1980) Le cèdre dans quelques pays du pourtour méditerranéen et dans deux autres pays à grande importance forestière. *Forêt méditerranéenne*, II, 1, 23-30.
- Toth, J. (2001) Problèmes phytosanitaires et mycorhizes du Cèdre. *PHM – Revue horticole*, 424, 32-36.
- Toth, J. (2005) Le cèdre de France - Etude approfondie de l'espèce. *Ed. L'harmattan. Paris*, 207 p.
- Tsankov, G., Schmidt, G.H., & Mirchev, P. (1995) Impact of parasitoids in egg-batches of *Thaumetopoea pityocampa* (Dent. and Schiff.) in Algeria. *Bollettino di Zoologia Agraria e di Bachicoltura*, 27, 53-60.
- Tsankov, G., Schmidt, G.H., & Mirchev, P. (1996) Parasitism of egg-batches of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Den & Schiff) (Lep, Thaumetopoeidae) in various regions of Bulgaria. *Journal of Applied Entomology-Zeitschrift Fur Angewandte Entomologie*, 120, 93-105.
- Tsankov, G., Schmidt, G.H., & Mirchev, P. (1998) Studies on the egg parasitism in *Thaumetopoea pityocampa* over a period of four years (1991-1994) at Marikostino/Bulgaria. *Anzeiger Fur Schadlingskunde Pflanzenschutz Umweltschutz*, 71, 1-7.
- Tsankov, G., Douma-Petridou, E., Mirchev, P., Georgiev, G., & Koutsaftikis, A. (1999) Spectrum of egg parasitoids and rate of parasitism of egg batches of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Den. and Schiff.) in the northern Peloponnes/Greece. *Journal of the Entomological Research Society*, 1, 1-8.
- Tsankov, G., & Mirchev, P. (2003) The role of *Trichogramma embryophagum* (Hartig, 1838) (Hymenoptera : Trichogrammatidae) as a natural regulator of pine processionary moth number (*Thaumetopoea pityocampa* (Denis et Schiffermueler, 1775) Lepidoptera: Notodontidae) in Bulgaria. *Forest Science*, 4, 33-41.
- Yüksel, H., İpekdal, K., & Toper Kaygin, A. (2019) Comparison Between Egg Batch and Egg Characteristics of the Two Pine Processionary Moth Species, *Thaumetopoea wilkinsoni* and *T. pityocampa* in Turkey. *Journal of Bartın Faculty of Forestry*, 21 (2), 534-542.
- 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 Doc, Univ des sciences de Rennes I, France, 247 p.

- Zamoum, M., & Démolin, G. (2005) The life cycle of the pine processionary caterpillar in the bioclimatic conditions of a sub- Saharan region. In F. Lieutier et D. Ghaïoule (Eds.), *Entomological Research in Mediterranean Forest Ecosystem*, 107-116. Paris: INRA.
- Zamoum, M., Martin, J. C., & Bensidi, A. (2015) Fecundity of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera : Notodontidae) at the southern edge of its distribution range. *Biologia*, 70, 386-392.
- Zamoum, M., Bouragba-Brague, N., Rahim, N., Khemici, M., Gachi, M., Battisti, A., Martin, J.C., & Briki, A. (2017) Structure of the natural enemies' community composition to *Thaumetopoea pityocampa* and *Thaumetopoea bonjeani* (Lepidoptera Thaumetopoeidae) in the Algerian cedar forests. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 5(4), 1536-1542.
- Zovi, D., Battisti, A., Hellrigl, K., & Minerbi, S. (2006) Egg parasitoids of the pine processionary moth and their occurrence in Venosta/Vinschgau. *Forest Observer* ,2, 81-88.

دراسة مزيلات الأوراق وطفيلياتها في غابات أرز بشيليا.

المخلص

ازدادت الأضرار التي تلحق بالغابات بسبب الحشرات بشكل كبير في العقود الأخيرة، مشكلة بذلك أكبر التهديدات لها. يزيد الاحتباس الحراري من إمكانية استيطان الآفات الحشرية لكي تصبح بعد ذلك غازية، وبالتالي فهو يؤثر بشكل مباشر على توزيعها الجغرافي. هذا التوسع الكبير لهذه الآفات الحشرية يتسبب في أضرار جسيمة قد تصل إلى موت الأشجار. جاذوب الصنوبر *Thaumetopoea pityocampa* Schiff هو الآفة الرئيسية لغابات الجزائر ودول البحر الأبيض المتوسط التي توسع نطاقها استجابة للاحتباس الحراري. في هذا السياق، يتم تنفيذ هذا العمل، والذي يهدف إلى المساهمة في المعرفة المتعمقة للطفيليات الجينية التي يمكن أن يكون لها تأثير على تطور جاذوب الصنوبر وتحديد استجابة هذه الطفيليات لتوسع مضيفها.

أجريت الدراسة على جميع الجوانب البيئية الحيوية لبيض جاذوب الصنوبر *T. pityocampa* التي تم جمعها في غابة الأرز بشيليا. يُظهر توزيع البيض اختلافات كبيرة وفقًا للارتفاع ومكان تواجدها. تبدو ديناميكية مجتمعات جاذوب الصنوبر مختلفة جدًا بين السنوات الدراسة. يتم تفسير هذا الاختلاف من خلال التغيرات المناخية ومرحلة الذروة تؤكد مرحلة التدرج لهذا النوع حيث يكون حجم السكان مرتفعًا جدًا تليها فترات الكمون التي تتواجد فيها اليرقات عند مستوى منخفض. كما تم التطرق إلى تحديد وتأثير عوامل الوفيات الرئيسية المشاركة في تنظيم مجتمعات هذه الآفة. ثلاثة أنواع من الطفيليات تنتمي إلى غشائيات الأجنحة تتطفل على البيض *T. pityocampa* في غابة الأرز بشيليا: *Baryscapus servadeii* تمثل غالبية الأنواع، *Ooencyrtus pityocampae* و *Trichogramma embryophagum* توجد بأعداد منخفضة جدًا وبنسبة محدودة. تُعرف هذه الطفيليات بمساهمتها في السيطرة على هذه الأنواع من *Lepidoptera*.

الكلمات المفتاحية: جاذوب الصنوبر، التبويض، غابات الارز، الطفيليات، شيليا.

Étude des défoliateurs et de leur complexe parasitaire dans la cédraie de Chélia.

RÉSUMÉ

Les dommages forestiers causés par les insectes ont augmenté de manière significative au cours des dernières décennies. Les forêts se retrouvent ainsi menacées, surtout que le réchauffement climatique favorise la croissance, la propagation et l'établissement de ces insectes ravageurs dans de nouvelles aires géographiques. Tout ceci pourrait engendrer une pullulation dévastatrice de ces petites créatures qui sévissent sur l'environnement, entraînant par-là destruction et énormes dégâts sur la flore notamment les arbres.

La processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff, un de ces ravageurs forestiers majeurs en Algérie et dans les pays méditerranéens, est en train de se propager et d'étendre son aire de répartition en altitude à la faveur du réchauffement climatique.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail de recherche qui vise à mettre en lumière les parasitoïdes embryonnaires pouvant avoir une incidence sur l'évolution de cette processionnaire du pin et évaluer leurs effets sur l'expansion de cet hôte indésirable. Notre étude passera en revue l'ensemble des aspects bioécologiques des pontes de *T. pityocampa* prélevées sur le cèdre de l'Atlas en provenance de la cédraie de Chélia. Il faut savoir que la distribution de ces pontes présente des variations significatives selon le plan altitudinal, car elle dépend de l'importance de l'exposition.

A noter également que la dynamique des populations de la processionnaire du pin a varié d'une façon très nette durant les années de notre étude et ce, en raison des variations climatiques. La phase de culmination confirme la phase de gradation de l'espèce où l'effectif de la population est très élevé. S'ensuivent des périodes de latence pendant lesquelles les chenilles présentent un faible niveau. L'identification et l'incidence des principaux facteurs de mortalité intervenant dans la régulation de ces populations ont été abordées dans le cadre de cette étude. Les résultats ont révélé trois espèces du complexe parasitaire appartenant aux Hyménoptères chalcidiens et parasitant les œufs de *Thaumetopoea pityocampa* dans la cédraie de Chélia : *Baryscapus servadeii*, *Trichogramma embryophagum* et *Ooencyrtus pityocampae*. La première étant l'espèce majoritaire, la 2^{ème} et la 3^{ème} espèce ont été retrouvées mais à très faible abondance avec une proportion très limitée. Ces parasitoïdes sont connues pour leur contribution dans le contrôle des espèces de lépidoptères.

Mots clés : *Thaumetopoea pityocampa*, ponte, cèdre de l'Atlas, parasitoïdes des œufs, Chélia.

Study of defoliators and their parasitic complex in the forests of Chelia.

ABSTRACT

Forest damage caused by insects has increased significantly over the past few decades, representing the greatest threats to forests. The global warming allows to increase the establishment of insect pests which then risk to become invasive, it directly influences their geographical distribution. All of this can lead to strong outbreaks that can cause both damage and death to trees.

The pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* Schiff is a major forest pest in Algeria and Mediterranean countries that is expanding its range at higher elevations in response to global warming. It is in this context that this work aims to contribute to the in-depth knowledge of egg parasitoids that may affect the evolution of the pine processionary moth and to determine the response of these parasitoids to the expansion of their host. The study conducted on all the bioecological aspects of *T. pityocampa* egg batches collected on Atlas cedar from the Chelia massifs. The distribution of egg batches shows significant variations according to the altitudinal plane and depends on the importance of the exposure.

The population dynamics of the processionary moth are very different between the years considered. This difference is explained by climatic variations and the culmination phase confirms the gradation phase of the species where the population size is very high followed by latency periods during which the caterpillars present at a low level. The identification and impact of the main mortality factors involved in the regulation of its populations were discussed. Three species of the parasitic complex belonging to the Chalcidoidea Hymenoptera parasitizing the eggs of *Thaumetopoea pityocampa* in the forests of Chelia: *Baryscapus servadeii* is the majority species, *Trichogramma embryophagum* and *Ooencyrtus pityocampae* is found at very low abundance in a proportion remains very limited. These parasitoids are known to contribute to the control of these lepidopteran species.

Keywords: *Thaumetopoea pityocampa*, egg batches, Atlas cedar, egg parasitoids, Chelia.