

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة – الحراش – الجزائر

Ecole Nationale Supérieure Agronomique – El-Harrach – Alger

Thèse

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

Option : Biologie et Écologie en Zoologie Agro-Sylvo-Pastorale

Thème

**Expansion de la processionnaire du pin et de ses
parasites embryonnaires dans les pinèdes de la
région de Djelfa**

Présentée par : Sara HEZIL

Jury :

Président : M. DOUMANDJI S. Professeur (ENSA-EL-Harrach)

Directeur de thèse : M. CHAKALI G. Professeur (ENSA-EL-Harrach)

Examineurs : M. BATTISTI A. Professeur (Université de Padoue-Italie)
M. HAMMACHE M. Maître de Conférences (ENSA-El-Harrach)
M. GUIT B. Maître de Conférences (Université-Djelfa)

Soutenu le 12 /01/ 2019

R E M E R C I E M E N T S

*Avant tout, je remercie **DIEU** Miséricordieux qui m'a donné la force pour achever cette étude de recherche.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à **M. G. CHAKALI**, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (El-Harrach), pour avoir encadré et dirigé ce travail avec une grande rigueur scientifique. Mon profond respect pour ses conseils, son aide, sa disponibilité et la qualité de sa formation.*

*Mes remerciements et toute ma gratitude à **M. A. BATTISTI**, Professeur à l'université de Padoue (Italie) pour avoir accepté de Co-encadrer les travaux de ma recherche pour les suggestions, les orientations et son aide fructueuse à publier. Qu'il trouve ici mon profond respect et toute ma reconnaissance pour son soutien et ses encouragements à la finalisation de ma recherche.*

*J'adresse mes sincères remerciements à **M. S. DOUMANDJI**, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (El-Harrach), d'avoir accepté de présider mon jury. Ma gratitude et mes remerciements vont également à **M. M. HAMMACHE**, Maîtres de conférences à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (El-Harrach) et à **M. B. GUIT**, Maîtres de conférences à Université de Djelfa pour leur soutien et pour avoir accepté de faire partie du jury.*

*J'adresse mes remerciements à **M. AHMAD. A.D. ALSHASHANI**, International Advisor des projets environnementaux, USA et toute son équipe pour leurs encouragements pour ma recherche et leur soutien dans le cadre du projet « Nature for Nature », leurs orientations et pour avoir relu l'intégralité de mes articles et corrigé les nombreuses fautes en anglais.*

*Je tiens également à remercier **M. M. AVCI**, Professeur à l'université de Suleyman Demirel (Isparta, Turquie), et toute son équipe, particulièrement Mlle **Ş. Oğuzoğlu**, Doctorante à l'université de Suleyman Demirel pour leur accueil au laboratoire de département des forêts dans le cadre de séjours scientifiques et pour leur précieuse aide et leurs encouragements pour ma recherche.*

*Que le professeur **F. LEFEVRE** soit remercié pour avoir accepté de relire et corriger une de mes publications sur le sujet processionnaire du pin.*

Ma gratitude et ma reconnaissance à l'équipe de projet PCLIM « Pine Processionary Moth (PPM) phenology survey » pour avoir partagé avec nous les résultats de la phénologie de cet insecte en 2014.

*J'exprime également ma reconnaissance et mes remerciements à l'équipe de l'Université de Padoue, DAFNAE pour leur accueil au laboratoire de département d'entomologie lors de mes séjours, particulièrement **M. L. MARINI**, professeur à l'Université de Padoue pour leur aide dans les traitements statistiques et **M. M.H.R. SALMAN**, Doctorant à l'Université de Padoue pour son aide lors des séjours.*

Que soit remercié M. T. D. PAINE, Professeur à l'université de Californie, Riverside pour ses idées et pour ses nombreux conseils sur les analyses chimiques des matériels biologique et pour ses encouragements.

A reconnaissance à M. A. BITTAM, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (El-Harrach) pour les documents sur la méthodologie des caractérisations de la plant hôte et M. BENCHAAABAN, pour l'accueil au laboratoire de département de technologie.

Je ne saurais oublier l'aide du M. M. GHELEM, technicien au laboratoire d'entomologie au département de Zoologie Agricole et Forestière pour son aide fructueuse au laboratoire et au terrain.

Une motion très particulière à notre cher regretté M. D. GHEZALI professeur au Département de Zoologie Agricole, qui nous a récemment quittés. Qu'il repose en paix et que Dieu accueille son âme.

Que tous les forestiers qui m'ont offert leur aide au terrain soient remerciés, particulièrement, M.K. ZENATI et M. I. HARRAN, pour leur aide au cours de mes sorties à travers les pinèdes de la région de Djelfa.

Une pensée particulière pour MES PARENTS pour leur soutien et leur disponibilité. Ce travail n'aurait jamais pu être possible sans leur présence et leur aide tout le long de ma formation. Merci Maman pour avoir toujours cru en moi et pour toujours t'être intéressée à ce que je faisais ; Merci Papa pour la disponibilité, le soutien lors de mes nombreuses sorties au terrain. J'aimerais leur rendre un hommage particulier à travers ce travail.

Je n'en serais pas arrivée là sans le soutien indéfectible des membres de ma famille ; Merci Maroua « la meilleure traductrice » Houda « la meilleure journaliste » mes petites sœurs, pour avoir toujours été à mes côtés et pour avoir sacrifiés leurs vacances pour m'accompagner dans les divers sites lors des prospections, particulièrement estivales. Merci Imen pour la compréhension, le soutien et l'encouragement instable, Merci à Amina Chakali, biologiste pour ses encouragements.

Merci également à mon petit frère Mohamed El Mehdi et mes oncles Omar, Mustapha, Ahmed et Ali pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Mes remerciements également à toutes mes amies, particulièrement les doctorantes Naima, Hassina, Naila, Khawla, Sarra, Ryma, Aroua, Houria et Nora pour leur encouragement et leur soutien.

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

En dernier lieu, je tiens à avoir une pensée pour les nombreuses aiguilles et les branches des arbres qui sont récoltées par moi et les insectes sacrifiés de mes mains pour des besoins scientifiques.

SOMMAIRE

Introduction	2
PREMIER CHAPITRE : GÉNÉRALITÉS SUR LA PROCESSIONNAIRE DU PIN ET SES AUXILIAIRES	6
1. Historique et synthèse sur la biosystématique du genre <i>Thaumetopoea</i>	6
2. Caractérisation des populations de la processionnaire <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	12
3. Chronologie de développement de la processionnaire d'hiver.....	14
3.1. Phase épigée	10
3.1.1. Emergences des adultes et accouplement	15
3.1.2. Oviposition.....	16
3.1.3. Éclosion et développement larvaire.....	17
3.1.3.1. Phase ambulatoire	18
3.1.3.2. Construction du nid d'hiver	19
3.1.4. Procession post-hivernale.....	20
3.2. Phase hypogée	21
3.2.1. Etat nymphal	21
3.2.2. Diapause	22
4. Les ennemis naturels de la processionnaire du pin	23
4.1. Diversité des antagonistes.....	23
4.1.1. Les parasitoïdes.....	25
4.1.1.1. Sélectivité et compétition des parasitoïdes	26
4.1.1.2. Importance des parasitoïdes en lutte biologique.....	26
4.1.2. Les prédateurs.....	26
4.1.2.1. La prédation avienne et des Chiroptères.....	27
4.1.2.2. La prédation par les mésanges.....	28
4.1.2.3. La prédation par les huppés.....	29
4.1.3. Microorganismes.....	31
4.1.3.1. Cas de <i>Bacillus thuringiensis</i>	31
4.1.3.2. L'utilisation du <i>Bacillus thuringiensis</i> contre la processionnaire.....	31
DEUXIEME CHAPITRE : STRATÉGIE D'OCCUPATION DES POPULATIONS DE LA PROCESSIONNAIRE EN RELATION AVEC LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	33
1. Particularités biotique et abiotique du cycle de la processionnaire du pin.....	34
1.1. Stratégie du choix des plantes hôtes	34
1.2. Impact des facteurs abiotiques sur la phénologie de la processionnaire.....	38
1.2.1. Ensoleillement et photopériode.....	38

1.2.2. Température.....	38
1.2.3. Altitude et latitude.....	39
2.Monographie et biogéographie	41
2.1. Expansion spatio-temporelle de la processionnaire.....	41
2.2. Impact de réchauffement climatique sur l'extension des populations de la processionnaire du pin.....	42
3. Évolutions des parasitoïdes en relation avec leurs hôtes.....	44
4. Dynamique des populations de la processionnaire du pin	45
5.Stratégie d'attaque de la processionnaire du pin.....	47
5.1.Conséquences environnementales.....	47
5.2.Impact anthropozoïque.....	48
5.3.Les symptômes liés aux processionnaires.....	49
5.3.1. Contact avec la peau.....	49
5.3.2. Contact avec les yeux.....	50
5.3.3. Contact par inhalation.....	50
5.3.4. Contact par ingestion.....	50
6. l'impact de la processionnaire du pin sur les peuplements de pins.....	51
TROISIEME CHAPITRE : MATERIELS ET METHODES.....	53
1. Situation géographique des stations prospectées.....	54
2. Présentation du milieu forestier de la région d'étude	54
2.1. Les forêts naturelles.....	55
2.2. Les reboisements.....	56
2.3. Les sols.....	57
2.4. Caractéristiques climatiques de la région d'étude.....	57
2.4.1. Températures.....	58
2.4.2. La pluviométrie.....	59
2.5.La végétation	60
3.Choix des stations d'étude.....	61
4.Caractéristiques des stations	61
5. Méthodologie adoptée	64
5.1. Dénombrement des pontes sur les aiguilles et les rameaux des jeunes plantations.....	64
5.2. Récolte et préparation de matériel biologique.....	64
5.3. Biométrie des aiguilles, support des pontes.....	65
5.4. Étude phyto-chimique des aiguilles du pin	65

5.4.1. Réactions de caractérisation des alcaloïdes	66
5.4.1.1. Solution à analyser	66
5.4.1.2. Caractérisation	66
5.4.2. Réactions des substances polyphénoliques.....	66
5.4.2.1. Solution à analyser.....	66
5.4.2.2. Caractérisations.....	66
5.4.3. Réactions à la cyanidine.....	67
5.4.4. Dérivés anthracéniques.....	68
5.4.4.1. Solution à analyser	68
5.4.4.2. Caractérisation	68
5.4.5. Hétérosides cardiotoniques.....	69
5.4.5.1. Solution à analyser	69
5.4.5.2. Caractérisation	69
5.4.6. Recherche de stupéfiants (les tétrahydrocannabinols).....	69
5.4.7. Réactions de caractérisation des caroténoïdes.....	69
5.4.8. Réactions de caractérisation des hétérosides cardiotoniques.....	70
5.4.9. Test des alcaloïdes	70
5.4.10. Test stérols et terpènes	70
5.5. Contrôle des émergences.....	70
5.6. Dénombrement des œufs.....	70
5.7. Modèle biologique adopté dans le cadre de l'étude de l'évolution de populations de la processionnaire	72
5.7.1 Echantillonnage des larves de la processionnaire du pin.....	73
5.7. 2.Cas de Senalba Chergui.....	73
5.8. Estimation du taux de défoliation.....	75
5.9. Dénombrement des nids d'hiver de la processionnaire du pin.....	77
6.Méthodes d'exploitations des données.....	77
6.1. Analyse descriptive.....	77
6.2. Distribution fréquentielle.....	77
6.3. Analyse de la variance (ANOVA).....	78
6.4. Le modèle linéaire à effets mixtes par le logiciel (R).....	78
6.5. Régression linéaire.....	79
6.6. Analyse des tableaux croisés (PIVO).....	79
QUATRIEME CHAPITRE : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	81
1.Données sur les caractéristiques biométriques et sur le poids des aiguilles, support végétal...	81
1.1. Analyse des longueurs d'aiguilles support des pontes.....	81
1.2. Analyse des pontes de la processionnaire du pin.....	85
1.3. Analyse fréquentielle des longueurs des pontes.....	87

1.4. Comparaison planifiée (Cas des quatre sites).....	89
1.5. Corrélation entre les longueurs des aiguilles et des pontes.....	90
1.6. Analyse croisée entre les longueurs des aiguilles et des pontes (Cas des quatre sites).....	91
1.7. Importance des pontes dans le barrage vert.....	92
1.8. Degré de sélectivité des rameaux pour l'oviposition dans les zones néo-colonisées et la lisière.....	94
2. Données recueillies sur les émergences.....	96
2.1. Cumul des éclosions	98
2.2. Taux d'éclosion des pontes.....	99
3. Analyse des catégories d'œufs.....	99
4. Éclosion et mortalité des chenilles de processionnaire.....	104
5. Les parasitoïdes et leur fréquence.....	105
5.1. Émergence des parasitoïdes.....	105
5.2. Analyse globale du parasitisme.....	109
5.3. Importance et répartition du parasitisme sur la surface des pontes.....	109
6. Relation entre la structure du plant hôte et la mortalité de la processionnaire.....	110
7. Relation entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs.....	112
8. Synthèse des données phytochimiques.....	115
9. Chronologie des écophases et évolution temporelle du cycle.....	119
10. Stratégie d'occupation.....	122
11. Prédiction des extensions d'attaque.....	123
12. Phénologie de la processionnaire, cas du barrage-vert (projet PCLIM).....	123
13. Expansion des parasites embryonnaires de la processionnaire du pin.....	126
14. Complexe d'interaction des facteurs.....	127
15. Analyse des défoliations par la processionnaire du pin et répartition des nids d'hivers.....	129
CONCLUSION	134
RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUES	140

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Les différentes écailles des espèces du genre <i>Thaumetopoea</i> (a) <i>T. processionea</i> (b) <i>T. pinivora</i> (c) <i>T. bonjeani</i> (d) <i>T. wilkinsoni</i> (e,f,g,h) <i>T. pityocampa</i>	8
Figure 2.	Comparaison entre les deux processionnaires <i>T. pityocampa</i> (♂-♀), <i>T. wilkinsoni</i> (♂-♀) et les caractéristiques des écailles protectrices.....	9
Figure 3.	La structure de la phéromone sexuelle des espèces (a) <i>T. pityocampa</i> , <i>T. wilkinsoni</i> ; (a,b,c) <i>T. jordana</i>	10
Figure 4.	Génitalia des processionnaires, <i>T. wilkinsoni</i> se différencie de <i>T. pityocampa</i> par la présence d'une barre de renforcement sur les valves.....	10
Figure 5.	Variation des crêtes frontales (Canthus) des espèces <i>T. pityocampa</i> et <i>T. wilkinsoni</i>	11
Figure 6.	Variation de la forme et de la dimension des écailles maternelles de <i>T. wilkinsoni</i> et <i>T. pityocampa</i>	12
Figure 7.	Distribution géographique des trois clades de la processionnaire du pin.....	13
Figure 8.	Evolution temporelle des écophases de la processionnaire du pin <i>T. pityocampa</i> ...	14
Figure 9.	Adulte de la processionnaire du pin <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	16
Figure 10.	Ponte de la processionnaire du pin d'Alep ; (a) Ponte sur aiguille du pin d'Alep, (b) Ponte sur rameau du pin d'Alep.....	17
Figure 11.	Pré-nids des premiers stades larvaires de la processionnaire du pin dans son aire de répartition.....	19
Figure 12.	Nid d'hiver de la processionnaire sur pin d'Alep en zone semi-aride.....	20
Figure 13.	La procession post hivernale de la processionnaire du pin.....	21
Figure 14.	Début d'enfouissement des chenilles.....	22
Figure 15.	a- <i>Ooencyrtus pityocampae</i> b- <i>Baryscapus servadeii</i>	25
Figure 16.	Orthoptères prédateurs de la processionnaire.....	27
Figure 17.	<i>Calosoma sycophanta</i> prédateur des larves (Turquie).....	27
Figure 18.	Diversité des oiseaux prédateurs au cours du cycle de développement de la processionnaire.....	28
Figure 19.	Mésange prélevant du nid les chenilles de la processionnaire du pin pour son alimentation.....	29
Figure 20.	L'intensité de prédation de la huppe.....	30

Figure 21.	Répartition spatiale de la processionnaire du pin et la huppe en France.....	30
Figure 22.	Traitement aérien avec le Bt contre <i>Thaumetopoea pityocampa</i> dans les reboisements du barrage vert.....	32
Figure 23.	Abaque montrant les disparités géographiques du cycle de la processionnaire du pin.....	40
Figure 24.	Schéma des interrelations des insectes phytophages avec leurs hôtes et leurs antagonistes.....	41
Figure 25.	Limite Nord de l'aire de répartition de la processionnaire du pin.....	42
Figure 26.	Répartition de la processionnaire du pin en Algérie.....	44
Figure 27.	Évolution, du pourcentage moyen d'arbres attaqués et du nombre moyen de nids pour 100 arbres définis sur l'aire de répartition de la chenille processionnaire du pin, de 1981 à 2010.....	46
Figure 28.	Dynamique cyclique de la processionnaire du pin au Mont Ventoux entre 2007-2015.....	46
Figure 29.	Allergie du la processionnaire du pin au niveau du cou.....	49
Figure 30.	Allergie au niveau des yeux	50
Figure 31.	Présentation des zones limitrophes des massifs forestiers de la région de Djelfa....	54
Figure 32.	Carte de découpage en séries de Senalba Chergui et Gharbi selon le plan d'aménagement de 1984.....	55
Figure 33.	Variations mensuelles des températures moyennes (1995 à 2011) de la région de Djelfa.....	58
Figure 34.	Variations des précipitations mensuelles de 1995 à 2011 dans la région de Djelfa...	59
Figure 35.	Fluctuation des précipitations annuelles durant la période (1982-2012).....	60
Figure 36.	Localisation des stations d'études.....	62
Figure 37.	Vues générales des stations d'étude.....	63
Figure 38.	Matériel biologique en observation au laboratoire.....	65
Figure 39.	Les catégories d'œufs de la processionnaire du pin.....	72
Figure 40.	Les séries de la forêt de Senalba chergui	74
Figure 41.	Schémas des taux de défoliation causés par la chenille processionnaire sur le Pin d'Alep.....	76
Figure 42.	Mensurations des longueurs des aiguilles, support des pontes	82
Figure 43.	Moyennes des longueurs des différent part des aiguilles support des pontes en relation avec la position de la ponte.....	83

Figure 44.	Mensurations des diamètres des aiguilles témoins.....	84
Figure 45.	Comparaison des moyennes des poids des aiguilles témoins par ANOVA.....	85
Figure 46.	Comparaison des longueurs des pontes dans les biotopes prospectés.....	86
Figure 47.	Catégories des longueurs des pontes récoltées dans les reboisements et forêts naturelles ; a. plantations en 2012, b. forêts naturelles en 2012, c. plantations en 2014, d. forêts naturelles en 2014, e. plantations en 2015, f. forêts naturelles en 2015.....	88
Figure 48.	Relation entre les longueurs des pontes et les longueurs des aiguilles	90
Figure 49.	Distribution des longueurs des aiguilles et des pontes.....	91
Figure 50.	Importance des pontes par arbre en fonction de la position.....	93
Figure 51.	Distribution des pontes en fonction de la hauteur de l'arbre dans les deux biotopes prospectés.....	93
Figure 52.	Distribution des pontes sur les aiguilles et les rameaux de pin d'Alep, cas du reboisement de Moudjebara.....	95
Figure 53.	Ponte sur rameaux de pin d'Alep.....	96
Figure 54.	Fréquence journalière d'éclosion de pontes en fonction des températures moyennes journalières.....	97
Figure 55.	Courbes cumulatives des éclosions en 2012, 2014 et en 2015.....	98
Figure 56.	Les parasitoïdes actifs de la processionnaire du pin.....	100
Figure 57.	Représentation sectorielle des diverses catégories des œufs des pontes (Cas des forêts naturelles).....	102
Figure 58.	Représentation sectorielle des diverses catégories des œufs des pontes (Cas des reboisements).....	103
Figure 59.	Cas des larves mortes à l'intérieur de l'œuf	104
Figure 60.	Émergence des parasitoïdes en fonction de la variation des températures journalières.....	106
Figure 61.	Taux d'émergence des parasitoïdes dans les sites prospectés.....	107
Figure 62.	Nombre moyen mensuel des émergences au cours du temps (2013 et 2014).....	108
Figure 63.	Répartition des parasitoïdes sur la surface de la ponte (P1 partie basale, P2 partie médiane, P3 partie apicale).....	110
Figure 64.	Relations entre le nombre d'œufs non éclos et la distance entre le bouton d'aiguille et le début du lot d'œufs dans les deux biotopes.....	111

Figure 65.	Relation entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs pondus par les femelles de la processionnaire.....	113
Figure 66.	Distribution du nombre d'œufs en fonction de la longueur des pontes dans les reboisements prospectés.....	114
Figure 67.	Distribution du nombre d'œufs en fonction de la longueur des pontes dans les forêts naturelles.....	115
Figure 68.	Chronologie temporelle du cycle évolutif de la processionnaire du pin dans le barrage vert (a) en 2012 (b) en 2018.....	120
Figure 69.	Évolution du cycle biologique de la processionnaire en zone semi-aride.....	121
Figure 70.	Évolution des populations de la processionnaire du pin en 2014. La carte présentée est fournie par l'équipe du projet PCLIM. A noter que la partie, relative à l'Algérie dérive de nos résultats récoltés en zone semi-aride (Barrage vert).....	124
Figure 71.	Degré d'infestation en fonction d'orientation.....	125
Figure 72.	Évolution des parasitoïdes embryonnaires en fonction de l'altitude.....	126
Figure 73.	Fonctionnement des écosystèmes et interaction avec la processionnaire.....	128
Figure 74.	Exemples des cas de défoliations des arbres.....	129
Figure 75.	Défoliation totale localisée dans le reboisement de Moudejbara.....	130
Figure 76.	Évaluation du taux de défoliation causé par la chenille processionnaire du pin pour les sites considérés (N1 ; S5), (N2 ; S4), (P1 ; S1), (P2 ; S2).....	131
Figure 77.	Cartographie de la distribution des degrés d'attaque de la processionnaire du pin (N1 ; S5), (N2 ; S4), (P1 ; S1), (P2 ; S2).....	132

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	List des plantes hôtes des espèces du genre <i>Thaumetopoea</i>	7
Tableau 2.	Les processionnaires du genre <i>Thaumetopoea</i> et leur distribution géographique..	9
Tableau 3.	La durée des stades larvaires de la processionnaire du pin.....	18
Tableau 4.	Répertoire des ennemis naturels de la processionnaire du pin, <i>T. pityocampa</i>	24
Tableau 5.	Ordre de préférence d'attaque de <i>Thaumetopoea pityocampa</i> sur les espèces du genre <i>Pinus</i>	35
Tableau 6.	Semio-chimiques du pin lié à la sélection de l'hôte par les femelles de la processionnaire du pin, <i>T. pityocampa</i>	37
Tableau 7.	Etat populationnel de la processionnaire du pin <i>T. pityocampa</i> en fonction de la variation de température.....	39
Tableau 8.	Phases d'un cycle de gradation de <i>Thaumetopoea pityocampa</i>	47
Tableau 9.	Symptômes sanitaires observées lors d'exposition aux poils	51
Tableau 10.	Superficies des forêts naturelles de la région de Djelfa.....	56
Tableau 11.	Caractéristiques des stations d'étude.....	61
Tableau 12.	Les coordonnées géographiques des nids considérées à l'étude de la phénologie de la processionnaire dans la forêt naturelle de Senalbae 2014 à 2017.....	74
Tableau 13.	Analyse descriptive du matériel biologique examiné.....	81
Tableau 14.	Tests de significativité des pontes.....	87
Tableau 15.	Analyse LSD des quatre stations prospectées.....	89
Tableau 16.	Périodes d'éclosions des œufs des populations étudiées.....	97
Tableau 17.	Analyse comparative des taux d'émergence des pontes de la région semi-aride centre.....	99
Tableau 18.	Analyse descriptive des catégories d'œufs.....	100
Tableau 19.	Catégories du nombre d'œufs par ponte.....	101
Tableau 20.	Catégories d'œufs en pourcentage.....	102
Tableau 21.	Dénombrement des larves (L1) de pontes.....	104
Tableau 22.	L'effet des températures journalières sur l'émergence des parasitoïdes.....	106
Tableau 23.	Fréquence des parasitoïdes dans les régions prospectées.....	109

Tableau 24.	Résultats des réactions de caractérisation de la poudre des aiguilles de pin d'Alep.....	116
Tableau 25.	Taux de défoliation relevés en 2013 et 2014.....	128

INTRODUCTION

Introduction

Les forêts ont été confrontées à des changements importants au cours des dernières décennies. Aujourd'hui, les forêts méditerranéennes sont sous très fortes pressions liées au changement climatique avec les risques élevés de dégradation des arbres, à des maladies et des bioagresseurs nuisibles et d'incendies à plus fortes intensités (Curt, 2017). En Algérie, la forêt revêt un caractère particulièrement important car elle constitue un élément essentiel de l'équilibre écologique et socio-économique des régions rurales en particulier et du nord du pays en général, elle joue un rôle essentiel à la protection à la fois contre l'érosion, la désertification, à l'amélioration des activités agricoles et pastorales et à la protection de l'environnement.

Actuellement les forêts algériennes, particulièrement les pinèdes sont sujettes à des attaques périodiques de la processionnaire du pin qui se répartit en parfaite synchronisation avec l'évolution du climat (Rousselet, 2011). L'espèce s'est étendue vers diverses altitudes durant ces dernières années (Battisti *et al.*, 2005). Sur la base de la structure génétique des populations de la processionnaire du pin, deux clades ont été mis en évidence en Algérie ; les populations ENA clade et *pityocampa* clade. Si nous considérons la carte de la distribution géographique des clades établie par Kerdelhué *et al.* (2009) et par El-Mokhfi *et al.* (2016), les populations de la processionnaire du pin considérées dans la zone prospectée dans la pinède de la zone semi-aride de Djelfa, appartiennent au clade *pityocampa*.

Ce défoliateur des essences résineuses des genres *Pinus* et *Cedrus* (Huchon et Démolin, 1970) est devenu un modèle biologique de nombreux projets de recherches sur le changement climatique. Les différences climatiques en latitude ou en altitude affectent le cycle de développement de la processionnaire du pin (Démolin, 1969a). Son

développement larvaire hivernal est particulièrement sensible aux températures, plus on se déplace vers le Nord ou plus on monte en altitude, plus la température moyenne diminue. Ceci provoque l'augmentation de la durée de développement larvaire de la processionnaire du pin et le décalage de la période de vol. Malgré les études effectuées sur la biologie et l'écologie de l'espèce, son comportement écologique reste complexe et sous l'égide de diverses variables environnementales.

Parmi les antagonistes de la processionnaire du pin, les parasitoïdes embryonnaires sont les principaux régulateurs des populations de la processionnaire du pin, ils sont essentiellement des Hyménoptères de la famille des Chalcidiens. En Algérie, deux parasitoïdes actifs de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* sont notés ; le spécialiste *Baryscapus servadeii* Domenichini (Chalcidien : Eulophidae) et le généraliste *Ooencyrtus pityocampae* Mercet (Chalcidien : Encyrtidae). Les parasitoïdes embryonnaires sont moins présents aux limites de l'aire de répartition de leur hôte, Biliotti (1958) note que le taux de parasitisme est très faible en limite d'aire de répartition altitudinale de la processionnaire du pin. L'expansion de la processionnaire du pin pourrait lui permettre d'échapper à ses ennemis lui procurant ainsi une compétitivité très importante.

Les niveaux d'infestation de la processionnaire connaissent des phases de pullulation cycliques suivies de périodes de latence. Les gradations s'effectuent généralement sur 6 à 8 ans (Robinet, 2006). Les attaques massives de cet insecte sont réapparues plus particulièrement dans les jeunes plantations de pin d'Alep du projet « Le Barrage Vert ». La monoculture exclusive du pin d'Alep a engendré une explosion et un milieu favorable aux populations de la processionnaire du pin. A ce propos, Dulaurent (2010) note que les peuplements forestiers mélangés subissent moins de dégâts d'insectes herbivores que les

peuplements purs. À l'échelle du paysage, les peuplements de pin au centre de paysages hétérogènes sont moins infestés que dans les paysages de la monoculture.

L'objectif de ce travail est de tirer des renseignements sur l'expansion de la processionnaire du pin dans les pinèdes de la région de Djelfa et d'élucider les caractéristiques écologiques et biologiques des pontes de la processionnaire, *T. pityocampa* sur le pin d'Alep dans les forêts naturelles et les reboisements en zones semi-arides. De même une étude particulière est conduite sur le choix des femelles pondreuse sur les aiguilles de pin dans les milieux prospectés et de comprendre la stratégie d'oviposition de sélection préférée.

Le premier volet de l'étude est consacré à une synthèse de réflexion sur la processionnaire du pin et traite les données relatives à l'ensemble des aspects bioécologiques de la processionnaire du pin, *T. pityocampa*, de leur importance et de la stratégie d'attaque. Le second, traite les sites prospectés, le matériel utilisé et les méthodes expérimentales adoptées. Les résultats et les interprétations feront l'objet du dernier volet. Sur la base des informations recueillies, des perspectives sur la gestion forestière à entreprendre seront présentées pour éviter ou limiter une plus grande expansion dans son aire de répartition.

PREMIER CHAPITRE
GÉNÉRALITÉS SUR LA
PROCESSIONNAIRE DU PIN ET SES
AUXILIAIRES

PREMIER CHAPITRE

GÉNÉRALITÉS SUR LA PROCESSIONNAIRE DU PIN ET SES AUXILIAIRES

1. Historique et synthèse sur la biosystématique du genre *Thaumetopoea*

Le genre *Thaumetopoea* désigne les thaumétopées, c'est l'unique genre de la famille de Notodontidae (Fraval, 2007) qui comprend une diversité de 15 espèces de processionnaires dont neuf sont inféodées aux résineux (Basso *et al.*, 2016) ; *T. solitaria* (Freyer), *T. processionea* (Linnaei), *T. pityocampa* (Denis & Schiffermuller), *T. wilkinsoni* (Tams), *T. pinivora* (Treitschke), *T. bonjeani* (Powell), *T. herculeana* (Rambur), *T. jordana* (Staudinger) et *T. cheela* (Moore), *T. ispartaensis* (Doğanlar & Avcı), *T. libanotica* (Kkff & Talhouk), *T. dhofarensis* (Wiltshire), *T. apologetica* (Strand) (Battisti *et al.*, 2015), *T. seedrica* et *T. torosica* (Doğanlar). Selon les plantes hôtes, ces espèces sont classées et regroupées dans le tableau 1.

La comparaison de la forme et la dimension des écailles maternelles que la femelle de la processionnaire dépose pour protéger ses œufs au moment de la ponte est considérée comme une méthode simple d'identification des espèces du genre *Thaumetopoea* vivant sur les résineux (Agenjo, 1941). La figure 1 illustre les différentes variations des écailles, relatives aux espèces de processionnaires (Tsaknov *et al.* (1991).

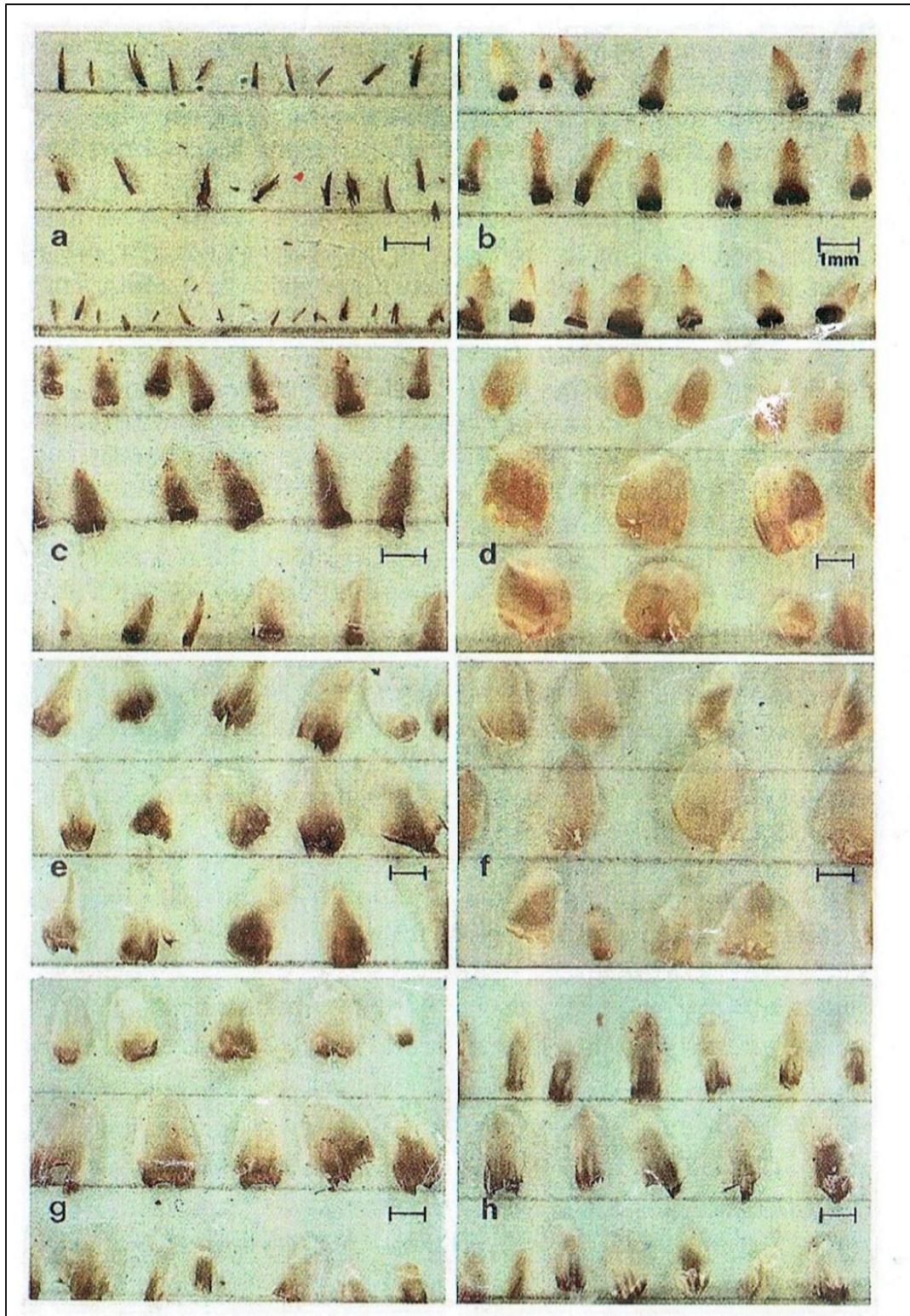
En fonction de leur distribution géographique, les espèces de processionnaires vivant dans la région méditerranéenne, exception faite pour les deux espèces *T. processionea* (Linneo) et *T. pinivora* (Treitschke) évoluent plus au nord et au centre de l'Europe (Tableau 2) (Battisti *et al.*, 2015). Parmi les processionnaires inféodées aux résineux ; *T. bonjeani* (Powell), *T. libanotica* (Kiriakoff & Talhouk), *T. ispartaensis* (Doğanlar & Avcı), *T. processionea* (Linnaei), *T. pinivora* (Treitschke) et *T. solitaria* (Freyer), appartiennent au groupe des processionnaires d'été ; qui effectuent leur développement larvaire du début du printemps au début de l'été. Les espèces de processionnaire ; *T. pityocampa* (Denis & Schiffermüller) et *T. wilkinsoni* (Tams) qui s'attaquent prioritairement au genre *Pinus*, mais aussi au genre *Cedrus*, appartiennent aux processionnaires d'hiver qui effectuent leur développement de la fin de l'été jusqu'au printemps de l'année suivante (Démolin *et al.*, 1994). Ces deux espèces possèdent les mêmes traits biologiques ainsi certains auteurs

considèrent que *T. wilkinsoni* est un écotype et non une espèce différente (Fig. 2) (Démolin et Frerot, 1994). Cuevas *et al.*, (1989) ; Guerrero *et al.*, (1981) ; Quero *et al.*, (1997) considèrent que les deux espèces possèdent la même phéromone sexuelle (Yne 11,Z13-16:AC) (Fig. 3), et les mêmes exigences bioclimatiques pour effectuer leur développement larvaire (Démolin, 1965a). Les deux espèces peuvent se croiser entre-elles et sont considérées comme étant une forme bien distincte de *T. pityocampa* même si elles présentent des variations au niveau des génitalia qui se caractérisent, pour *T. wilkinsoni*, par la présence d'une barre de renforcement dans la partie supérieure des valves (Fig. 4) et au niveau des crêtes frontales (Canthus) (Fig. 5).

Tableau 1. Liste des plantes hôtes des espèces du genre *Thaumetopoea*

Taxon	Author	Distribution	Host plants
<i>Thaumetopoea processionea processionea</i>	(Linnaeus, 1758)	Europe, Middle East	<i>Quercus</i> spp.
<i>Thaumetopoea processionea pseudosolitaria</i>	Daniel, 1951	South-Eastern Europe, Middle East	<i>Quercus</i> spp.
<i>Thaumetopoea solitaria iranica</i>	Agenjo, 1941	Middle East	<i>Pistacia</i> spp.
<i>Thaumetopoea solitaria solitaria</i>	(Freyer, 1838)	South-Eastern Europe, Middle East	<i>Pistacia</i> spp.
<i>Thaumetopoea herculeana herculeana</i>	(Rambur, 1837)	South-Western Europe, Northern Africa, Middle East	<i>Cistus</i> spp., <i>Erodium</i> spp., <i>Helianthemum</i> spp.
<i>Thaumetopoea herculeana judaea</i>	Bang-Haas, 1910	Middle East	Unknown
<i>Thaumetopoea apologetica abyssinica</i>	Strand, 1911	Eastern Africa	<i>Maerua</i> spp.
<i>Thaumetopoea apologetica apologetica</i>	Strand, 1909	Southern and Eastern Africa	<i>Maerua</i> spp.
<i>Thaumetopoea dhofarensis</i>	Wiltshire, 1980	Middle East	Unknown
<i>Thaumetopoea jordana</i>	Staudinger, 1887	Middle East	<i>Rhus tripartita</i>
<i>Thaumetopoea cheela</i>	Moore, 1883	Southern Asia	<i>Pinus</i> spp., or <i>Cedrus</i> spp.
<i>Thaumetopoea bonjeani</i>	Powell, 1922	North-Western Africa	<i>Cedrus atlantica</i>
<i>Thaumetopoea pinivora</i>	(Treitschke, 1834)	Central, Northern and Eastern Europe	<i>Pinus</i> spp.
<i>Thaumetopoea libanotica</i>	Kiriakoff & Talhouk, 1975	Middle East	<i>Cedrus libani</i>
<i>Thaumetopoea ispartaensis</i>	Doganlar & Avcı, 2001	Middle East	<i>Cedrus libani</i>
<i>Thaumetopoea sedirica</i>	(Doganlar, 2005)	Middle East	<i>Cedrus libani</i>
<i>Thaumetopoea torosica</i>	(Doganlar, 2005)	Middle East	<i>Pinus brutia</i>
<i>Thaumetopoea pityocampa pityocampa</i>	([Denis & Schiffermüller], 1775)	Central Europe, Mediterranean region	<i>Cedrus</i> spp., <i>Pinus</i> spp.
<i>Thaumetopoea pityocampa orana</i>	(Staudinger, 1901)	North-Western Africa	<i>Pinus</i> spp.
<i>Thaumetopoea pityocampa</i> ENA	—	North-Eastern Africa	<i>Cedrus atlantica</i> , <i>Pinus halepensis</i>
<i>Thaumetopoea wilkinsoni</i>	Tams, 1925	Middle East	<i>Cedrus libani</i> , <i>Pinus</i> spp.

Basso *et al.* (2016)



Tsaknov *et al.* (1991)

Figure 1. Les différentes écailles des espèces du genre *Thaumetopoea* (a) *T. processionea* (b) *T. pinivora* (c) *T. bonjeani* (d) *T. wilkinsoni* (e,f,g,h) *T. pityocampa*

Tableau 2. Les processionnaires du genre *Thaumetopoea* et leur distribution géographique

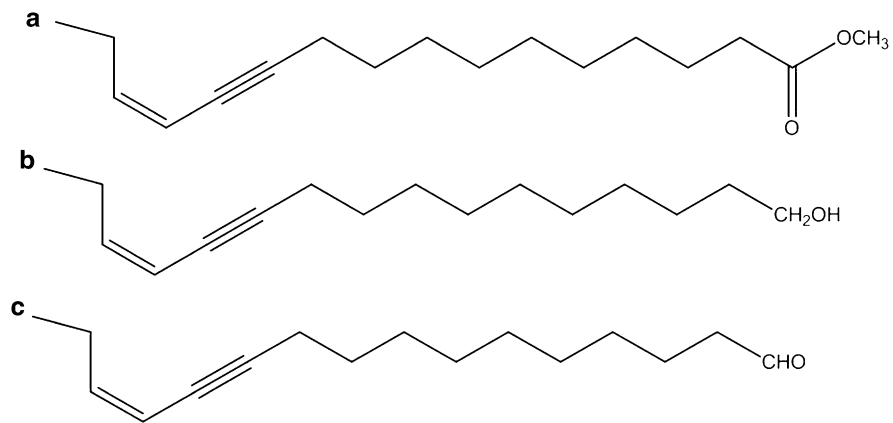
Espèces	Aire de répartition géographique
<i>T. pityocampa</i>	Europe, Middle East, North Africa
<i>T. wilkinsoni</i>	Middle East
<i>T. pinivora</i>	Europe
<i>T. bonjean</i>	North-Western Africa
<i>T. ispartaensis</i>	Turkey
<i>T. libanotica</i>	Lebanon
<i>T. processionea</i>	Europe, Middle East
<i>T. solitaria</i>	Europe, Middle East
<i>T. jordana</i>	Northern Africa, Jordan valley
<i>T. herculeana</i>	Europe, Middle East, India
<i>T. cheela</i>	Pakistan
<i>T. apologetica</i>	Eastern Africa

Battisti *et al.* (2015)



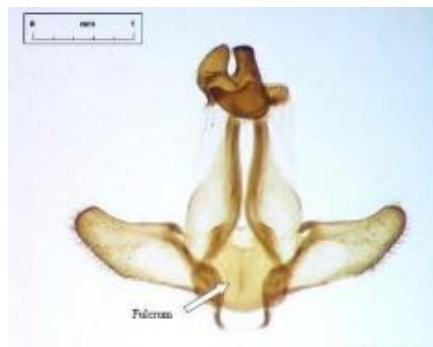
Battisti *et al.* (2015)

Figure 2. Comparaison entre les deux processionnaires *T. pityocampa* (♂-♀), *T. wilkinsoni* (♂-♀) et les caractéristiques des écailles protectrices.

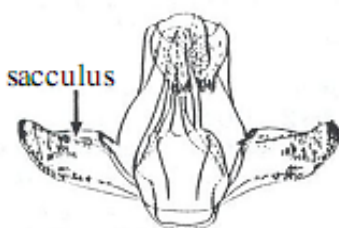


Battisti *et al.* (2015)

Figure 3. La structure de la phéromone sexuelle des espèces (a) *T. pityocampa*, *T. wilkinsoni* ; (a,b,c) *T. jordana*



T. pityocampa



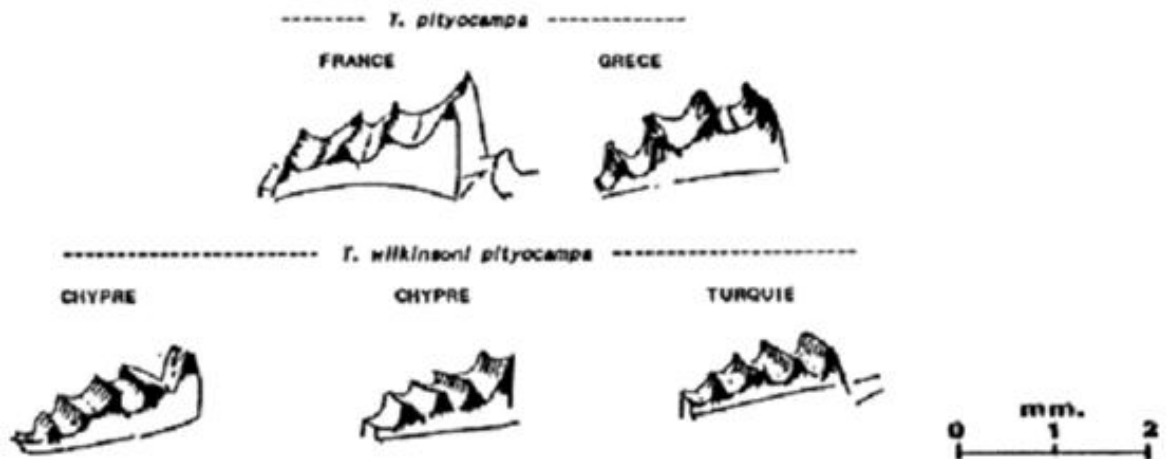
T. wilkinsoni Turquie



T. wilkinsoni chypre

Démolin *et al.* (1994)

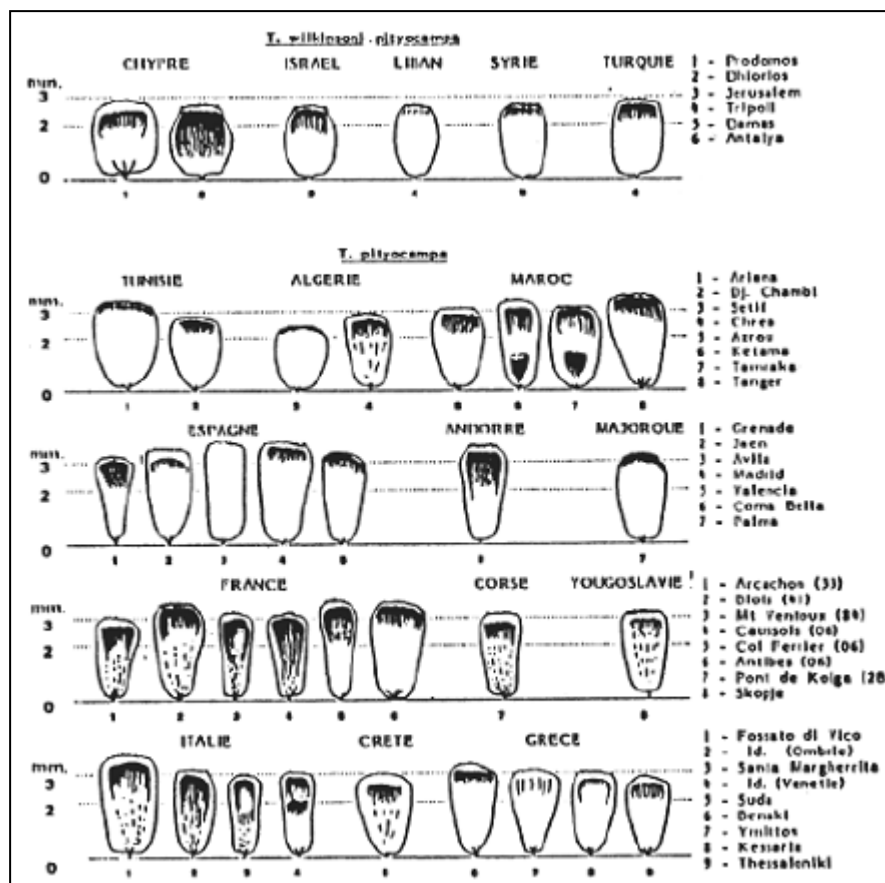
Figure 4. Génitalia des processionnaires, *T. wilkinsoni* se différencie de *T. pityocampa* par la présence d'une barre de renforcement sur les valves



Démolin *et al.* (1994)

Figure 5. Variation des crêtes frontales (Canthus) des espèces *T. pityocampa* et *T. wilkinsoni*

Démolin *et al.* (1994), notent que la forme et de la dimension des écailles protectrices que les femelles de la processionnaire déposent sur ses œufs au moment de l'oviposition est une méthode d'approche pour séparer les espèces du genre *Thaumetopoea*. La figure 6 montre les différents types d'écailles de *T. pityocampa* et *T. wilkinsoni* par localité.



Démolin *et al.* (1994)

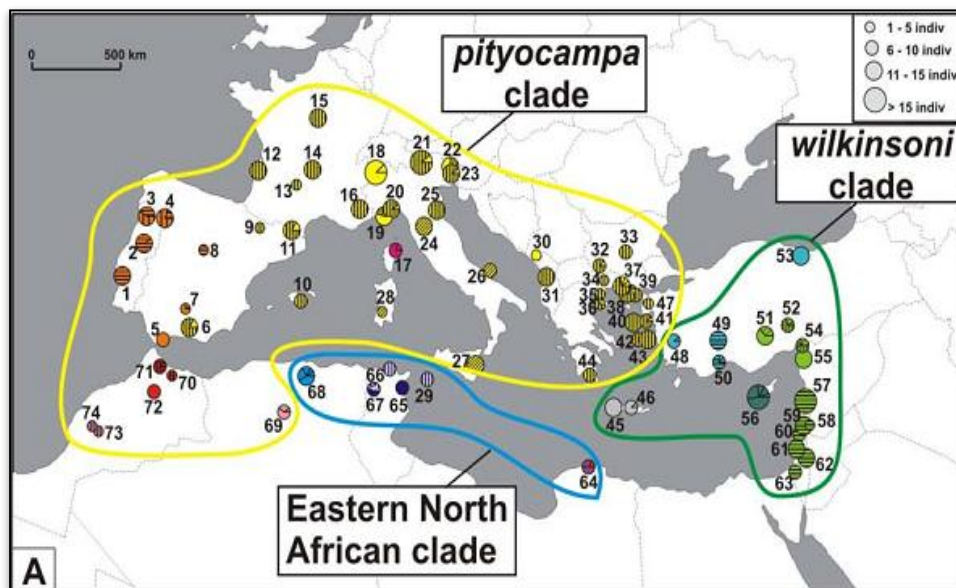
Figure 6. Variation de la forme et de la dimension des écailles maternelles de *T. wilkinsoni* et *T. pityocampa*

2. Caractérisation des populations de la processionnaire *Thaumetopoea pityocampa*

La processionnaire du pin, *T. pityocampa* est connue depuis deux cents ans, elle a été décrite pour la première fois sous le nom *Bombyx pityocampa* par Denis et Schiffermüller en 1775, puis en 1819 et par Hübner a été classée dans le genre *Thaumetopoea* (Dajoz, 2007). En Algérie, il n'est fait mention jusqu'à 1982 que de *T. pityocampa*. En juin 1982, une nouvelle chenille processionnaire, *Thaumetopoea bonjeani* provoquant des dégâts impressionnants a été signalée dans la cédraie du Belezma (massif des Aurès) (Gachi, 1994).

Plusieurs projets ont été développés depuis 2002 dans le but de caractériser le degré de divergence entre *T. pityocampa* et *T. wilkinsoni* et préciser les aires de distribution.

Kerdelhué *et al.* (2009) notent que dans l'ensemble de la méditerranée, trois clades majeurs fortement différenciés et strictement allopatriques, sont mis en évidence (Fig.7). Le clade *pityocampa* présent en Europe (de la Péninsule Ibérique à l'est de la Grèce, en passant par la France, l'Italie et une partie des Balkans) et dans une partie du Maghreb (Maroc et sud de l'Algérie). Le clade *wilkinsoni* regroupe les populations de Chypre, de Turquie, du Liban. Le troisième clade comprend les individus d'une partie de l'Algérie, de Tunisie et de Libye, et ne correspond à aucune entité taxonomique connue ("clade ENA", Eastern-North Africa). Des études conduites en laboratoire de l'Université de Padova (Italie) par l'équipe du professeur Andrea Battisti utilisant des marqueurs moléculaires (séquençage d'une partie des gènes COI et COII, et marqueurs AFLP) confirment que les populations de Djelfa font partie du clade *pityocampa*. Les recherches en cours sur cette espèce impliquent plusieurs Unités INRA, mais également des partenaires européens parmi lesquels les équipes d'Andrea Battisti (Univ. Padoue, Italie) et de Manuela Branco (Univ. Lisbonne, Portugal).

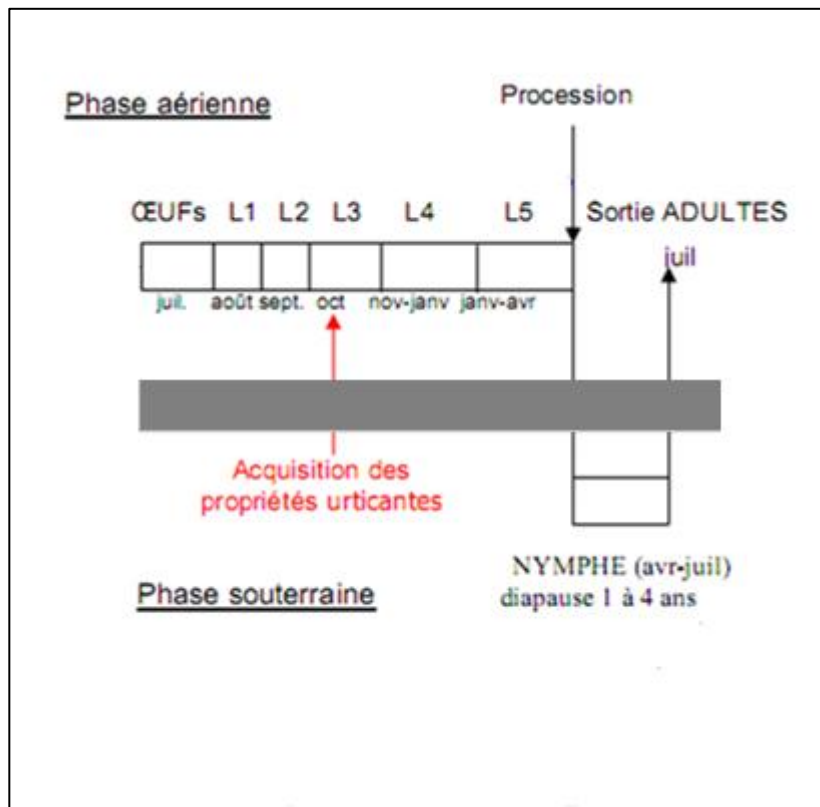


Kerdelhué *et al.* (2009)

Figure 7. Distribution géographique des trois clades de la processionnaire du pin

3. Chronologie de développement de la processionnaire d'hiver

Thaumetopoea pityocampa est une espèce monovoltine, le cycle biologique est généralement annuel mais peut s'échelonner sur deux ou plusieurs années (cycles pluriannuels) en relation avec l'altitude et suivant l'intensité de la diapause et selon les conditions écologiques du milieu (Pimentel, 2004). Bonnet *et al.* (2008) notent que les conditions environnementales (température et insolation) déterminent l'évolution de l'insecte dans son biotope. La reproduction a lieu en été, et les larves se développent et s'activent classiquement pendant l'hiver. Le cycle évolutif s'effectue en deux phases, l'une aérienne (Oviposition et évolution larvaire en cinq stades) et l'autre souterraine (nymphe et formation de l'adulte) (Huchon et Démolin, 1970). Les différentes écophases sont synthétisées et illustrées par la figure 8.



Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Nidification (cocons)	Procession (descente de l'arbre)		Enfouissement dans le sol			Vol, reproduction et ponte		Eclosion oeufs		Nidification (cocons dans les pins)	
Chenilles			Chrysalide			Papillons de nuit		Larves		Chenilles	

Grojean *et al.*, (2006)

Figure 8. Evolution temporelle des écophases de la processionnaire du pin *T. pityocampa*

3.1. Phase épigée

La durée de l'écophase aérienne varie de cinq à huit mois et s'effectue en plusieurs étapes de l'émergence des papillons jusqu'à la fin d'évolution larvaire (Rivière, 2011)

3.1.1. Emergences des adultes et accouplement

Au cours de la période estivale, les imagos (Fig. 9) émergent au crépuscule avec une culmination d'émergence notée entre la mi-juin à mi-août au coucher du soleil. Les dates d'émergence varient en fonction de l'altitude et latitude et des conditions climatiques. L'heure exacte varie en fonction de la pression atmosphérique journalière (Démolin, 1969b). L'émergence des mâles a lieu généralement une demi-heure avant celle des femelles (Bertella, 1987). Ils se libèrent de leur cocon grâce à des crêtes sclérifiées situées sur leur tête, qui leur permettent de découper l'enveloppe qui les entoure (Démolin, 1969b). Morphologiquement, les deux sexes se ressemblent (Le ratio mâle/femelle est proche de 1) (Rivière, 2011). L'envergure alaire des femelles de la processionnaire varie de 36 à 49 mm, celle des mâles de 31 à 39 mm. Les ailes antérieures sont gris cendré terne et les ailes postérieures sont blanches, à franges grises, avec une tache noire caractéristique au niveau de la région anale. Les antennes sont filiformes chez la femelle et pectinées chez le mâle, les deux sexes ont un thorax poilu. L'abdomen des mâles est velu et pointu. Les mâles se distinguent néanmoins des femelles par leur taille plus réduite, caractérisant un dimorphisme sexuel. Les papillons sont nocturnes et éphémères, Dès leur sortie, les adultes recherchent un lieu surélevé pour déployer leurs ailes pendant quelques minutes. Les adultes femelles peuvent parcourir environ 3 à 5 kilomètres et les mâles une distance plus conséquente de 30 à 50 kilomètres (Battisti *et al.*, 2005). A la tombée de la nuit, les adultes sont actifs et peuvent parcourir plusieurs kilomètres voire même plusieurs dizaines de kilomètres pour les mâles à la recherche d'une partenaire. Les femelles cherchent une zone de repos, quelques heures après, elles se placent dans une position en émettant une phéromone spécifique appelée la pityolure (Z)-13-hexadecen-11-ynyl (Bonnet *et al.*, 2008). Les papillons mâles attirés par la phéromone sexuelle s'envolent à la recherche des femelles. Après l'accouplement qui dure environ une heure (Abgrall et Souterenon, 1991), les deux papillons se séparent. Les mâles meurent un à deux jours plus tard (Gazette, 2010). Les femelles fécondées s'envolent et choisissent un site favorable pour l'émission de leurs œufs qui dure de trois à quatre heures (Démolin, 1969b). Les femelles effectuent un choix sélectif à l'intérieur du peuplement végétal, elles sont sous la dépendance de plusieurs

variables environnementales et acquièrent une plus grande capacité de fécondité dans les reboisements (Hezil *et al.*, 2014).



(Originale)

Figure 9. Adulte de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa*

3.1.2. Oviposition

Après l'accouplement, Les femelles de la processionnaire du pin pondent leurs œufs sur les aiguilles de pins les plus avoisinants de leur lieu d'émergence en forme d'un manchon de 4 à 7 centimètres de longueur appelé ponte. La femelle couvre ses œufs au fur et à mesure de leur émission par des écailles protectrices de couleur beige-claire (Fig. 10). Un grand nombre de ces amas ovaires renfermant de 70 à 300 œufs sont pondus en général autour de deux ou plusieurs aiguilles de pin des pousses périphériques de la couronne. La durée de l'embryogenèse dure de 30 à 45 jours (Démolin, 1969a). Les œufs ont un diamètre d'environ 1 mm et ont une couleur gris clair-blanc. L'oviposition de la processionnaire du pin débute de la base vers l'extrémité des aiguilles de pin (Démolin, 1969a). Dans son

choix, la processionnaire cherche l'arbre lui offrant un support qui se distingue par le diamètre des aiguilles, la longueur et la rugosité. Une étude plus récente attribue la préférence à la présence de substances volatiles émanant des tissus des aiguilles (Paiva *et al.*, 2011), Zhang *et al.* (2003) notent que les terpènes ont un rôle important dans la sélection des hôtes par les femelles par ses antennes qui répondaient fortement à quatre monoterpènes ; le myrcène, le b-phellandrène, le trans-b-ocimène et le terpinolène.

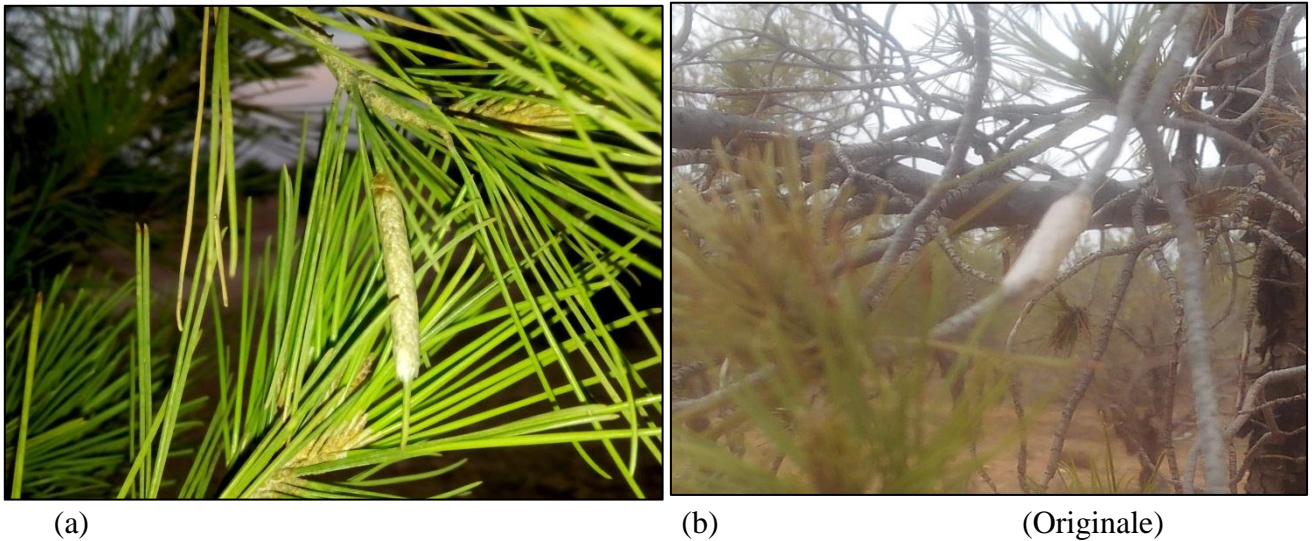


Figure 10. Ponte de la processionnaire du pin d'Alep ; (a) Ponte sur aiguille du pin d'Alep, (b) Ponte sur rameau du pin d'Alep.

3.1.3. Éclosion et développement larvaire

L'éclosion des œufs s'effectue 30 à 40 jours après la ponte qui s'étend de la fin juillet à la fin septembre. Le cycle d'évolution larvaire s'effectue en cinq stades (Démolin, 1969a). Deux périodes distinctes sont notées, à savoir : la période ambulatoire, allant de l'éclosion aux premiers froids, et la période du « nid d'hiver » durant laquelle les chenilles restent à un emplacement jusqu'au dernier stade et le départ en procession de nymphose à la recherche d'un site favorable à leur enfouissement (Démolin, 1971). Au premier stade les chenilles mesurent de 2 à 3 millimètres et sont de couleur jaune. Après une vingtaine de jours, les chenilles évoluent vers le second stade. Après la deuxième mue les chenilles du dernier stade, ont une longueur de 5 cm prennent un aspect définitif et acquièrent une couleur brun roux avec des soies latérales blanches (Démolin, 1969a). Au troisième stade, les touffes de poils urticants rougeâtres caractéristiques, apparaissent par paire sur le côté

dorsal de chaque segment de la chenille. Ces poils sont libérés lors des déplacements ou bien quand les chenilles se sentent en danger (Démolin, 1971). A la fin de l'automne, les chenilles tissent sur la partie la plus ensoleillée de l'arbre un nid d'hiver qui sert d'accumulateur de la chaleur pour les derniers stades. A chaque stade larvaire, les chenilles entrent dans une période de mue où elles cessent de s'alimenter. Au printemps, au terme de leur développement au cinquième stade les chenilles forment des processions de nymphose. La durée des stades larvaires dépend des variations climatiques (Tableau 3). Plus l'hiver est long, plus la vitesse d'évolution est diminuée principalement au quatrième stade (Démolin, 1971).

Tableau 3. La durée des stades larvaires de la processionnaire du pin.

Les stades	L1	L2	L3	L4	L5
La durée (jours)	8-12	12-18	30-60	30-90	30-90
	Pré-nids	Déplacement régulier des colonies		Nid d'hiver emplacement définitif	
				<ul style="list-style-type: none">• Hiver doux (30 jours)• Tempéré (60 jours)• Froid (90 jours)	

Démolin (1969b)

Les cinq stades larvaires peuvent être partagés en deux périodes. La première, dite ambulatoire, durant laquelle les chenilles changent fréquemment l'endroit et s'étale de l'éclosion jusqu'aux premiers froids. La seconde, appelée période du nid d'hiver où les chenilles confectionnent un nid et y restent jusqu'à la fin de leur développement larvaire (Hochon et Démolin, 1970).

3.1.3.1. Phase ambulatoire

Le comportement grégaire s'observe dès l'éclosion, les chenilles s'alimentent des aiguilles les plus proches du manchon de ponte puis tissent un réseau de soie léger, pré-nid (Fig. 11). La colonie change souvent d'emplacement en fonction de la disponibilité des aiguilles (Huchon et Démolin, 1970). Ces mêmes auteurs notent que les déplacements s'effectuent quand la température extérieure oscille autour de 20°C, la colonie recherche l'endroit le plus favorable pour construire le nid d'hiver qui agit comme un radiateur solaire permettant une évolution adéquate.



(Originale)

Figure 11. Pré-nids des premiers stades larvaires de la processionnaire du pin dans son aire de répartition.

3.1.3.2. Construction du nid d'hiver

En automne, les chenilles généralement arrivées au troisième stade partent à la recherche de l'emplacement le plus ensoleillé et commencent le tissage définitif du nid d'hiver (Fig.12) en fonction de l'ensoleillement et la température (Zamoum, 1998). Les chenilles de la processionnaire du pin choisissent les endroits les plus élevés et mieux exposés au soleil (Bertella, 1987). Le nid construit est plus ou moins piriforme, de 10 à 15 cm de diamètre et se prolongeant jusqu'à 30 cm. Ce nid joue le rôle d'un radiateur en captant les rayons du soleil pour augmenter la température à l'intérieur du nid. Durant la nuit, lorsque la température dépasse 0°C, les chenilles quittent temporairement le nid pour s'alimenter à partir des aiguilles de pins avoisinantes (Hoch *et al.*, 2009). Les conditions d'évolution dans le nid, particulièrement la température permettent aux chenilles le passage au quatrième et cinquième stade (Huchon et Démolin, 1970).



(Originale)

Figure 12. Nid d'hiver de la processionnaire sur pin d'Alep en zone semi-aride

3.1.4. Procession post hivernale

Certains auteurs considèrent le déplacement en procession des chenilles du cinquième stade comme une troisième phase qui sépare les deux phases ; aérienne et souterraine (Fig. 13). La procession s'effectue de la mi-février jusqu'au mois d'avril selon les conditions climatiques (Martin, 2005). Généralement, la procession se déroule à des températures allant de 10 à 16°C. Les chenilles de la processionnaire ont une thigmotaxie céphalique qui se trouve à l'origine de leurs déplacements en procession. Ces chenilles possèdent également une thigmotaxie générale intervenant en particulier dans les groupements statiques qu'elles forment au repos. Les frottements des chenilles les unes sur les autres sont un facteur régularisant la marche de la file (Mallmann, 1962). Elles partent en procession, descendent le long du tronc de l'arbre à la recherche d'un emplacement idéal pour se nymphoser sous-sol (Delenatte, 2009). En tête de la procession, la chenille est généralement une femelle, et se dirige vers les sites les plus éclairés et les plus ensoleillées (Démolin, 1969a), les chenilles s'enterrent à proximité de la base de l'arbre d'origine (Démolin, 1969b) et peuvent même se déplacer jusqu'à une quarantaine de mètres (Grojean *et al.*, 2006). Les chenilles s'arrêtent, se groupent entre elles et s'enterrent à une profondeur de 5 à 20cm (Fraval, 2007). L'enfouissement n'est pas définitif, les chenilles

peuvent changer l'emplacement de nymphose si les conditions sont défavorables (Grojean *et al.*, 2006). Ces constatations restent très discutables.



(Originale)

Figure 13. La procession post hivernal de la processionnaire du pin

3.2. Phase hypogée

3.2.1. Etat nymphal

Après l'enfouissement (Fig. 14), les chenilles dans le sol entrent en nymphose, chaque chenille tisse un cocon de protection autour d'elle, puis se transforme en chrysalide (Bonnet *et al.*, 2008). Le développement reprend en général quelques semaines avant l'émergence des adultes (Grojean *et al.*, 2006).



(Originale)

Figure 14. Début d'enfouissement des chenilles

3.2.2. Diapause

A ce stade, un arrêt du développement caractérisé par une diminution notable du métabolisme s'effectue au cours de cette phase nymphale. Les chrysalides restent en diapause pendant 6 mois. La durée du cycle de la processionnaire du pin est définie par cette phase qui, selon les conditions climatiques, en particulier la température, peut s'étaler sur quelques années dans les conditions les plus défavorables, notamment au cours des années de sécheresses (Huchon et Démolin, 1970), en altitude, où les hivers sont particulièrement rigoureux, la durée d'évolution larvaire est plus longue, la diapause sera alors plus courte pour favoriser le cycle annuel, les mortalités s'élèvent à plus de 60% (Martin, 2005 et Grojean *et al.*, 2006). A la fin de cette période, l'activité métabolique intense dure environ un mois et aboutit à la constitution définitive de l'adulte qui est prêt à émerger (Huchon et Démolin, 1970).

4. Les ennemis naturels de la processionnaire du pin

4.1. Diversité des antagonistes

La processionnaire du pin est sujette à des attaques des bio-agresseurs qui ont fait l'objet de recherche de plusieurs auteurs. Biliotti (1958) est l'un des premiers auteurs qui a décrit les ennemis naturels de *T. Pityocampa*, durant les différentes écophases. Les ennemis naturels sont moins présents aux limites de l'aire de répartition de leur hôte (Colautti *et al.*, 2004).

La synthèse des espèces entomopathogènes citées par Biliotti (1956) ; de Masutti (1964) ; Biliotti, Démolin et Du Merle, (1969) ; de Rohi, (1993) ; Zamoum (1998) ; Barbaro et Battisti (2010) est regroupée dans le tableau 4.

Tableau 4. Répertoire des ennemis naturels de la processionnaire du pin, *T. pityocampa*

parasitoïdes	<ul style="list-style-type: none"> • parasitoïdes • oeufs • <i>Baryscapus servadeii</i> (Hym., eulophidae). • <i>Baryscapus transversalis</i> (Hym., eulophidae). • <i>Pediobius</i> sp. (Hym., Eulophidae). • <i>Ooencyrtus pityocapae</i> (Hym., Eulophidae). • <i>Anastatus bifasciatus</i> (Hym., Eulophidae). • <i>Eupelmus seculata</i> (Hym., Eulophidae). • <i>Eupelmus</i> sp. (Hym., Eulophidae). • <i>Trichogramma embryophagum</i> (Hym., Trichogrammatidae). • <i>Telenomus Haliday</i> (Hym., Scelionidae). • Chenilles • <i>Phryx caudata</i> (Dipt., Tachinidae). • <i>Compsilura concinnata</i> (Dipt., Tachinidae). • <i>Ctenophorocera pavidata</i> (Dipt., Tachinidae). • <i>Exorista segregata</i> (Dipt., Tachinidae). • <i>Exorista larvarum</i> (Dipt., Tachinidae) • <i>Erigorgus feminator</i>. (Hym., Ichneumonidae). • <i>Apanteles vestalis</i> (Hym., Braconidae). • <i>Meteorus vericolos</i> (Hym., Braconidae). • <i>Dibrakys cavus</i> (Hym., pteromalidae). • <i>Habrocytus eucerus</i> (Hym., pteromalidae). • <i>Xantandrus comtus</i> • (Diptera : Syrphidae) • Chrysalides • <i>Coelichneumon rudis</i> (Hym., Ichneumonidae). • <i>Villa brunnea</i> (Dip., Bombyliidae). • <i>Villa quinquefasciata</i> (Dip., Bombyliidae). • <i>Conomorium pityocampae</i> (Hym., Pteromalidae). 	Prédateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Prédateurs • oeufs • <i>Ephippiger ephippiger</i> (Ortho. Tettigoniidae). • <i>Barbitiste fischeri</i> (Ortho., Tettigoniidae). • <i>Oecanthus pellucens</i> (Orth., Grillidae). • <i>Linepithema humile</i> (Hym. Formicidae). • <i>Hérison</i> (<i>Paraechinus</i> sp.). • <i>Parus caeruleus</i> • <i>Aegithalus caudatus</i> • Chenilles • <i>Xanthandrus comtus</i> Harr. (Dept., Syrphide). • <i>Parus</i> sp. (<i>Mésanges</i>). • <i>Scolopendra cingulata</i>. • <i>Calosoma sycophanta</i> • (<i>Coleoptira</i> : <i>Carabidae</i>) • <i>Cuculus canorus</i>, <i>Le Coucou gris</i> • Chrysalides • <i>Upupa epops</i> (<i>Huppe facinée</i>). • Adultes • <i>Vespa germanica</i> (Hym., vespidae). • <i>Crematogaster scutellaris</i>, <i>Leptorax recedens</i> Nyl., <i>formica rufa</i> L. (Hym. Formicidae). • <i>Caprimulgus europaeus</i> • <i>Hérison</i> • <i>Chauves-souris</i> 	Agent pathogène	<ul style="list-style-type: none"> • Virus • Chenilles • <i>Smithiavirus pityocampae</i>. • <i>Borrelia pityocampae</i> • Chrysalides • <i>Smithiavirus pityocampae</i>
				<ul style="list-style-type: none"> • Mycoses • Chenilles • <i>Beauveria bassiana</i> (<i>Basalmo</i>) Vuilleumin. • <i>Poecilomyces fumoso-roseus</i>. • Chrysalides • <i>Beauveria bassiana</i>. • <i>Poecilomyces fumoso-roseus</i>. • <i>Paecilomyces farinosus</i> • <i>Cordiceps militaris</i>. • <i>Metarhizium anisopliae</i>. • <i>Aspergillus flavus</i> • <i>Scopulariopsis</i> sp. 	
				<ul style="list-style-type: none"> • Bactérie • Chenilles • <i>Clostridium</i> sp. • <i>Bacillus thuringiensis</i> 	

4.1.1. Les parasitoïdes

Les parasitoïdes sont des organismes qui se développent sur ou à l'intérieur d'un autre organisme, causant ainsi toujours la mort de leur hôte. Chez les insectes parasites d'autres insectes, conduisent toujours à la mort de l'hôte (Rohi, 1993). Les parasitoïdes jouent un rôle très important dans la régulation des insectes ravageurs (Lewis *et al.*, 1998; Stiling et Cornelissen, 2005). Deux espèces principales de parasitoïdes embryonnaires de la processionnaire du pin, *T. pityocampa*; *Ooencyrtus pityocampae* (Mercet) (Hymenoptera, Encyrtidae) est le parasite généraliste qui peut élever sur des hôtes variés de défoliateurs de résineux et de feuillus (Fig.15a), *Baryscapus servadeii* (Domenichini) (Hymenoptera, Eulophidae) est considéré comme un spécialiste du *Thaumetopoea* dont les dates d'émergence correspondent avec la période de l'oviposition de la processionnaire (Fig.15b). Les individus émergés en premiers sont capables de parasiter à nouveau les pontes de processionnaire immédiatement après leur émergence, leur permettant de réaliser deux générations par an (Masutti, 1964).



(a)



(b)

(Originale)

Figure 15. a- *Ooencyrtus pityocampae*
b- *Baryscapus servadeii*

4.1.1.1. Sélectivité et compétition des parasitoïdes

La relation entre un hôte et son parasitoïdes est très complexe. La compétition est l'interaction entre les individus qui partagent un même besoin pour une nourriture disponible en quantité limitée qui conduit à la réduction du taux de survie, de croissance et de reproduction des individus en compétition (Goubault, 2003). La compétition intraspécifique s'exerce entre des individus de la même espèce et dépendante de la densité de la population de l'individu et augmentent progressivement. Son action limite potentiellement la génération suivante (Lebreton, 2009), le parasitoïde peut être considéré dans ce cas comme hyperparasite qui joue un rôle important dans le maintien et l'évolution de la dynamique des populations du ravageur. La compétition interspécifique entre deux ou plusieurs espèces, à choisir un seul hôte est très connue surtout quand les niches écologiques, ovo-larvaire et nymphale sont occupées par des espèces. Le concept de compétition reste très discutable.

4.1.1.2. Importance des parasitoïdes en lutte biologique

Plus d'une centaine d'espèces auxiliaires sont utilisées pour lutter contre les organismes nuisibles dans le monde mais la très grande majorité est représentée par des insectes parasitoïdes (Thomas *et al.*, 2007). Un parasitoïde efficace en lutte biologique est une espèce dont les femelles ont la capacité de détecter et de s'attaquer à leurs hôtes et de distribuer leur progéniture efficacement lorsque les hôtes sont éloignés (Doutt *et al.*, 1971). Les endoparasitoïdes se développent à l'intérieur de leur hôte, et les ectoparasitoïdes se développent à l'extérieur. On parle de parasitoïdes solitaires, lorsqu'un seul individu se développe à partir d'un seul hôte, et de parasitoïdes grégaires, lorsque plusieurs individus se développent à partir du même hôte. Les parasitoïdes idiobiontes tuent ou paralysent leur hôte (Suty, 2010). A ce sujet, Aubry (2008) note qu'un hôte est sensible à un parasitoïde pendant un ou quelques stades de son développement.

4.1.2. Les prédateurs

La figure 16 regroupe quelques insectes d'Orthoptères prédateurs inféodés à la processionnaire du pin. Parmi les Coléoptères spécialistes des processionnaires, Kanat et Mol (2008) notent qu'un calosome (Fig.17) consomme de 840 à 1120 chenilles de processionnaire au cours de sa vie estimée à 4 ans.

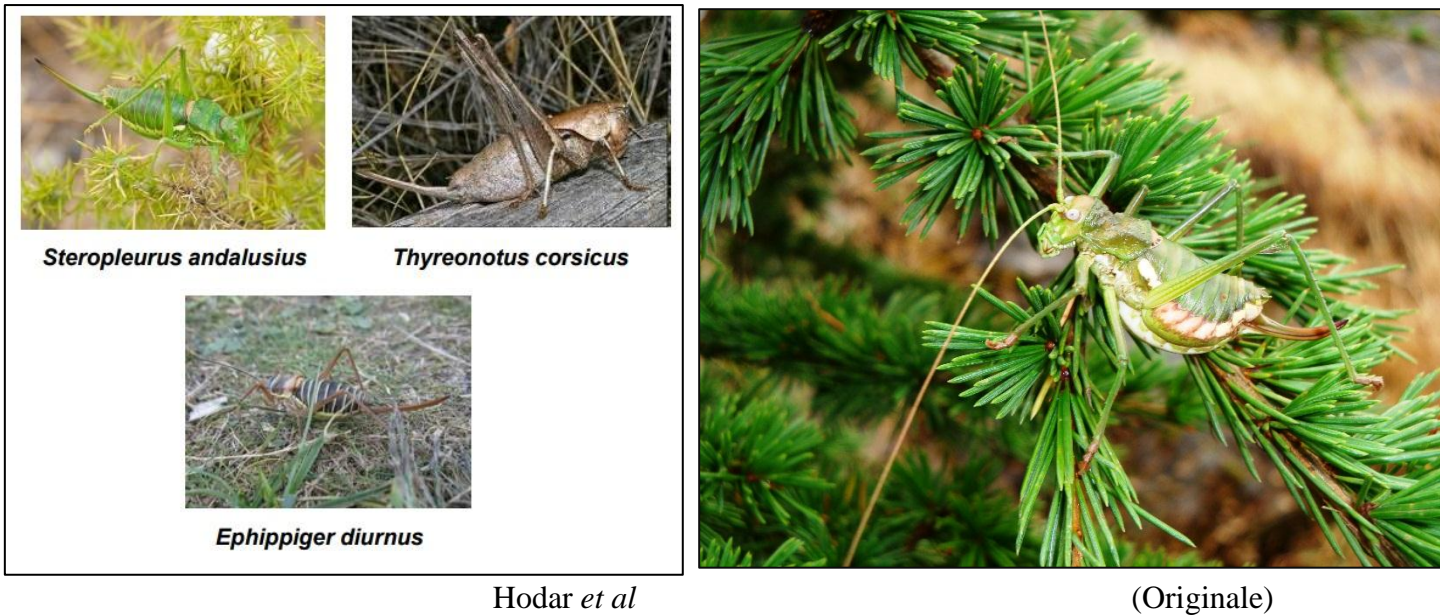


Figure 16. Orthoptères prédateurs de la processionnaire



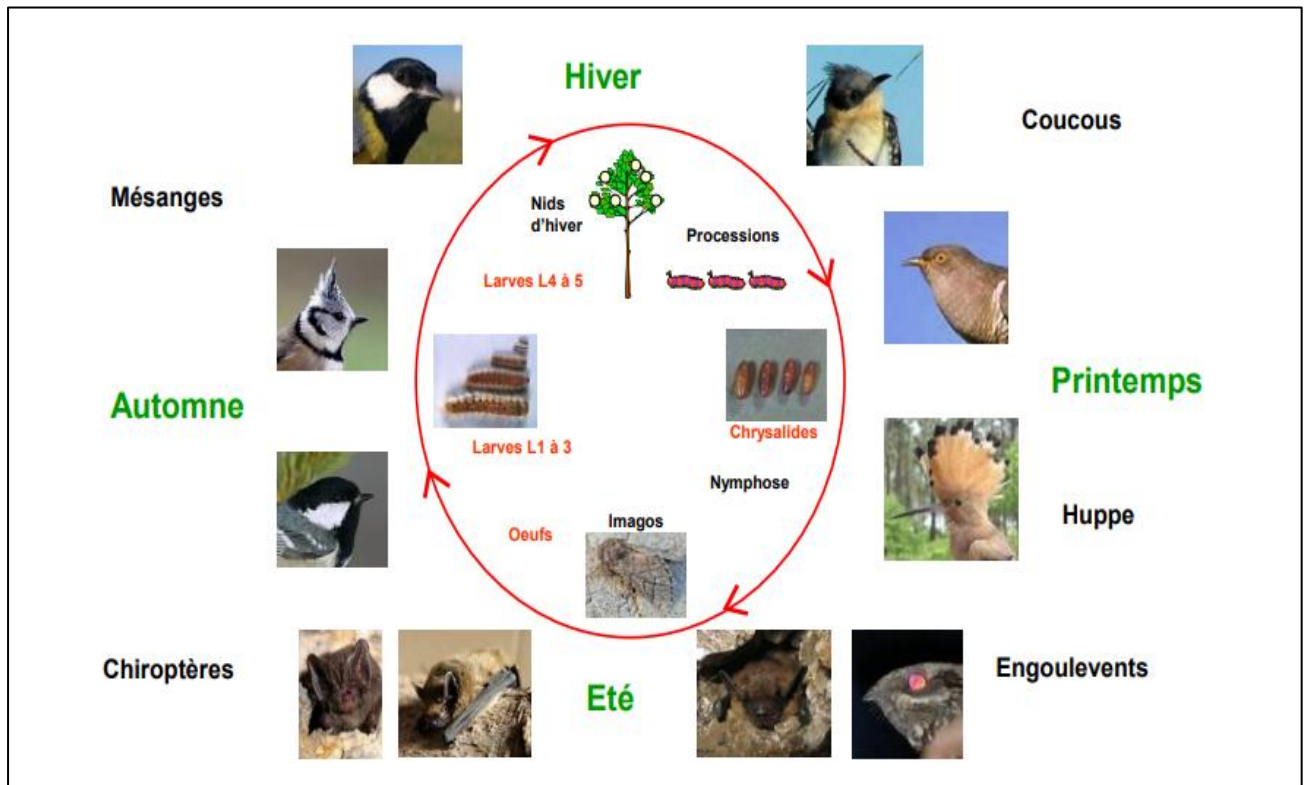
(Originale)

Figure 17. *Calosoma sycophanta* prédateur des larves (Turquie)

4.1.2.1. La prédation avienne et des Chiroptères

La prédation avienne a un effet maximum sur les stades larvaires et nymphaux tardifs, les chenilles de la processionnaire échappent à la prédation avienne mais il existe des stratégies d'évitement des poils urticants chez les oiseaux européens. Empêcher l'ingestion

des poils (stratégie des coucous, structure du gésier), Déterrer les cocons et les frotter au sol (stratégie des huppés, structure du bec), consommer des imagos (stratégie des engoulevents, chasse en vol nocturne), consommer les œufs, L1 et L2 ou extraire le tube digestif pour les stades urticants (stratégie des mésanges, méthode et période de capture) ou par inhibition par le froid (Barbaro, 2008). La figure 18 regroupe la diversité des oiseaux prédateurs de la processionnaire.



Barbaro (2008)

Figure 18. Diversité des oiseaux prédateurs au cours du cycle de développement de la processionnaire

4.1.2.2. La prédation par les mésanges

Les mésanges sont des oiseaux sédentaires qui se nourrissent d'insectes, dont la processionnaire du pin (Fig. 19). L'utilisation de cette interaction comme moyen de lutte se fait en facilitant l'implantation des mésanges par des nichoirs (Martin, 2012). La mésange bleue *Parus caeruleus* est un excellent prédateur des chenilles processionnaires dont elle consomme un grand nombre car n'étant pas sensible aux poils urticants (Barbaro et Battisti, 2011).

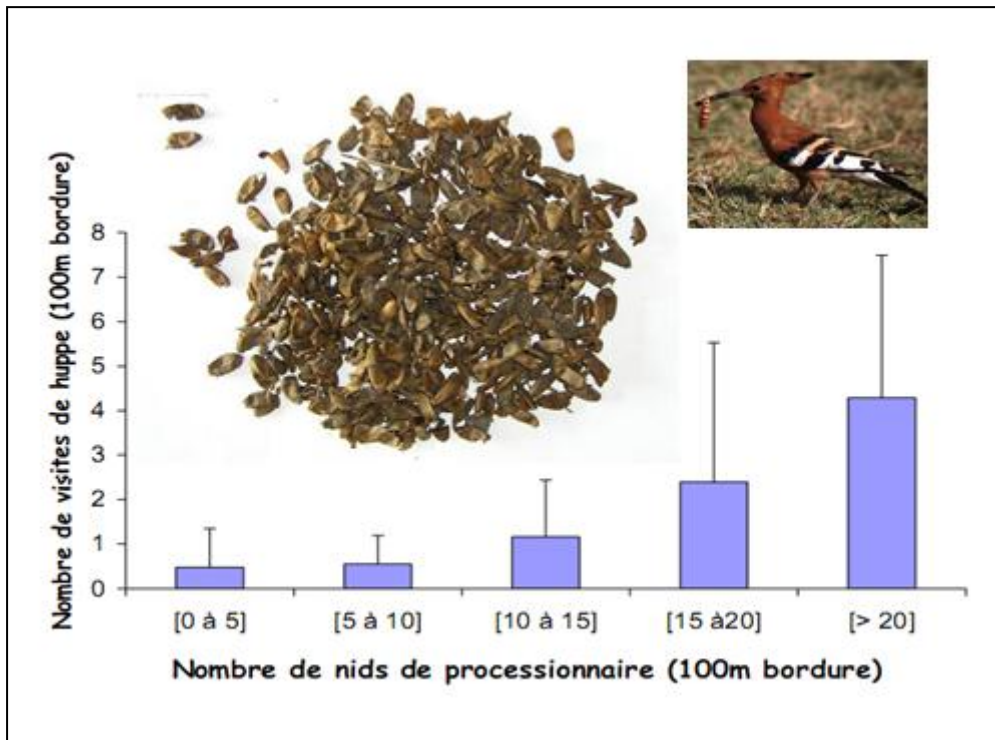


Martin (2012)

Figure 19. Mésange prélevant du nid les chenilles de la processionnaire du pin pour son alimentation

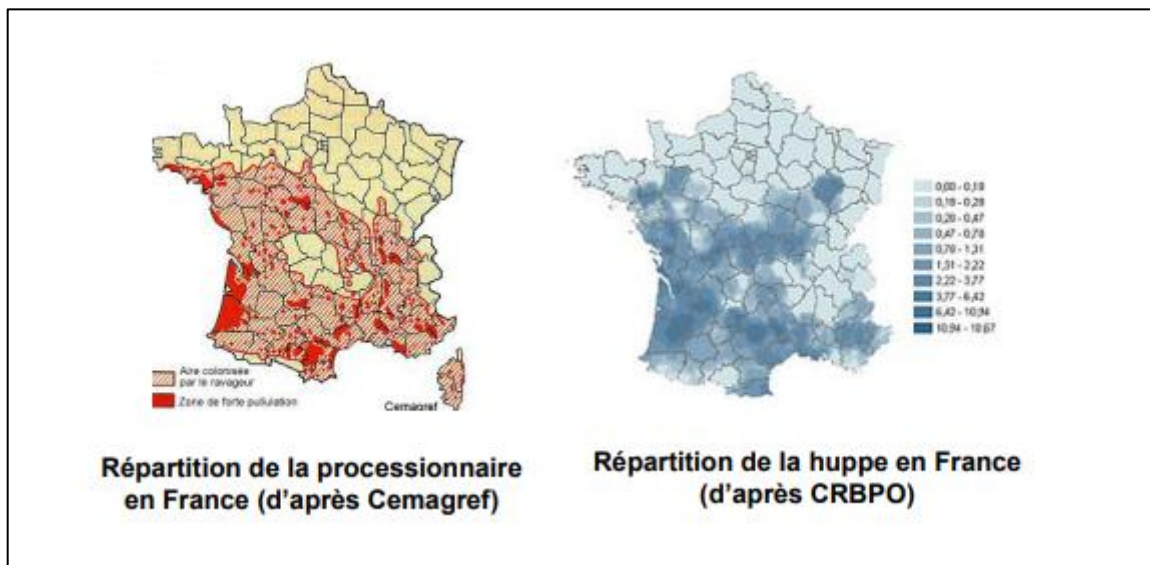
4.1.2.3. La prédation par les huppes

La Huppe fasciée se nourrit de vers et d'insectes qu'elle capture sur le sol ou à faible profondeur. Insectivore de taille moyenne, elle est spécialiste des insectes Orthoptères, Lépidoptères et Coléoptères. Les adultes sont prédateurs de la processionnaire aux stades L5 pendant les processions puis ils nourrissent leurs jeunes avec les chrysalides pendant la diapause (Arlettaz *et al.*, 2000). Selon Battisti *et al.* (2000), 74% des chrysalides de la processionnaire du pin sont prédatées par la huppe. L'intensité de prédation par la huppe augmente et le succès reproducteur baisse avec la densité de nids de processionnaires (Fig. 20) (Barbaro, 2008). L'étude de l'aire de répartition de la huppe en France conduite par Barbaro *et al.* (2008) a mis en évidence une coïncidence spatiale des aires de distribution de la processionnaire du pin et de la huppe (Fig. 21).



Jactel (2009)

Figure 20. L'intensité de prédation de la huppe



Barbaro *et al.* (2008)

Figure 21. Répartition spatiale de la processionnaire du pin et la huppe en France

4.1.3. Microorganismes

L'idée d'utiliser les microorganismes pathogènes des insectes dans la lutte contre les ravageurs des cultures est déjà ancienne, puisqu'elle a été émise simultanément en 1874 par L. PASTEUR en France (Grison *et al.*, 1959). Plusieurs champignons peuvent infecter les chenilles de la processionnaire du pin au cours de son développement, notamment *Beauveria bassiana* (Géri, 1980), l'espèce de champignon *Cordiceps militaris* s'attaque exclusivement aux chrysalides tandis que l'espèce *B. bassiana* s'attaque qu'aux chenilles. La pathogénicité des souches des champignons, appartenant aux genres *Paecilomyces*, *Tolyocladium*, *Beauveria*, *Metarhizium*, *Lecanicillium* a été étudiée par Er *et al.* (2007) qui montre que les niveaux de mortalité larvaires dus au pathogènes varient, de 16% à 100%. Des bactéries notamment *Bacillus thuringiensis* et des virus *Smithiavirus pityocampae* peuvent également infecter la processionnaire au stade larvaire, la bactérie *B. thuringiensis* est l'agent responsable des pathologies souvent observées sur les chenilles. Elle a été utilisée comme moyen de lutte pendant plus de 30 ans (Martin et Bonneaux, 2006).

4.1.3.1. Cas de *Bacillus thuringiensis*

Bacillus thuringiensis (B.t.) est une bactérie sporulée à Gram positif en forme de bâtonnet de la famille des Bacillaceae (Fritze, 2004). Elle est présente à l'état naturel partout dans les sols. Isolée pour la première fois au début du XXe siècle à partir de vers à soie infectés au Japon. Son nom provient de sa description en 1911 par Berliner en Thuringe (Allemagne), chez l'insecte *Anagasta kuehniella* (Lépidoptère), quand la spore est prête et mûre, il s'y développe un cristal de protéine toxique qui devient une source d'infection pour les Lépidoptères (Martin et Bonneaux, 2006). De plus, les spores sont capables de coloniser l'hémolymphe et germer induisant ainsi une septicémie pouvant être responsable de la mort de l'insecte dans les 24-72 heures qui suivent l'intoxication (Fig. 24) (Raymond *et al.*, 2010).

4.1.3.2. L'utilisation du *Bacillus thuringiensis* contre la processionnaire

La lutte contre les chenilles processionnaires (et contre toute larve de Lépidoptères en général) est constituée de spécialités à base de *Bacillus thuringiensis* (Martin et Mazet, 2001). Les préparations à base de Btk sont utilisées depuis une quarantaine d'années et

sont acceptées pour les traitements de terrains par les organisations internationales (Who, 1999).

Les traitements aériens contre la processionnaire ont mis en évidence une mortalité conséquente des chenilles des premiers stades. Le taux d'efficacité global obtenu pour toute la surface traitée a atteint 93% (Zamoum, 2006). Une baisse d'efficacité peut être observée si les conditions climatiques sont défavorables, ou à la persistance du Btk sur les feuilles (Martin, 2005). La figure 22 illustre un traitement avec le Bt par hélicoptère contre la processionnaire. L'utilisation répétée de ce produit sur de grandes échelles reste très discutable.



(Originale)

Figure 22. Traitement aérien avec le Bt contre *Thaumetopoea pityocampa* dans les reboisements du barrage vert.

DEUXIEME CHAPITRE
STRATÉGIE D'OCCUPATION DES
POPULATIONS DE LA PROCESSIONNAIRE
EN RELATION AVEC LES CHANGEMENTS
CLIMATIQUES

DEUXIEME CHAPITRE

STRATÉGIE D'OCCUPATION DES POPULATIONS DE LA PROCESSIONNAIRE EN RELATION AVEC LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

1. Particularités biotique et abiotique du cycle de la processionnaire du pin

L'aire de répartition de nombreuses espèces animales et végétales se déplace actuellement vers les pôles continuellement en relation avec le réchauffement climatique. Ce chapitre vise à comprendre l'action du réchauffement climatique sur la phénologie et l'expansion de la processionnaire. L'étude de la biologie et de l'écologie de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* permet de considérer les zones et les périodes de risque (Riviere, 2011). De nombreux facteurs entre autres, la structure de la plante hôte et les facteurs abiotiques notamment l'ensoleillement et la température peuvent influencer le développement et la distribution de la processionnaire dans son aire de répartition.

1.1. Stratégie du choix des plantes hôtes

La processionnaire du pin s'attaque à toutes les espèces de pins et de cèdres présents dans son aire de distribution (Montoya, 1995). Préférentiellement, elle s'alimente du pin noir d'Autriche, du pin sylvestre, du pin d'Alep (Tiberi *et al.*, 1999 ; Stastny *et al.*, 2006, Paiva *et al.*, 2011) (Tableau 5). La sélectivité de l'hôte est liée au critère relationnel entre l'oviposition de la femelle de la processionnaire, ainsi la morphologie et le diamètre des aiguilles choisies (Démolin, 1969 b), Au cours de l'oviposition, la femelle peut différencier entre les diverses espèces d'arbres ; les supports rugueux sont les plus prisés car ils offrent la possibilité d'une attache optimale des griffes des pattes de la femelle. La processionnaire attaque de plus en plus couramment des pins d'altitude autochtones, comme le pin à crochet ou le pin mugo, jusqu'ici épargnés en conditions naturelles. C'est également le cas pour des plantations de montagne d'essences exotiques. La processionnaire est d'ailleurs également capable de s'attaquer à un grand nombre de Pinacées exotiques utilisées en plantations de production ou à titre ornemental (Rousselet, 2010). En ce qui concerne le niveau d'attaque, il existe aussi une forte interaction avec le climat, certains hôtes se rencontrent essentiellement dans des régions plutôt sub-optimales du point de vue du développement de l'insecte (Huchon et Demolin, 1970).

Tableau 5. Ordre de préférence d'attaque de *Thaumetopoea pityocampa* sur les espèces du genre *Pinus*

Reference	Pine host species	Host origin	Order of preference by processionary moth	Country Region	Experimental conditions	Moth stage and parameters assessed	Observations
Tiberi <i>et al.</i> (1999)	<i>P. radiata</i>	I	1	Italy : Toscane and Latium	Pine plantations, 600 a.s.l.	Eggs. Mean nr. of egg batches/ tree	Unequal sample size: 2 to 24 trees/ host sp. used; no statistical treatments performed.
	<i>P. pinaster</i>	N	2				
	<i>P. pinea</i>	N	2				
	<i>P. nigra</i>	N	4				
	<i>P. sylvestris</i>	N	5				
Petraakis <i>et al.</i> (2005)	<i>P. longaeva</i>	I	1	Greece	Laboratory arena feeding trials. Twigs with current year needles.	Larvae: instars L3 and L4. Nr. of days until onset of feeding; % of food remaining after each trial ended.	Needles used in the choice and feeding trails, treated with extracts of other species.
	<i>P. pumila</i>	I	1				
	<i>P. halepensis</i>	N	2				
	<i>P. heldreichii</i>	N	2				
	<i>P. attenuata</i>	I	3				
	<i>P. brutia</i>	N	3				
	<i>P. peuce</i>	N	3				
	<i>P. pinaster</i>	N	3				
	<i>P. canariensis</i>	N	4				
	<i>P. mugo</i>	N	4				
	<i>P. nigra</i>	N	4				
	<i>P. pinea</i>	N	4				
	<i>P. radiata</i>	I	4				
<i>P. densiflora</i>	N	5					
Stastny <i>et al.</i> (2006)	<i>P. nigra</i>	N	1	Italy Rovereto and Venosta	Field: 240-1200 asl	Larvae. Mean nr. of tents/tree	
	<i>P. mugo</i>	N	2				
	<i>P. sylvestris</i>	N	3				
	<i>P. nigra</i>	N	1		Laboratory	Adults. Female oviposition preference	
	<i>P. mugo</i>	N	2				
	<i>P. sylvestris</i>	N	3				
	<i>P. mugo</i>	N	No differences between species		Laboratory	Larvae: L1 and L3. Larval performance	
<i>P. nigra</i>	N						
<i>P. sylvestris</i>	N						

Niccoli <i>et al.</i> (2008)	<i>P. nigra</i>	N	1	Central Italy	Field: 2 years old trees, 0.8 -1.5 m height. (generally under minimum size for pine processionary moth attack)	Eggs: mean nr. of egg batches/ tree	Adults introduced in the stands before emergence. Trees treated with monoterpenes. Host species natural bouquets not analyzed.
	<i>P. pinea</i>	N	1				
	<i>P. pinaster</i>	N	3				
	<i>P. radiata</i>	I	4				
Paiva <i>et al.</i> (2011a)	<i>P. brutia</i>	N	1	Portugal: Setúbal Peninsula	Insectary and Field: <i>P. pinea</i> 15 years old plantation	Adults. Female oviposition preferences. Mean nr. of egg batches/ tree	Insectary: artificial "trees". Field: <i>P. pinea</i> plantation / <i>P. pinea</i> trees emitting <i>P. brutia</i> volatiles
	<i>P. halepensis</i>	N	3				
	<i>P. pinaster</i>	N	2				
	<i>P. pinea</i>	N	3				
Carillo-Gavilan (2012)	<i>P. pinaster</i>	N	1	Spain	Insectary and laboratory	Foliar damage: 3 classes. Pine seedlings (1 year old) used in bioassays.	Mostly non-significant differences; in nature pine processionary larvae do not usually feed on pine seedlings.
	<i>P. coulteri</i>	I	2				
	<i>P. radiata</i>	I	2				
	<i>P. roxburghii</i>	I	2				
	<i>P. sylvestris</i>	N	2				
	<i>P. canariensis</i>	N	3				

Paiva *et al.* (2015)

Des investigations ont également montré que le choix et la sélection de la plante hôte dépend de la disponibilité des substances volatiles émanant des tissus des aiguilles, comme le limonène (Tableau 6) (Tiberi *et al.*, 1999). De plus, des facteurs physico-chimiques, comme le taux de nitrogène qui peut influencer le développement de ravageur (Hodar *et al.*, 2002).

Tableau 6. Semio-chimiques du pin lié à la sélection de l'hôte par les femelles de la processionnaire du pin, *T. pityocampa*

Reference	Substances	Pine processionary response (0; +; -) or presence of substances in host species (V)	Experimental conditions Country
Nicoli et al. (2008)	(R)-(+)-limonene	(0)	Field: <i>P. nigra</i> , <i>P. pinea</i> , <i>P. radiata</i> , <i>P. pinaster</i> , 2-3 years old, 0.8-1.5 m height
	(S)(-)-limonene	(0)	Central Italy
	(1S)-(-)- β -pinene	(-)	
Tiberi et al. (1999)	(R)-(+)-limonene	(- -)	Field: <i>P. pinaster</i> , <i>P. nigra</i> , <i>P. sylvestris</i> , <i>P. radiata</i>
	(S)(-)-limonene	(-)	sprayed with semiochemicals Italy
Mateus (2009)	β -pinene	(+)	Arboretum: <i>P. eldarica</i> , <i>P. elliotii</i> , <i>P. kesiya</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. pinea</i> , <i>P. pinaster</i> , <i>P. radiata</i> , <i>P. taeda</i>
	terpinolene,	?	Portugal
	(-)-limonene and (+)-limonene plus	(-)	
	β -phellandrene		
	myrcene	?	
	sabinene	?	
Paiva et al. (2011a)	cis-ocimene	(V) preferred sp	Insectary: dummy trees baited with extracts of <i>P. brutia</i> , <i>P. pinaster</i> , <i>P. pinea</i> , <i>P. halepensis</i>
	bornyl acetate isomer 1	(V) preferred sp.	
	β -copaene 1	(V) preferred sp	Field: <i>P. pinea</i>
	α -cubebene	(V) 1st and 2nd preferred spp.	Portugal
	α -bourbonene	(V) 1st and 2nd preferred spp.	

Substances déclenchant des réactions comportementales : attraction (+) ; répulsion (? - -) ; (0) aucun effet.

Substances présentes uniquement dans les espèces de pins préférées (V)

Paiva et al. (2015)

1.2. Impact des facteurs abiotiques sur la phénologie de la processionnaire

1.2.1. Ensoleillement et photopériode

La processionnaire du pin est présente que dans les régions où la durée moyenne d'insolation annuelle est supérieure à 1800 heures (Huchon et Démolin, 1970), la durée moyenne d'insolation annuelle nécessaire au développement des chenilles processionnaires, c'est la raison pour laquelle leur expansion se limite et ne dépasse pas le nord de la France. Androic (1957) montre que la moyenne journalière d'ensoleillement joue un rôle important dans la définition de la limite nord de la répartition. La zone sous l'influence méditerranéenne est la plus favorable à l'extension de la processionnaire car elle est suffisamment ensoleillée pour compenser les froids hivernaux (1900 à 2800) heures de soleil par an, et 2,3 à 3,0 KWh/m²/J d'irradiation solaire quotidienne en Octobre) (Bouhot, 2005), en effet, les chenilles processionnaires s'alimentent la nuit, lorsque les températures sont basses, et se regroupent dans la journée dans le nid pour digérer (Rivière, 2011).

1.2.2. Température

Les insectes sont des poïkilothermes, et la température est donc un des facteurs déterminants de la dynamique de leur population et joue un rôle déterminant dans plusieurs phases de leur cycle biologique (Marçais, 1999). Il existe cependant des seuils critiques de température à ne pas dépasser, le seuil critique inférieur, température basse à laquelle les chenilles meurent, est de -7°C pour un individu isolé, mais il est diminué à -16°C lorsque les chenilles sont regroupées, grâce à l'effet bénéfique du rassemblement des individus (Hoch *et al.*, 2009). En effet, une température excédant les 32°C peut causer la mort d'une partie de la population. L'optimum de développement de la processionnaire du pin se situe entre 20 et 25°C. La température joue un rôle important sur les dates de l'éclosion des larves (Démolin, 1969a), lorsque la température moyenne mensuelle dépasse 25°C, les individus se regroupent en masse afin de ralentir la montée thermique de chaque individu ; l'émergence des adultes s'effectue alors plus tardivement, pour assurer à leur descendance un optimum thermique vital, à l'inverse, plus l'été sera doux et plus les adultes pourront émerger précocement. L'alimentation des chenilles dépend également de la température ; une température supérieure à 9°C dans le nid durant le jour et une température de l'air supérieure à 0°C la nuit suivante constituent deux conditions idéales pour stimuler les larves à chercher de la nourriture (Battisti *et al.*, 2005). Si l'une de ces conditions n'est pas respectée, le taux de survie des chenilles diminue significativement (Buffo *et al.*, 2007).

Le tableau 7 illustre l'état de la population de la processionnaire en fonction de la température.

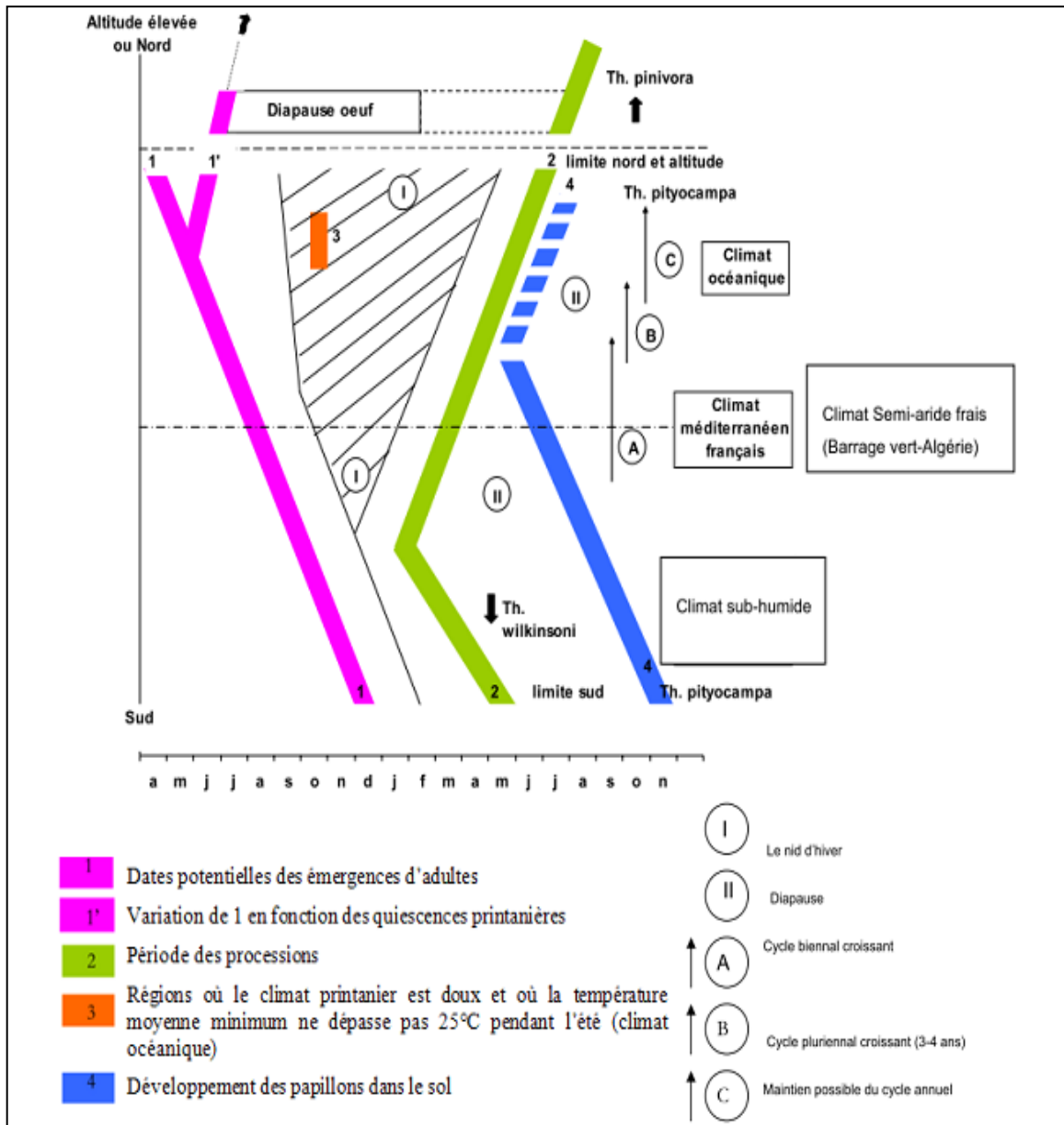
Tableau 7. Etat populationnel de la processionnaire du pin *T. pityocampa* en fonction de la variation de température.

Température maximale pendant une journée ou plusieurs jours	Manifestation immédiate sur le comportement	Manifestation à moyen terme (marge thermique)	Indice physiologique
>32°C	Seuil léthal supérieur.		
+32°C	Eclatement de la colonie.		Déséquilibre physiologique
+25°C	Regroupement en masse.		Evolution Mise en place des réserves
+20°C		Tissage du nid Recherche du soleil	Sécrétion de soie Plus d'évolution
0	Regroupement de la colonie		
7°C	Seuil léthal (Individus isolés)		
-10°C	Seuil léthal (Colonie normale)		

Demolin (1969a)

1.2.3. Altitude et latitude

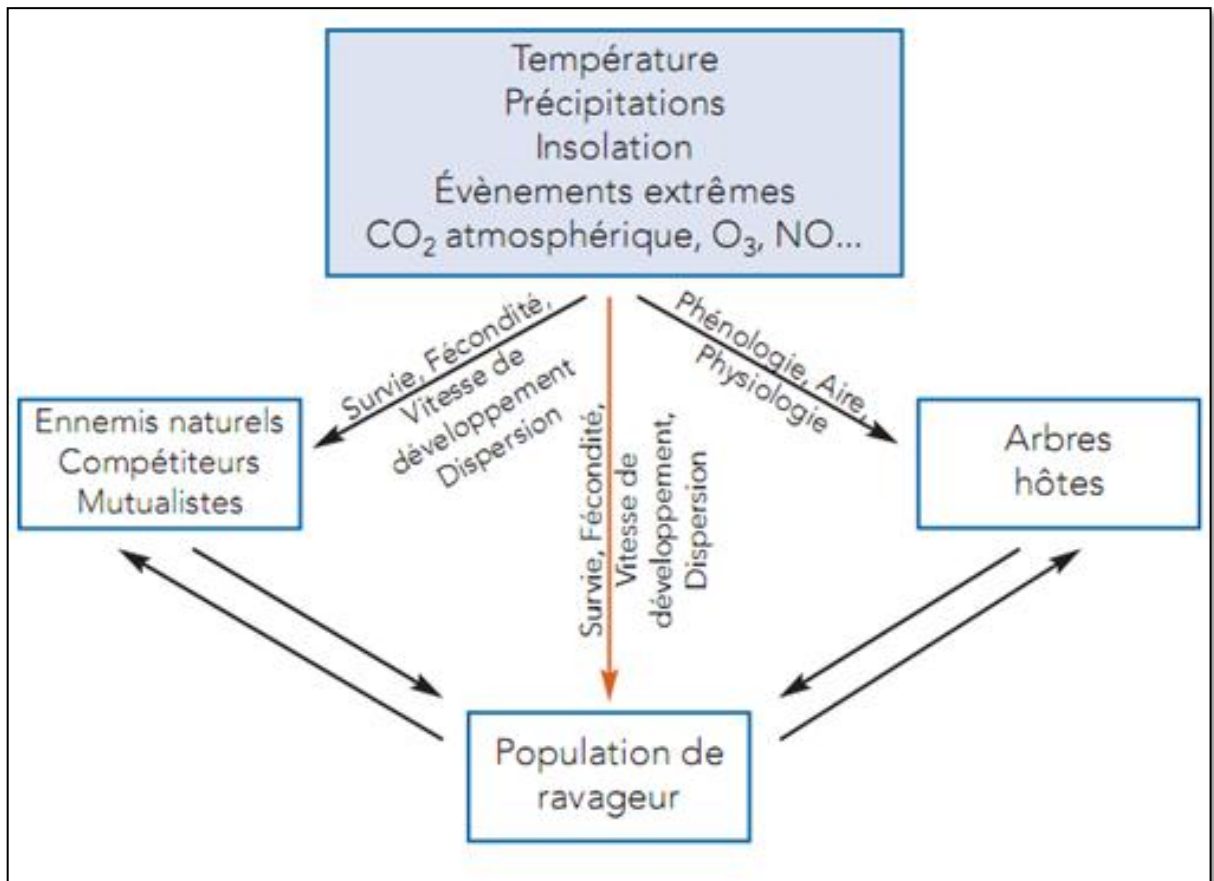
En fonction de l'altitude et latitude, la processionnaire du pin manifeste des ajustements temporels de sa phénologie grâce à un arrêt de développement au stade nymphal de type diapause (Zamoum, 1998). Demolin a élaboré en 1969 un abaque synthétique représentant la date de déclenchement et la durée des différentes phases du cycle en fonction de la latitude ou de l'altitude (Fig. 23). De plus, de récentes études ont révélé que la fécondité de la chenille processionnaire du pin augmente avec la latitude (Pimentel *et al.*, 2010).



Demolin (1969a)

Figure 23. Abaque montrant les disparités géographiques du cycle de la processionnaire du pin

Le diagramme relatif à la relation entre les facteurs biotiques et abiotiques et les populations de la processionnaire est synthétisé dans la figure 24.



Robinet *et al.* (2007)

Figure 24. Schéma des interrelations des insectes phytophages avec leurs hôtes et leurs antagonistes

2. Monographie et biogéographie

2.1. Expansion spatio-temporelle de la processionnaire

Divers pays connaissent périodiquement des attaques de la chenille processionnaire ; Asie: Chypre, Liban, Syrie, Turquie ; Afrique: Algérie, Libye, Maroc, Tunisie. ; Europe: Albanie, Autriche, Bulgarie, Croatie, Espagne (Iles Baléares y compris sauf Ibiza), France (Corse y compris), Grèce (Crète y compris), Hongrie, Italie (Sardaigne et Sicile y compris), Portugal, Suisse (Genève, Tessin, Valais), Yougoslavie (Grojean *et al.*, 2006). Elle fait partie d'un complexe d'espèces sur l'ensemble du bassin méditerranéen jusqu'en façade atlantique (Frérot et Demolin, 1993). Les populations de la processionnaire du pin montrent des fluctuations très importantes liées aux conditions climatiques, où certaines populations subissent une phase de rétrogradation avec une grande hétérogénéité selon les

régions. L'aire de répartition de la processionnaire est en parfaite synchronisation avec l'évolution du climat (Rousselet, 2011) (Fig. 25).



Robinet *et al.* (2012)

Figure 25. Limite Nord de l'aire de répartition de la processionnaire du pin

Depuis quelques années, cette espèce fait l'objet de nombreuses recherches, elle est devenue un modèle biologique en entomologie dans les départements EFPA de l'INRA de France (centres d'Orléans, Avignon, Bordeaux-Pierroton, prochainement Montpellier). Elle est considérée comme un bon indicateur de changement climatique. Depuis l'année 1990, elle accroît chaque année son étendue d'environ 5,5 km/an en direction de la région Nord (Robinet *et al.*, 2012). Ce modèle a aussi permis d'évaluer de manière indirecte la capacité de vol des papillons.

2.2. Impact de réchauffement climatique sur l'extension des populations de la processionnaire du pin

Le climat mondial connaît actuellement des changements. Les hausses de température et du niveau de dioxyde de carbone ainsi que les modifications des précipitations et des fréquences et de la sévérité des catastrophes naturelles figurent parmi les différents changements qui ont lieu (Peinturier, 2014). La température de surface mondiale a

augmenté de 0,74 degrés Celsius (°C) durant le siècle dernier. En effet, L'aire de la chenille processionnaire du pin s'est étendue de manière significative en termes latitudinal et altitudinal en Europe (Moore et Allard, 2008).

L'aire de répartition de la chenille processionnaire du pin s'étend de l'Europe centrale et méridionale jusqu'en Afrique du nord et au Proche-Orient et présente dans l'ensemble des forêts de pin et de cèdre du bassin méditerranéen. En France, elle a atteint la limite nord de son aire d'extension (Grojean *et al.*, 2005). L'évolution réelle de l'aire de répartition entre 1969 et 1996 a été étudiée par Demolin *et al.* (1996), qui montrent une progression de l'insecte vers le nord de la France. Cette progression est due au réchauffement climatique global observé depuis le début des années 70 en Europe du Nord. Cette hypothèse est confirmée par Goussard *et al.* (1999), Hódar *et al.* (2003), et Rousselet *et al.* (2009) qui constatent une progression en altitude de l'espèce. Une extension latitudinale et altitudinale de *T. pityocampa* est notée dans le bassin parisien de France de 87 km au nord entre 1972 et 2006 (Corine, 2010). En l'Italie nordique (Alpes), un décalage altitudinal ascendant de 110 à 230 mètres s'est produit au cours de la période de 1975 et 2004 (Battisti *et al.*, 2005).

L'hétérogénéité du milieu et la densité de pin influent par ailleurs largement sur la vitesse à laquelle se déroule cette progression. Il apparaît en effet que les zones de forte densité en pins sont moins attaquées que les zones de faible densité, ce qui suggère que la propagation se fait en contournant les grands massifs forestiers. Une montée de la processionnaire du pin en altitude est également observée en Espagne (Montoya, 1995), cette hypothèse est confirmée par (Goussard *et al.*, 1999), et par (Hódar *et al.*, 2003), qui constatent une progression en altitude de l'insecte en Espagne, celui-ci menace dorénavant les forêts naturelles.

En Algérie, vraisemblablement l'extension de la processionnaire du pin a été facilitée par les projets de plantations de pin de pin d'Alep le long de l'Atlas Saharien (Zamoum, 1998). L'auteur précité note qu'en plus la perturbation du cortège parasitaire par l'application du *Bacillus thuringiensis* sur des milliers d'hectares chaque année a favorisé cette extension. La figure 26, représente la répartition de la processionnaire du pin en Algérie en synchronisation avec ses plantes hôtes.

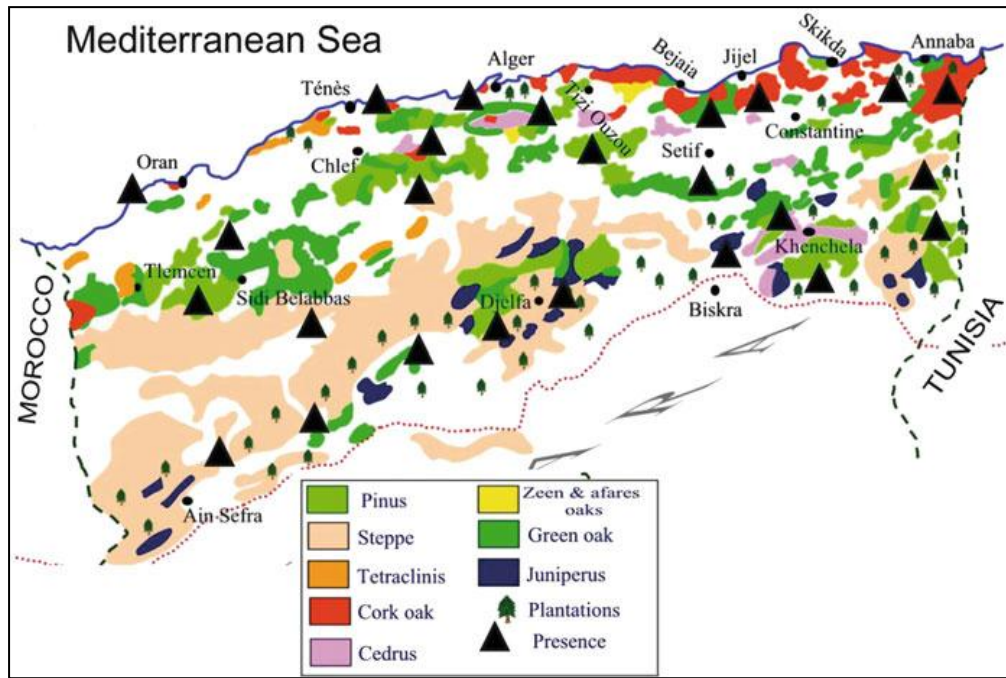
El Mokhefi *et al.* (2015)

Figure 26. Répartition de la processionnaire du pin en Algérie

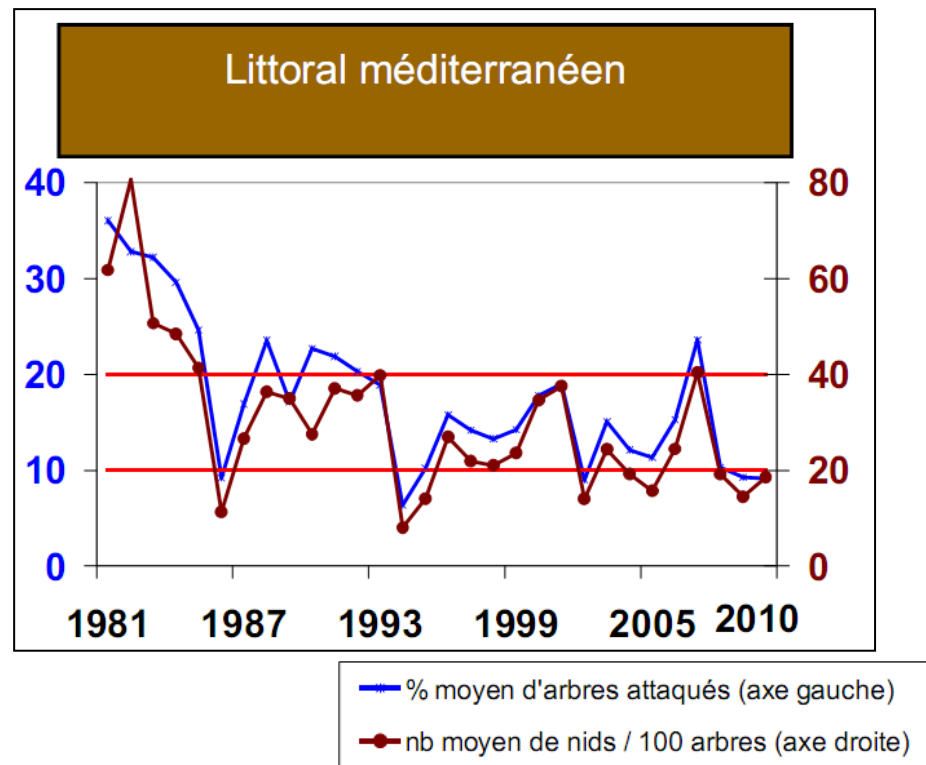
3. Évolutions des parasitoïdes en relation avec leurs hôtes

L'expansion des espèces peut ne pas être rapidement suivie de celle de leurs ennemis naturels comme dans le cas de la processionnaire du pin et dans certains cas, la synchronisation entre l'hôte et l'ennemi naturel ou le parasitoïde, peut disparaître dans les nouvelles conditions de température (Battisti *et al.*, 2006). Plus on monte en altitude, la température diminue, ceci provoque une modification de la période de ponte et donc sur l'action des parasitoïdes embryonnaires. Une émergence trop prématurée pourrait réduire la probabilité de présence des œufs (Imbert, 2012). De même l'auteur précité note qu'en absence des pontes de la processionnaire du pin, une désynchronisation notée pourrait provoquer une chute des populations de parasitoïde spécialiste, *Baryscapus servadeii*. Ainsi il note que si la capacité de vol des parasitoïdes est plus faible, ils seront incapables de suivre la vitesse d'expansion de leur hôte et donc on note, dans les zones les plus récemment colonisées, un taux de parasitisme dû aux parasitoïdes spécialistes plus faibles que dans la zone d'origine résultant d'une population plus réduite. L'aire de répartition du parasitoïde spécialiste est intimement liée à celle de son hôte. En ce qui concerne le parasitoïde généraliste, sa capacité à avoir de multiples hôtes a pu permettre sa survie dans des refuges différents de la processionnaire du pin. Sa répartition ne semble alors pas liée

à celle de la processionnaire du pin. Les ennemis naturels sont moins présents aux limites de l'aire de répartition de leur hôte (Colautti *et al.*, 2004).

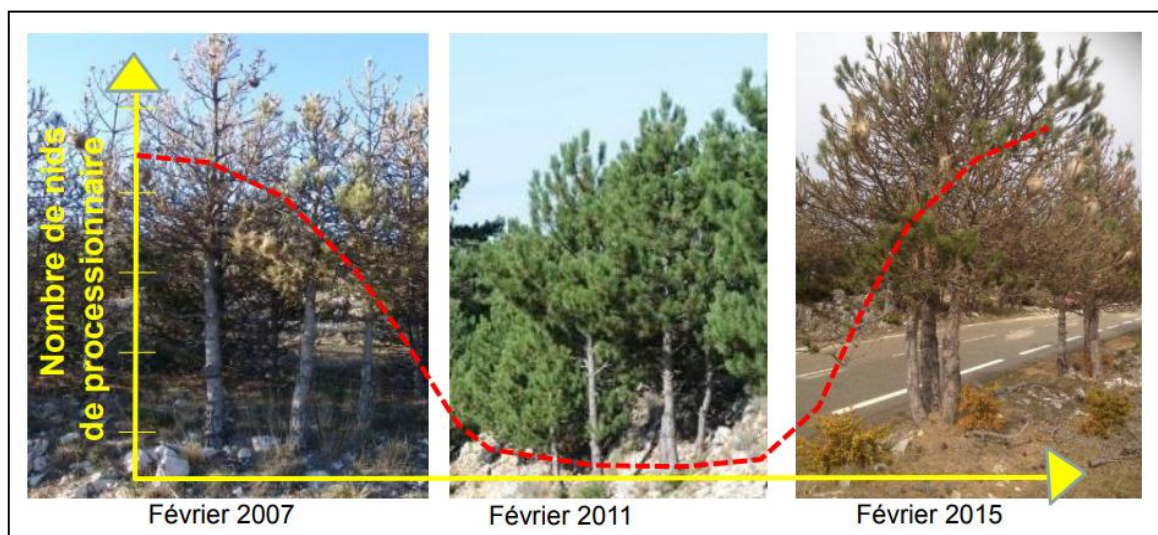
4. Dynamique des populations de la processionnaire du pin

En France, dans les peuplements forestiers la dynamique des populations de processionnaire du pin fait l'objet d'un suivi régulier depuis 1981 (Fig.27). Ce suivi est essentiellement réalisé par un réseau permanent de 500 placettes de 2500 m² de surface. Dans chacune sont notés annuellement les nombres de pins attaqués par la présence de nids hivernaux de protection des chenilles (Pauly, 2010). Les niveaux de population de la processionnaire du pin passent par des pics de culmination qui durent 1 à 3 ans, au cours desquels les chenilles sont très nombreuses et provoquent des dégâts significatifs et étendus sur une grande aire géographique. Les gradations sont séparées par des périodes de durées variables, de cinq à huit ans, pendant lesquelles l'insecte passe une phase de latence (Fig. 28). Les dommages restent très limités. Ces fluctuations sont régulières et dépendantes de nombreux facteurs capables d'influer sur la dynamique des populations de l'insecte ; les variations des températures, le cortège d'ennemis naturels, la qualité et la quantité de nourriture et fécondité des femelles (Pauly, 2006). Le tableau 8 regroupe les différentes phases des infestations de la processionnaire du pin au cours du temps.



Pauly (2010)

Figure 27. Évolution, du pourcentage moyen d'arbres attequés et du nombre moyen de nids pour 100 arbres définis sur l'aire de répartition de la chenille processionnaire du pin, de 1981 à 2010.



Martin (2018)

Figure 28. Dynamique cyclique de la processionnaire du pin au Mont Ventoux entre 2007-2015

Tableau 8. Phases d'un cycle de gradation de *Thaumetopoea pityocampa*

Phase de « pro-gradation »	Augmentation des niveaux de populations de chenilles Processionnaires	Période de 1 à 3 ans au cours de laquelle les dégâts occasionnés par les chenilles sont importants et étendus géographiquement
Phase de « culmination »	Pullulation des chenilles à un niveau élevé	
Phase de « rétrogradation »	Diminution des niveaux de populations de chenilles processionnaires	Période de 5 à 8 ans au cours de laquelle les dégâts sont relativement limités
Phase de « latence »	Absence de chenilles ou présence à un faible niveau	

Bouhot-Delduc (2005)

5. Stratégie d'attaque de la processionnaire du pin

5.1. Conséquences environnementales

La processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* est un des principaux ravageurs des forêts de pins et cèdres du Bassin Méditerranéenne (Cadahia *et al.*, 1975). Lors de ses pullulations, il provoque des défoliations importantes sur les pins. Depuis, 1989, une nouvelle phase de culmination de la gradation de ce défoliateur est notée dans le Sud-Est de la France (Mirault et Regad, 1992). En Algérie, les attaques sont temporaires avec des défoliations significatives dans les reboisements particulièrement du Barrage vert (DGF, 2005). Les chenilles d'une même ponte forment une colonie qui se déplace durant la nuit et s'alimente des aiguilles des arbres (Bailly, 1980), une colonie détruit 1,5 à 2 Kg (en poids sec) d'aiguilles, il suffit à 4 ou 5 colonies pour dénuder entièrement un arbre de pin de 20 ans (Fraval, 2007). Les dégâts sont très conséquents au cours des années de sécheresse (Fabre, 1911). Les dégâts se traduisent par des pertes de croissance, liées au niveau des populations de l'année précédente surtout, mais de l'année en cours et des années antérieures (Bouhot-Delduc et Levy, 1994). En fortes pullulations les chenilles de la processionnaire s'attaquent même aux sujets âgés (Riou-Nivert, 2005) en provoquant un retard de croissance annuel en diamètre et en hauteur pour les jeunes plantations (Kanat *et al.*, 2005). En cas de défoliation totale les pertes de croissance peuvent être estimées de 25 à 30% (Bouchon et Toth, 1971). Sur plusieurs années, des attaques répétées peuvent engendrer des pertes de l'ordre de 80% (Laurent- Hervouët, 1986). Les pertes en

productions apparaissent sous forme de diminution de diamètre de l'ordre Bouchon et Toth (1971) estiment une perte de volume de 20 à 45% du pin noir (*Pinus nigra* Arn. Var. *austriaca*), de 21% en diamètre du *Pinus brutia* en Turquie (Durkaya *et al*, 2009). Les attaques périodiques, provoquent une répercussion sur la structure du peuplement (Dajoz, 1980). En Algérie, les défoliations de la processionnaire du pin concernent toutes les pinèdes et les cédraies. Bien que les périodes de culmination soient rares, il se trouve que cet insecte provoque des dégâts souvent considérables dans les forêts naturelles et très sévères dans les plantations reboisées (Zamoum, 1998). Les attaques massives sont apparues après les grands efforts de reboisement dans le cadre du projet du barrage vert. La monoculture exclusive du pin d'Alep a favorisé une multiplication des populations, qui par ses défoliations répétées mettaient en péril les reboisements qui évoluent déjà dans les conditions difficiles des zones semi-arides (Kadik, 1983). Les contraintes édapho-climatique rajoutées à ces perturbations du cycle de gradation de *T. pityocampa* rendent ces peuplements moins résistants aux insectes ravageurs secondaires et aux micro-organismes pathogènes tels que les champignons, qui peuvent être mis en cause dans les phénomènes de dépérissements qui sont très souvent observés dans les pineraies et cédraies des régions semis arides (Zamoum, 1998).

5.2. Impact anthropozoïque

La processionnaire du pin est très connue pour ses poils urticants qui peuvent entraîner chez l'homme et les animaux de sérieux problèmes d'allergies (Morel, 2008). Elle est considérée comme un agent pollueur de l'environnement par ces propriétés. Les poils sont libérés dans l'air dès que les chenilles se sentent en danger (Bovet, 2006). En France l'utilisation de capteurs contrôlant la pollution atmosphérique a permis de déceler la présence de poils urticants dans des sites assez éloignés de leur sources d'émissions ce qui signifie que ces poils sont susceptibles d'être entraînés par les vents (Werno et Lamy, 1990). Ces poils présentent déjà dès le premier stade larvaire de la processionnaire, la glande pluricellulaire qui se trouve sur le dos des chenilles (Grojean *et al.*, 2006), commence à sécréter une protéine, thaumétopoéine, qui est à l'origine de ces problèmes à partir du troisième stade (Dajoz, 2007). Au cinquième stade, cette glande se transforme en miroir urticant (Fraval, 2007), provoquent des phénomènes inflammatoires sur la peau et les muqueuses (Harriet, 2001) et des allergies. Des troubles chez l'homme, les animaux domestiques et les oiseaux sont aussi notés chaque année (Lamy, 1990). Des lésions cutanées et oculaires et, plus rarement, des signes respiratoires et des réactions

anaphylactiques sont les résultats dus à la présence des poils dans l'atmosphère (Moneo, 2007). Les contaminations surviennent, en général, dans ou à proximité des forêts selon deux manières ; soit par contact direct avec les chenilles ou les nids, soit indirect avec le sol ou les poils en suspension dans l'air (Grojean *et al.*, 2006). Le risque sanitaire augmente lors de la procession de nymphose au printemps (Leblond, 2009).

5.3. Les symptômes liés aux processionnaires

Les symptômes observés lors de contact par les poils urticants, sont développés dans la plupart des cas lors d'un premier contact (Grojean, 2006).

5.3.1. Contact avec la peau

Au cours des premières heures après le contact on observe l'apparition d'une éruption douloureuse avec de sévères démangeaisons et de plaques rouges avec des démangeaisons sévères ou des sensations de brûlure (Vega *et al.*, 2004) (Fig.29). La réaction se fait sur les parties découvertes de la peau et entre autres les poignets, les avant-bras, les mains, le visage et le cou (Gottschling, 2007).



(Originale)

Figure 29. Allergie du la processionnaire du pin au niveau du cou

5.3.2. Contact avec les yeux

Après contact oculaire des poils urticants, on observe après 1 à 4 heures, le développement d'une conjonctivite (Charmot, 1987) (yeux rouges, douloureux et larmoyants) (Fig.30). Quand un poil urticant s'enfonce profondément dans les tissus oculaires, apparaissent des réactions inflammatoires sévères et provoquent des troubles et lésions oculaires (Sengupta *et al*, 2010).



(Originale)

Figure 30. Allergie au niveau des yeux

5.3.3. Contact par inhalation

Les poils urticants irritent les voies respiratoires. Cette irritation se manifeste par des éternuements, des maux de gorge, des difficultés à déglutir et éventuellement des difficultés respiratoires dues à un bronchospasme (rétrécissement des bronches comme dans l'asthme) (Werno *et al*, 2002).

5.3.4. Contact par ingestion

Il se produit une inflammation des muqueuses de la bouche et des intestins qui s'accompagne des symptômes tels que de l'hyper salivation, des vomissements et des douleurs abdominales (Inal *et al*, 2006).

Sur la base des données de (Werno *et al*, 2002)., (Vega *et al*, 2004) Monoe (2007) les symptômes causés par la processionnaire sont résumés dans le tableau 9.

Tableau 9. Symptômes sanitaires observées lors d'exposition aux poils

	Symptômes
Peau	<ul style="list-style-type: none">• La réaction se fait sur les parties découvertes de la peau mais aussi sur d'autres parties du corps.• Les poils urticants se dispersent aisément par la sueur, le grattage et le frottement ou par l'intermédiaire des vêtements.• Apparition d'une éruption douloureuse avec de sévères démangeaisons dans les huit heures.
Yeux	<ul style="list-style-type: none">• Développement après 1 à 4 heures d'une conjonctivite (yeux rouges, douloureux et larmoyants).• Quand un poil urticant s'enfonce profondément dans les tissus oculaires, apparaissent des réactions inflammatoires sévères avec, dans de rares cas, évolution vers la cécité.
Voies respiratoires	<ul style="list-style-type: none">• Les poils urticants irritent les voies respiratoires. Cette irritation se manifeste par des éternuements, des maux de gorge, des difficultés à déglutir et éventuellement des difficultés respiratoires dues à un bronchospasme (rétrécissement des bronches comme dans l'asthme).
Système digestif	<ul style="list-style-type: none">• Il se produit une inflammation des muqueuses de la bouche et des intestins qui s'accompagne de symptômes tels que de l'hypersalivation, des vomissements et des douleurs abdominales

6. l'impact de la processionnaire du pin sur les peuplements de pins

Les facteurs climatiques et à un moindre degré les facteurs édaphiques déterminent la vie des espèces et leur évolution. L'extension du pin d'Alep dans les zones subsahariennes est limitée au sud et au nord non seulement par les facteurs climatiques très défavorables (influences steppiques et sahariennes) mais aussi par un sol peu épais (à faible réserve hydrique) caractérisé par l'existence à faible profondeur d'un encroûtement le plus souvent imperméable et fréquemment formant obstacle à la pénétration du système racinaire (Kadik, 1987). Afin de lutter contre la désertification, vers les années 70, fut lancé en Algérie le programme du barrage vert qui consiste en une bande boisée de 1200 kilomètres de long sur 20 kilomètres de large. Le reboisement en essences forestières est constitué

essentiellement de pin d'Alep qui occupe la plus grande place avec 106.000 hectares, soit 86 % du total, suivi par l'amélioration pastorale avec près de 13.000 ha, soit 12% et, enfin, par la plantation fruitière (2.300 ha) et la fixation des dunes (1.900 ha), soit environ 0,5 % pour chaque type. La monoculture du pin d'Alep a entraîné une prolifération de la chenille processionnaire qui a détruit une grande partie des reboisements. Les arbres qui arrivent à survivre restent chétifs, leur croissance est ralentie et ils sont exposés à d'autres ravageurs secondaires. Le Pin d'Alep qui s'étend du littoral aux montagnes de l'Atlas Saharien présente une formation végétale menacée par l'absence d'une bonne gestion sylvicole. L'exploitation des forêts élargissent souvent l'accès aux zones forestières et exposent celles-ci à un risque accru d'incendies répétés. Les forêts de pin d'Alep représentent, à elles seules, 1/3 de l'ensemble des surfaces brûlées dans la région méditerranéenne. Après des incendies répétés, les arbres sont remplacés par un couvert arbustif ligneux qui n'est pas simplement résistant au feu, mais qui est typiquement pyrophytique, comme dans le cas de la déhiscence des Cistes (*Cistus spp.*) ou d'autres espèces qui produisent des graines isolées par un tégument épais, des rhizomes ou des racines traçantes (Dimitrakopoulos et Mitsopoulos, 2006). La fragilité de ce milieu facilite l'implantation de la processionnaire dans les peuplements des pins.

TROISIEME CHAPITRE
MATÉRIELS ET MÉTHODES

TROISIEME CHAPITRE

MATÉRIELS ET MÉTHODES

1. Situation géographique des stations prospectées

La région de Djelfa se situe dans la partie centrale de l'Algérie du Nord au-delà des piémonts sud de l'Atlas tellien, localisée à 300 kilomètres au Sud de la capitale Alger, elle couvre une superficie de 32.256,35 km², et comprise entre 2°01' et 5°08' de longitude Est et entre 32°85' et 35°83' de latitude Nord. Elle est limitée au Nord par les wilayas de Médéa et de Tissemsilt, à l'Est par M'sila et Biskra, à l'Ouest par Tiaret et au Sud par Ouargla, El Oued, Ghardaïa et Laghouat (Fig. 31) (D.P.A.T, 2007).

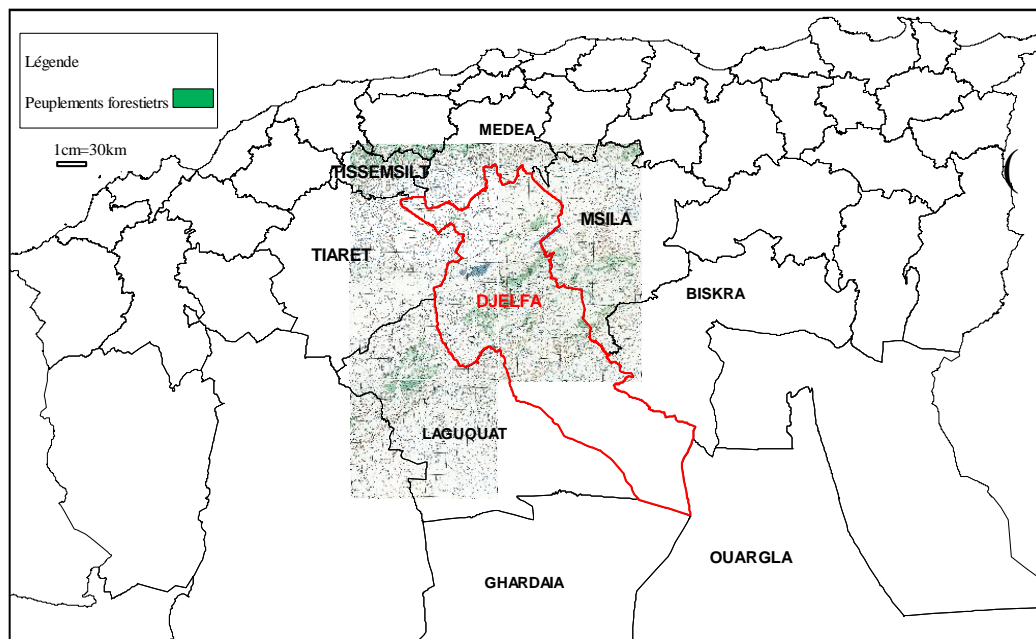
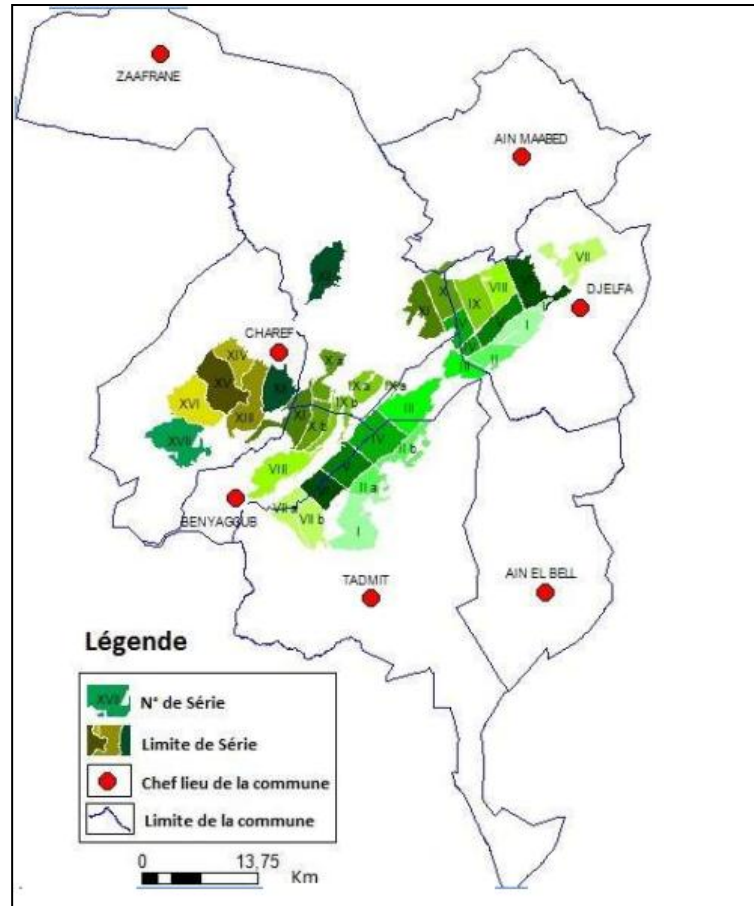


Figure 31. Présentation des zones limitrophes des massifs forestiers de la région de Djelfa.

2. Présentation du milieu forestier de la région d'étude

Malgré l'hétérogénéité du milieu et les conditions climatiques rigoureuses, la région de Djelfa présente une biomasse végétale considérable. Les massifs forestiers de la région prospectée représentent 6 % des forêts du territoire national. Ces massifs, dénommés

Monts des Ouled-Nail, font partie des chaînes montagneuses de l'Atlas saharien. Les forêts naturelles sont constituées par 08 massifs forestiers bien distincts avec une superficie totale de l'ordre de 223.750 ha (C.D.F.D., 2007) (Fig.32).



Benhanifia (2015)

Figure 32. Carte de découpage en séries de Senalba Chergui et Gharbi selon le plan d'aménagement de 1984

2.1. Les forêts naturelles

La région de Djelfa possède une association des massifs forestiers distribués sur une grande partie de son territoire régional. Ces milieux forestiers représentent les derniers massifs arborescents à la limite du Sahara et constituent une armature protectrice des sols contre la progression des influences désertiques vers les hauts plateaux. Les principaux massifs sont le Senalba Chergui et Gharbi (62.000 ha), le Djellal Chergui et Gharbi (7.000 ha), Sahary Guebli et Dahri (36.150 ha) et celui d'El Guedid (3.000 ha) (D.G.F., 2004). Les peuplements de Sahary Guebli sont localisés à l'est de la commune de Djelfa, représentant

une forêt naturelle de l'Atlas saharien qui constitue l'un des derniers rideaux biologiques séparant le milieu aride de la zone semi arides, elle s'inscrit dans un écosystème fragile et sensible au phénomène de dégradation et de la désertification. La série de forêts montagneuses situées au sud-ouest de la ville de Djelfa représente les forêts naturelles de Senalba Gharbi et Chergui. Ces massifs sont classés parmi les forêts naturelles les plus importantes au niveau de la région et constituent la partie orientale du massif. La forêt naturelle de pin d'Alep *Pinus halepensis* comme espèce principale couvre une superficie totale de 108.000 ha. Cette espèce est associée souvent au chêne vert (*Quercus ilex*) sur 57.000 ha et au Genévrier de phénicie (*Juniperus phoenicea*) sur 74.000 ha. Le tableau 10 regroupe les aires de distribution des forêts naturelles de la région de Djelfa C.D.F.D (2007).

Tableau 10. Superficies des forêts naturelles de la région de Djelfa

Sites	Superficies
La forêt domaniale de Senalba Gharbi	42.339 ha
La forêt domaniale de Senalba Chergui	19.833 ha
La forêt domaniale de Sahary Guebli	31.800 ha
Massif de Sahary Dahri	29.151 ha
Les forêts domaniales des Djellals	7.374 ha
Les forêts de Chaouch (Communales)	3.846 ha
Les forêts de Boudeir Takouka (Domaniale non soumis)	3.407 ha
Massif de Bouk'hil (Domanial non soumis)	15.000 ha
Total des forêts naturelles	152.750 ha
Projets de reboisement	71.000 ha
Total du patrimoine forestier de la région	223.750 ha

C.D.F.D (2007)

2.2. Les reboisements

La région de Djelfa a bénéficié de vastes programmes de reboisements en pin d'Alep dans le cadre du programme du « Barrage Vert » qui est lancé depuis 1971. Ce projet concerne les zones semi-arides allant des frontières marocaines jusqu'aux frontières tunisiennes sur 1.500 km de longueur à 20 km de largeur. L'un des objectifs de ce programme est de permettre la reconstitution du complexe climatique afin de limiter le phénomène de désertification (Sahraoui, 1995). Parmi les programmes inscrits, 13000 hectares et de 10000 hectares se localisent respectivement à Moudjebara et à Taadmit (D.G.F, 2004). A partir de 1980, des faibles superficies ont été associées avec d'autres essences que *P. halepensis*, particulièrement le Cyprés de l'Arizona (*Cupressus arizonica*), Le févier

d'Amérique (*Gleditsia triacanthos*), l'Olivier de Bohême (*Elaeagnus angustifolia*) et le Pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica*) (Zamoum, 1998). Le reboisement de Moudjbarra, retenu parmi les stations de la présente étude est caractérisé par un relief plat légèrement vallonné et localisé sur un sol assez pauvre et fragile. Ce peuplement reboisé présente un taux de régression conséquent. Ce reboisement se trouve à cinq kilomètres au Sud-Est de la ville de Djelfa aux piémonts des Ouled Nail (Djellal Chergui), à une altitude variante entre 1200 et 1400m. Les zones limitrophes sont limitées au Nord par la ville de Djelfa, au Sud par la forêt dégradée de Djellal chergui, à l'Ouest par la route nationale N1 et à l'Est la commune de Moudjbara et une importante nappe alfatière (DGF, 2010). La hauteur des arbres varie entre 1,70 mètre en relief à 5,30 mètres en dépression. Une priorité absolue a été accordée aux programmes de reboisement sur tout le territoire régional de la zone de Djelfa. Aussi, en matière de reboisement, sur la base des données du service forestier le bilan physique des plantations pour la période 1962 à 2014 fait ressortir la réalisation de 59629 hectares au total.

2.3. Les Sols

Les sols sont peu évolués et de très faible en profondeur. Kadik (1983) note que les sols de cette région sont de type calimagnésique à encroutement calcaire et représentés par des rendzines et des sols bruns calcaires. La présence d'accumulations calcaires sous une forme diffuse, modulaire ou même massive empêche la prolifération des systèmes racinaires. Le pH est généralement basique ($> 7,5$), la structure est instable avec une texture à tendance limoneuse. Ces caractéristiques rendent les sols particulièrement vulnérables à l'érosion hydrique et éolienne. Des études ont été effectuées sur l'analyse du sol montrent que l'humidité du sol peut rentrer dans le choix des larves pour la possession post hivernal (Salmens, 2018). Kadik (1983) note que la région d'étude est caractérisée par quatre types des sols ; sols squelettiques peu évolués de très faible profondeur et sont soumis à une érosion continue, sols avec une accumulation calcaires et gypseuses sols salés peuvent être différenciés en deux catégories ; sols excessivement salés qui occupent le centre des dépressions des et les sols modérément salés : qui sont situés à la périphérie des sebkhas et portant une végétation steppique spécifique utilisée comme pâturage.

2.4. Caractéristiques climatiques de la région d'étude

Les paramètres climatiques figurent parmi les facteurs écologiques qui influencent sur l'environnement et sur la dynamique de populations des insectes. Le climat de la région de

Djelfa est de type méditerranéen contrasté avec une longue saison estivale sèche et chaude et une saison hivernale pluvieuse et froide.

2.4.1. Températures

Les régimes thermiques sont relativement homogènes et traduisent un climat de type continental.

A ce sujet, Huchon et Démolin (1970) notent que le facteur thermique est fondamental dans la régulation du développement des insectes ravageurs et de leurs ennemis naturels. Chararas (1982) précise que la température exerce son influence de façon constante sur les stades d'évolution de l'insecte. Les moyennes mensuelles des températures enregistrées dans la région de Djelfa pendant l'hiver varient de 5 à 6,2°C. La saison estivale est caractérisée par des moyennes comprises entre 22,9 °C et 26,5°C. La figure 33 illustre les données des variations des moyennes mensuelles des températures calculées. Les données climatologiques utilisées sont recueillies auprès de la station météorologique de l'O.N.M de Djelfa.

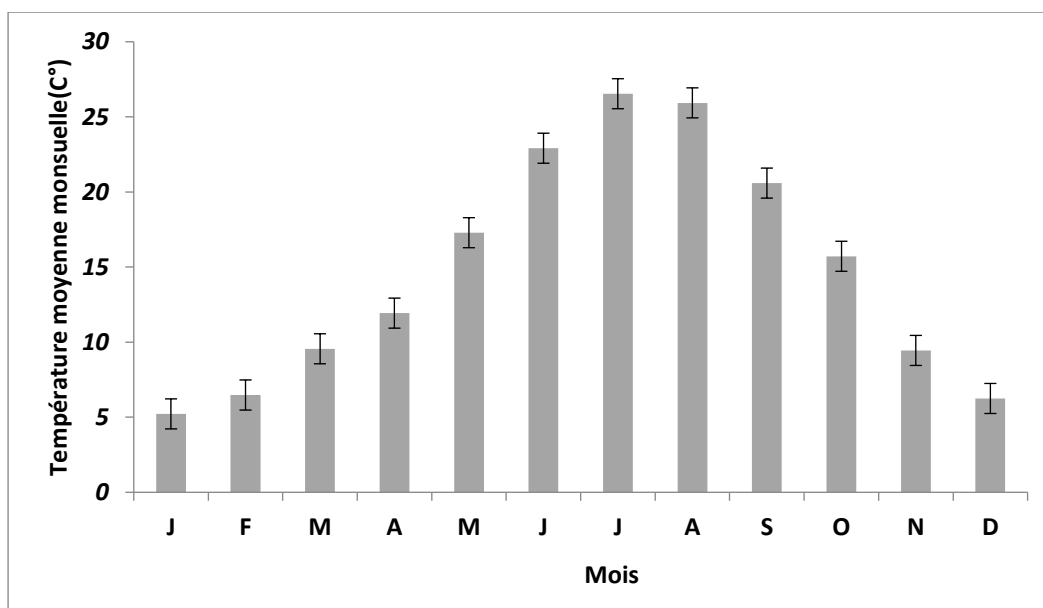


Figure 33. Variations mensuelles des températures moyennes (1995 à 2011) de la région de Djelfa

Une forte amplitude thermique entre l'hiver et l'été et même entre le jour et le nuit est enregistrée très souvent dans toute la région de Djelfa. En été, cette région est favorisée

par l'effet de l'altitude et ne connaît pas les chaleurs torrides du Sahara. L'hiver est très rude et la température de l'air descend souvent en dessous de zéro degré (Chakali, 2006).

2.4.2. La pluviométrie

La pluviométrie est un paramètre fondamental permettant la disponibilité et la qualité du facteur trophique. En effet, l'alimentation a une incidence sur la dynamique et l'éthologie de *Thaumatococcus panyolus* (Démolin, 1971).

La région de Djelfa se caractérise par une pluviométrie à rythme irrégulier annuel et interannuel, relativement peu abondante, concentrée durant la période froide de l'année faisant ainsi une saison froide et humide et saison sèche et chaude en été. Les précipitations sont faibles et variables d'une année à l'autre au point de vue quantité et répartition.

Les valeurs des Précipitations moyennes mensuelles enregistrées durant les années de 1995-2011 de la région d'étude sont illustrés par la figure 34. Le mois de septembre est le mois le plus pluvieux avec une moyenne de 34,65 mm/an, par contre le mois de juillet est le mois le plus sec avec une moyenne de 6,16 mm/an.

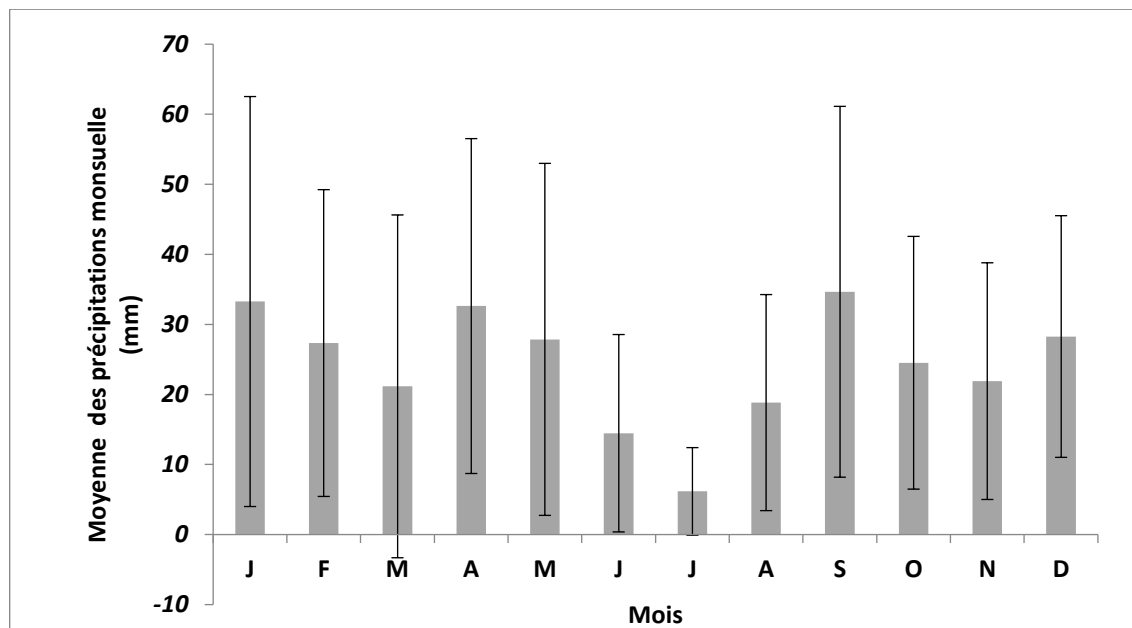


Figure 34. Variations des précipitations mensuelles de 1975 à 2011 dans la région de Djelfa.

L'analyse de la variation interannuelle des précipitations durant la période (1975-2011), montre que l'année 1991 est la plus pluvieuse totalisant une quantité de 479.5 mm, tandis

que l'année 2000 est considérée comme la plus sèche avec une quantité de 180,2 mm. (Fig.35).

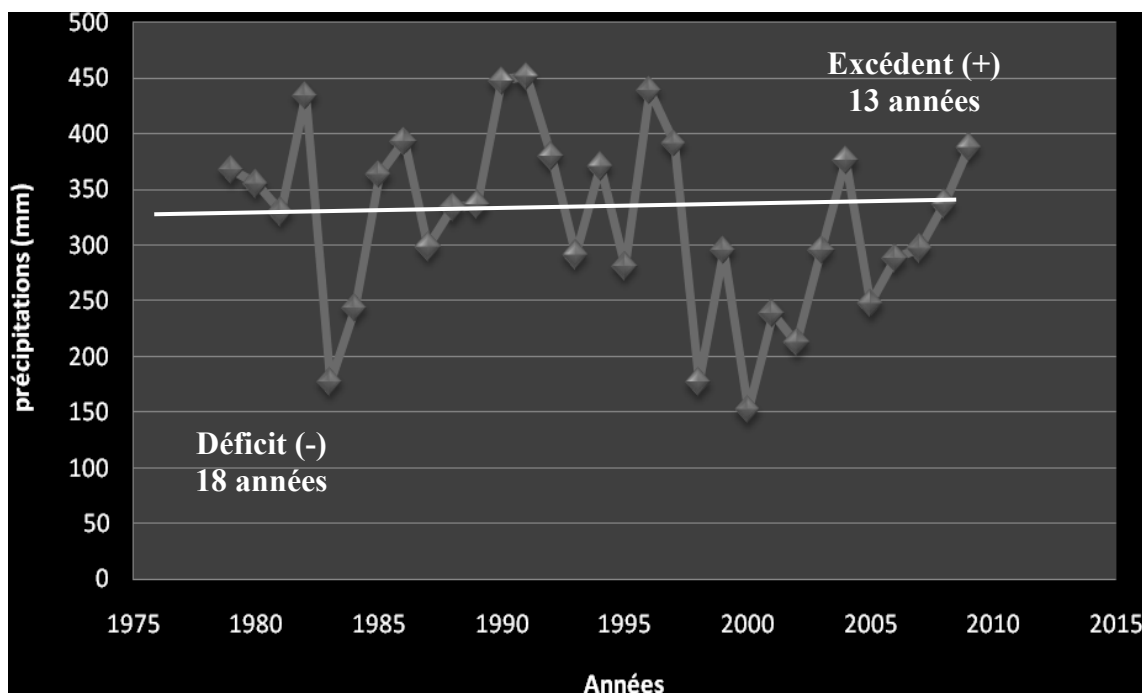


Figure 35. Fluctuation des précipitations annuelles durant la période (1982-2011)

Les données des précipitations de 30 ans nous ont fourni une moyenne de 350 mm. Sur la base de cette donnée, il ressort un déficit hydrique sur 18 ans pour un excédent de 13 années. Ceci se répercute vraisemblablement sur les peuplements des forêts de pins d'Alep.

2.5. La végétation

Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis*) qui est l'essence principale dans les milieux forestiers de la région prospectée se présente sous forme de peuplements naturels purs, ou en mélange avec d'autres essences secondaires de chêne vert (*Quercus ilex*), Genévrier de phoenicie *Juniperus phoenicea*, et le Genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*).

3. Choix des stations d'étude

Sur la base des prospections préalables conduites dans les peuplements des Pinacées qui subissent des attaques périodiques de la processionnaire du pin, six sites ont été retenus ; trois forêts naturelles ; la forêt de Senalba chergui, la forêt de Charef et la forêt de Sahary Guebli. Parallèlement trois reboisements l'un à Tokersane, le second dans la région reboisée de Moudjebara et le troisième à Bahrara.

4. Caractéristiques des stations

La synthèse des données des sites d'étude est regroupée dans le tableau 11 et la localisation des stations retenues est illustrée dans les figures 36 et 37.

Tableau 11. Caractéristiques des sites d'étude

Type de forêts	Stations	Etage bioclimatique	Altitudes (m)	Coordonnées		Superficies (Hectares)
				Longitudes Est	Latitudes Nord	
Plantations de pin d'Alep	Moudjebara (S1)	Semi-aride	1255	3°23'18.79''E	34°36'39.22''N	13.000
	Tokersane (S2)		1344	3°01'24.85''E	34°31'12.47''N	700
	Bahrara (S3)		1257	3°15'35.86''E	34°51'00.77''N	600
Pinèdes naturelles	Charef (S4)		1333	3°08'11.25''E	34°38'07.19''N	20.000
	Senalba chergui (S5)		1339	2°46'40.31''E	34°32'59.56''N	19.833
	Sahary Guebli (S6)		1291	3°23'30.96''E	34°55'56.85''N	29.151

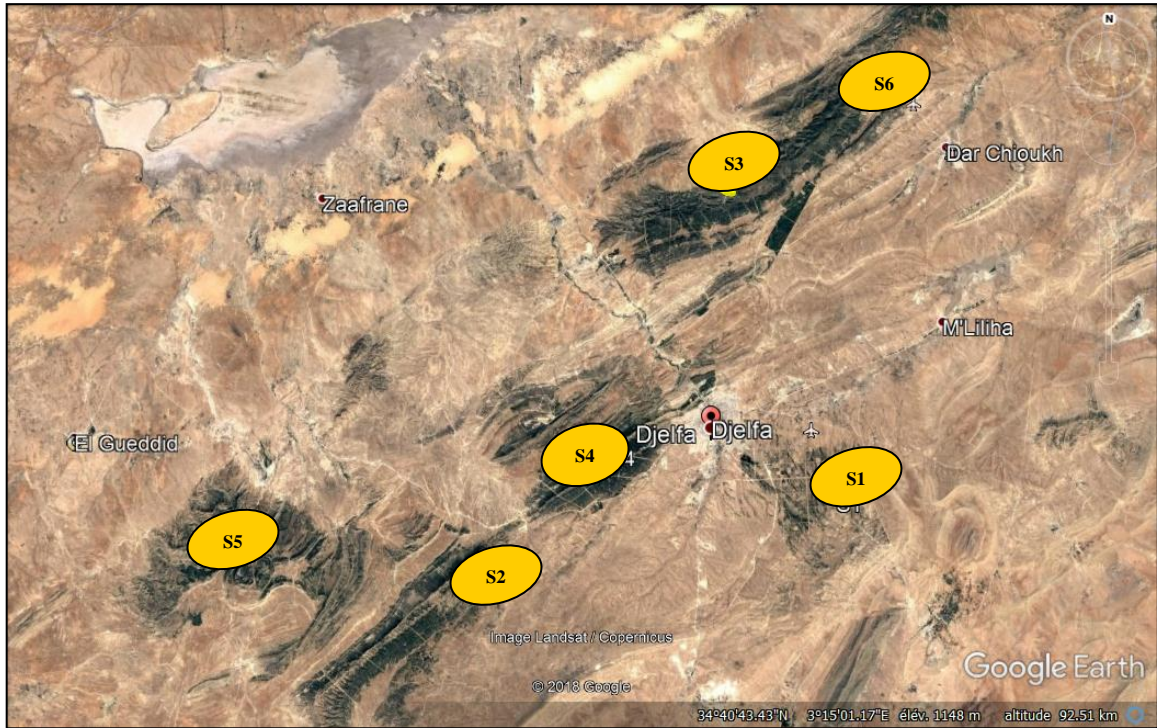


Figure 36. Localisation des stations d'études.



Figure 37. Vues générales des stations d'étude

5. Méthodologie adoptée

5.1. Dénombrement des pontes sur les aiguilles et les rameaux des jeunes plantations

Afin de tirer des informations sur la distribution des pontes sur les aiguilles et les jeunes rameaux dans les jeunes plantations reboisées accessibles, nous avons procédé à un comptage sur 100 arbres par site en ligne selon un plan systématique. La méthode adoptée est basée sur le comptage des pontes de chaque arbre suivant un transect linéaire et on a noté la position de ces pontes (Basal, médian et apical de l'arbre) en fonction de la hauteur de l'arbre. Ce protocole a été conduit au cours des années de 2014, de 2015 et de 2016 dans les six stations prospectées.

5.2. Récolte et préparation de matériel biologique

L'opération de récolte des pontes a été conduite en relation avec les premiers vols des papillons. La prospection a été effectuée aléatoirement dans les six stations prospectées pendant les mois d'août et de septembre des années 2012, 2014 et 2015. Au total, 242 pontes en 2012 (32 de S1, 106 de S2, 34 de S4, et 70 de S5). En 2014, 842 pontes ont été récoltées (217 de S1, 176 de S2, 60 de S3, 160 de S4, 169 de S5, et 62 de S6). Un effectif de 180 pontes a été récolté en 2015, 30 pontes par site. Le matériel biologique a été prélevé selon l'accessibilité et à hauteur d'homme à partir des arbres répartis sur l'ensemble des boisements. Parallèlement, 30 aiguilles témoins par station ont été échantillonnées sur une dizaine d'arbres. Les aiguilles portant des pontes sont conservées individuellement dans des tubes à essai de 10 cm de longueur et 1 cm de diamètre fermés avec coton pour assurer l'aération à la température ambiante de $26 \pm 3^\circ\text{C}$. Le contrôle des tubes se fait quotidiennement et les émergences des chenilles et des parasites sont notées parallèlement (Fig. 38).



Figure 38. Matériel biologique en observation au laboratoire

5.3. Biométrie des aiguilles, support des pontes

La position des pontes peut varier sur l'arbre de la partie basale à la partie apicale de la couronne. Des mesures des longueurs des aiguilles et des pontes ont été effectuées à l'aide d'un papier millimètre. Les trois parties des aiguilles (La partie basale de l'aiguille sans pontes ; La partie support du pontes ; La partie supérieure allant de l'extrémité de la pontes à la limite de l'aiguille « apical ») sont prises en considération. La longueur, le diamètre et le poids sec de chaque aiguille ont été notés. La longueur et le diamètre des aiguilles témoins ont été mesurés pour voir les corrélations possibles et pour rechercher éventuellement la stratégie du choix des pontes en relation avec le biotope.

5.4. Étude phyto-chimique des aiguilles du pin

Le pin d'Alep considéré dans cette étude est celui de l'espèce *Pinus halepensis*, qui appartient à la famille des Pinacées de la région semi-aride. Cette étude a été effectuée en utilisant uniquement les feuilles de l'arbre qui sont sous forme d'aiguilles d'une longueur variable jusqu'à 60 mm. Les aiguilles fraîches utilisées dans cette étude ont été récoltées de l'arbre directement. Deux catégories des aiguilles ont été choisies ; des aiguilles témoins sans pontes et des aiguilles support des pontes de la processionnaire pour tirer des informations sur le choix et la sélection des femelles pondueuses de la processionnaire du pin.

La synthèse de la méthode adoptée est tirée de travaux réalisés par Samseny (2003), Diallo (2005) et Rachel (2005).

5.4.1. Réactions de caractérisation des alcaloïdes

Les alcaloïdes forment un groupe important de substances naturelles d'intérêt thérapeutique par leur diversité structurale et l'éventail de leurs activités pharmacologiques. Ce sont des substances organiques azotées, à propriétés basiques et présentant une forte activité pharmacologique.

5.4.1.1. Solution à analyser

Nous avons introduit de la poudre végétale issue des aiguilles de pin d'Alep (10 g) dans un erlenmeyer de 250 ml à laquelle nous avons ajouté 50 ml de H₂SO₄ dilué au 1/10 (50 ml). Ce mélange a été agité et macéré pendant 24 heures à la température ambiante du laboratoire. Nous avons filtré sur papier lavé à l'eau distillée de manière à obtenir environ 50 ml de filtrat.

5.4.1.2. Caractérisation

Nous avons effectué une caractérisation par précipitation en nous servant d'un témoin qu'est la strychnine. Prendre 4 tubes à essai et introduire 1 ml de filtrat dans chacun des deux premiers et 1 ml de strychnine dans chacun des deux autres. Ajouter dans les tubes 1 et 3 ; 5 gouttes de réactif de Mayer, ensuite dans les tubes 2 et 4 ; 5 gouttes de réactif de Dragendorff.

Les résultats ont été classés comme suit :

Précipité abondant : + + +

Précipité moyen : + +

Précipité louche : +

5.4.2. Réactions des substances polyphénoliques

Les substances poly-phénoliques constituent un groupe très variable difficile à définir. La présence d'au moins un noyau benzénique auquel est directement lié un groupement hydroxyle est fondamentale pour la structure de ce groupe.

5.4.2.1. Solution à analyser

Nous avons introduit de la poudre sèche (5 g) dans de l'eau distillée bouillante (100 ml) contenue dans un erlenmeyer de 250 ml. Nous avons arrêté l'ébullition et fermé avec un verre de montre ; après infusion pendant 15 mn (infusé à 5%) ; nous avons filtré sur papier et rincé avec un peu d'eau chaude de manière à obtenir 100 ml de filtrat.

5.4.2.2. Caractérisations

-**Tanins** : Ce sont des esters du glucose ou de l'acide gallique. Les propriétés biologiques de ces tanins sont en relation avec leur pouvoir de former des complexes avec les macromolécules, en particulier les protéines. Nous avons introduit dans un tube à essai 5

ml d'infusé à 5% ; puis nous avons ajouté 1 ml d'une solution aqueuse diluée de FeCl₃ à 1%.

En présence de tanins il se développe une coloration verdâtre ou bleu noirâtre.

-Pour caractériser la présence de tanins catéchiques, nous avons ajouté 1 ml d'acide chlorhydrique concentré à 5 ml d'infusé à 5%, puis porté à l'ébullition pendant 15 mn ensuite filtré sur papier.

En présence de tanins catéchiques, il y a formation d'un précipité rouge soluble dans l'alcool amylique.

La différenciation des tanins (catéchiques et galliques) est obtenue par la réaction de Stiasny :

A 30 ml d'infusé à 5%, nous avons ajouté 15 ml de réactif de Stiasny (10 ml de formol à 40% plus 5 ml HCl concentré) et chauffé au bain-marie à 90°C pendant 15 mn. L'obtention d'un précipité montre la présence de tanins catéchiques. Filtrer et saturer le filtrat d'acétate de sodium pulvérisé. Ajouter 1 ml d'une solution de FeCl₃ à 1%. Le développement d'une teinte bleu noire indique la présence de tanins non précipités par le réactif de Stiasny : ce sont les tanins galliques.

-Flavonoïdes : Ce sont des pigments universels des végétaux responsables de la coloration des fruits, des fleurs et parfois des feuilles.

A 5 ml d'infusé présentant une coloration plus ou moins foncée ; ajouter 5 ml d'acide sulfurique puis 5 ml de NH₄OH.

Si la coloration s'accroît par acidification puis vire au bleu violacé en milieu basique, on peut conclure la présence d'anthocyane.

5.4.3. Réactions à la cyanidine

Introduire dans un tube à essai 5 ml d'infusé, ajouter 5 ml d'alcool chlorhydrique (alcool à 95°, eau distillée, HCl concentré à parties égales en volume) ; 1 ml d'alcool iso amylique puis quelques copeaux de magnésium. Il se produit une réaction de crépitation pendant quelques minutes.

L'apparition d'une coloration rose orangée (flavones) ou rose- violacée (flavanones) ou rouge (flavonones, flavanonols) rassemblée dans la couche surnageante d'alcool iso amylique indique la présence d'un flavonoïde libre (génine).

Les colorations sont moins intenses avec les hétérosides flavoniques.

La réaction est négative avec les chalcones, les dihydrochalcones, les auronnes, les catéchines et les isoflavones.

Effectuer la réaction à la cyanidine sans ajouter de copeaux de magnésium et chauffer pendant 15 mn au bain-marie.

En présence de leucoanthocyane, il se développe une coloration rouge cerise ou violacée ; les catéchols donnent une teinte brun-rouge.

5.4.4. Dérivés anthracéniques

Les dérivés anthracéniques appartiennent au groupe des quinones. Ils se caractérisent par leur pouvoir oxydant élevé.

5.4.4.1. Solution à analyser

Extraits chloroformiques : A 1 g de drogue en poudre, ajouter 10 ml de chloroforme et chauffer prudemment au bain-marie pendant 3 mn, filtrer à chaud et compléter à 10 ml si nécessaire.

-Hydrolysât : A une partie du résidu de la poudre épuisée par le chloroforme, ajouter 10 ml d'eau distillée et 1 ml d'acide chlorhydrique concentré. Maintenir le tube à essai dans le bain marie bouillant pendant 15 mn. Refroidir sous un courant d'eau et filtrer. Compléter à 10 ml avec l'eau distillée.

5.4.4.2. Caractérisation

-Dérivés anthracéniques libres

Introduire dans un tube à essai 1 ml d'extrait chloroformique, ajouter 1 ml de NH₄OH dilué puis agiter ; la coloration plus ou moins rouge indique la présence d'antraquinones libres.

Dérivés anthracéniques combinés

-O-Hétérosides

Prélever 5 ml d'hydrolysât et agiter avec 5 ml de chloroforme, soutirer la phase organique et l'introduire dans un tube à essai, ajouter 1 ml de NH₄OH dilué. Agiter, la présence d'antraquinones est révélée par la coloration rouge plus ou moins intense. Si la réaction est négative ou faiblement positive, rechercher les O-hétérosides à génine réduite.

Prélever 5 ml d'hydrolysât et ajouter 3 à 4 gouttes de FeCl₃ à 10 %, chauffer pendant 5 mn au bain-marie. Refroidir, agiter avec 5 ml de chloroforme. Soutirer la phase chloroformique et l'introduire dans un tube à essai, ajouter 1 ml de NH₄OH dilué et agiter. En présence de produits d'oxydation des anthranols ou anthrones, la coloration rouge est plus intense que précédemment.

-C-hétérosides

Reprendre la phase aqueuse qui a été conservée au cours de la caractérisation des O-hétérosides par 10 ml d'eau distillée et ajouter 1 ml de FeCl₃ à 10%. Maintenir le tube à

essai dans un bain-marie bouillant pendant 30 mn, refroidir et agiter avec 5 ml de chloroforme, soutirer la phase chloroformique dans un tube à essai.

Ajouter 1 ml de NH₄OH dilué et agiter. Une coloration rouge plus ou moins intense indique la présence de génines de C-hétérosides.

5.4.5. Hétérosides cardiotoniques

5.4.5.1. Solution à analyser

Introduire 1 g de poudre dans un tube à essai, ajouter 10 ml d'éthanol à 60° et 5 ml d'une solution d'acétate neutre de Pb à 10%. Porter au bain-marie bouillant pendant 10 mn, filtrer sur coton.

5.4.5.2. Caractérisation

Agiter le filtrat avec 10 ml de CHCl₃ (en évitant la formation d'émulsion). Laisser décanter, soutirer la phase chloroformique et la partager entre 3 tubes à essai. Evaporer au bain-marie bouillant à sec, reprendre les résidus par 0.4 ml d'isopropanol. Ajouter dans les 3 tubes :

-tube n°1 : 1 ml de réaction de Baljet

-tube n°2 : 1 ml de réactif de Kedde

-tube n°3 : 1 ml de réactif de Raymond-Marthoud

Puis introduire dans chacun des 3 tubes 4 gouttes de KOH à 5% dans l'alcool. En cas de réaction positive il se développe les colorations suivantes :

-tube n°1 : orangée

-tube n°2 : rouge violacée

-tube n°3 : violet fugace

5.4.6. Recherche de stupéfiants (les tétrahydrocannabinols)

Peser 0.5 g de poudre et l'introduire dans un tube à essai. Ajouter 5 ml d'éther de pétrole et agiter pendant 15 mn.

Décanter la phase éthéro-pétrolique dans une capsule.

Evaporer à sec au bain-marie.

Ajouter 3 à 4 gouttes de KOH à 5 % dans l'alcool. La coloration violette indique une réaction de Beam positive.

5.4.7. Réactions de caractérisation des caroténoïdes

Après évaporation à sec de 5 ml de l'extrait, ajouter 2 à 3 gouttes d'une solution saturée de trichlorure d'antimoine dans le chloroforme. Il se développe en présence de caroténoïdes une coloration bleue devenant rouge par la suite.

5.4.8. Réactions de caractérisation des hétérosides cardiotoniques

1 g de poudre est introduit dans un tube à essai puis on ajoute 10 ml d'éthanol à 60° alcoolique et 5 ml d'une solution d'acétate neutre de plomb à 10%. L'ensemble est porté à ébullition pendant 10 mn. Le filtrat obtenu est porté au bain-marie bouillant pendant 10 mn. Nous avons agité le filtrat avec 10 ml de CHCl₃ dans un tube à essai en évitant la formation d'une émulsion (mettre dans une ampoule à décanter). Après décantation, la phase chloroformique a été soutirée à l'aide d'une pipette puis partagée entre trois tubes à essai et évaporée au bain-marie à sec. Les résidus ont été repris avec 0.4 ml d'isopropanol et dans les trois tubes, ont été ajoutés respectivement 1 ml de réactif de Baljet, 1 ml de réactif de Kedde et 1 ml de réactif de Raymond-Marthoud. Ensuite, nous avons introduit dans chaque tube 2 gouttes de KOH à 2% dans l'éthanol et observé après une dizaine de minutes. En présence de cardénolides, les colorations suivantes se développent : tube 1 : orangé ; tube 2 : rouge-violacé ; tube 3 : violet fugace

5.4.9. Test des alcaloïdes

1 g de la plante séchée et broyée sont mélangés avec 10ml d'HCl à 5% dans un récipient. Après une demi-heure de macération, on filtre le mélange, on additionne au filtrat quelques gouttes de réactifs de Mayer l'apparition d'un précipité blanc jaunâtre indique la présence d'alcaloïde (Grenand, 2004).

5.4.10. Test stérols et terpènes

5g de poudre séchée (échantillon), sont dissous dans 20ml d'éther de pétrole, filtrés, puis évaporés. Le résidu obtenu est dissout dans 0,5ml d'acide acétique auquel on ajoute 1 ml de H₂SO₄ concentré. Dans la zone de contact entre les deux liquides, il se forme un cercle violet ou marron, lorsqu'il devient gris, ceci indique la présence des stérols et terpènes.

5.5. Contrôle des émergences

Les chenilles et les parasitoïdes qui émergent sont comptabilisés au fur et à mesure afin de tirer des informations sur la courbe des émergences et sur l'importance des auxiliaires parasites.

5.6. Dénombrement des œufs

Après l'émergence larvaire et des parasitoïdes de toutes les pontes, au printemps période qui caractérise la dernière génération des parasitoïdes susceptibles d'émerger à la recherche d'hôte de substitution, les œufs disposés en lignes sont marqués d'une couleur

aux feutres afin de constituer un repère visuel pour le comptage des œufs. Un comptage minutieux des œufs a été conduit à l'aide d'une loupe binoculaire.

Ce modèle est proposé par Imbert (2012), il a établi six statuts possibles des œufs après l'émergence des chenilles ;

-Les œufs normalement éclos sont des œufs qui présentent le trou d'émergence circulaire caractéristique des chenilles de processionnaire du pin. Il s'agit donc des chenilles qui ont réussi leur développement larvaire.

-Chenilles mortes à l'intérieur de l'œuf, ces œufs ne présentent aucun trou d'émergence, lors de l'ouverture on retrouve à l'intérieur un embryon de chenille à un stade plus ou moins avancé de développement. Ces œufs sont comptés comme de la mortalité naturelle des chenilles.

-œufs vides : Ces œufs ne présentent aucun trou d'émergence, et une fois ouvert, sont totalement vides ou présentent des filaments blanchâtres très peu denses.

-A propos des œufs parasités, dans ce cas l'œuf présente un trou d'émergence caractéristique plus petit que celui de la chenille.

-Pour le parasitoïde mort dans l'œuf : Ces œufs n'ont pas de trou d'émergence mais à l'ouverture, on peut retrouver un adulte mort, dans ce cas l'identification sera facile, ou une larve morte et dans ce cas l'identification de l'espèce est quasiment impossible.

Contrairement la méthode de Morel (2008) qui propose d'autres statuts pour dénombrement des œufs ; l'œuf est percé d'un gros trou : une chenille en est sortie ; L'œuf est percé d'un petit trou : un œuf parasité ; L'œuf n'est pas éclos. Plusieurs cas peuvent se présenter ; l'œuf est rempli de jaune : le développement embryonnaire a échoué. L'œuf contient une chenille morte, le développement larvaire a échoué et l'œuf contient un parasite en diapause.

Sur la base de ces données, nous proposons que les œufs éclos soient divisés en deux catégories les larves vivantes qui se caractérisent par une ouverture à gros diamètre et les larves mortes à l'éclosion qui ont un gros trou mais avec une larve apparente morte à l'intérieur. Les œufs parasités sont aussi divisés en deux types qui sont caractérisés par un petit trou qui se localise au côté de l'œuf et l'autre a un petit trou bien arrondi et se localise au centre de l'œuf. Les œufs non éclos sont intacts (Fig. 39) (Hezil *et al.*, 2018).

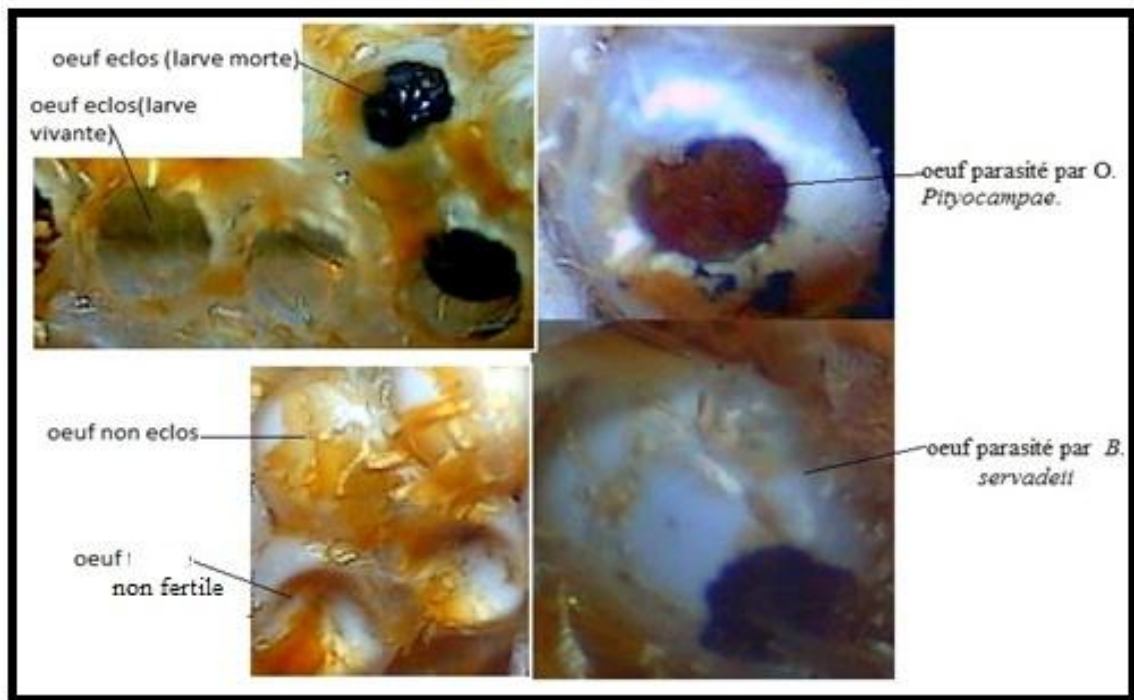


Figure 39. Les catégories d'œufs de la processionnaire du pin

5.7. Modèle biologique adopté dans le cadre de l'étude de l'évolution de populations de la processionnaire

Il est souvent difficile de mettre en place des expériences suffisamment rapides pour surveiller les effets directs d'événements climatiques rares sur la génération qui les a vécues, le réseau PCLIM représente une opportunité unique de tester à grande échelle la phénologie de la processionnaire qui est altérée par l'automne exceptionnellement chaud enregistré en 2014 dans toute l'Europe. Il est toujours possible de surveiller les effets de cet événement climatique sur la génération de la processionnaire qui l'a vécu, en utilisant une méthode synchronisée et normalisée. Il apparaît que les larves ont atteint le quatrième stade plus tôt que les années précédentes en France, ce qui facilite probablement la construction de la tente et la survie jusqu'aux premiers froids. Cependant, il semble essentiel de rechercher si le même développement accéléré est observé dans toute la gamme des processionnaires et si toute la vie larvaire sera raccourcie avec les processions précoces par rapport aux années normales. L'automne chaud peut également entraîner un bond en avant pour l'espèce en facilitant la survie en hiver des colonies pionnières au-delà de la plage d'expansion passée. De toute évidence, ces deux processus de développement

dépendront également des conditions météorologiques de l'hiver prochain. Cependant, obtenir une image synchrone des étapes de développement de la processionnaire dans toute sa gamme nous fournira des informations importantes (Project PCLIM, 2014).

5.7.1 Echantillonnage des larves de la processionnaire du pin

Pour étudier la phénologie de la processionnaire dans son aire de répartition en 2014-2015 en suivant ce plan d'échantillonnage

- Suivi au cours du même mois pour tous les partenaires du projet, idéalement avant la fin du mois de janvier 2015 pour s'assurer que les processions n'ont pas commencé.
- 5 sites différents, avec une orientation de pente variée en cas de paysage vallonné et des expositions variées au soleil
- 6 nids par site.
- Une larve du stade avancé doit être échantillonnée dans chaque tente et conservée dans de l'éthanol à 70 °. En cas de doute, l'instar peut être vérifié à l'aide de la morphométrie de la tête.

Le model a été réalisé par le Centre de recherche d'Orléans (INRA URZF Orléans)

5.7. 2.Cas de Senalba Chergui

Afin d'étudier la phénologie de la processionnaire, de ce projet de recherche, on a choisi la pinède de Sénalba Chergui. D'après le B.N.E.F (1983), le massif de Sénalba est le principal chaînon des monts des Ouled Naïl (Atlas saharien) et la forêt du Sénalba chergui occupe la partie orientale du massif à environ 300 km au sud d'Alger. Il est divisé en 12 séries. Les séries I et II constituent le versant Sud, la série III constitue le versant Sud-Ouest, les séries IV, V, VI, VIII, IX, X constituent le versant Nord, et les séries VIII, XI, XII constituent le versant Sud Est (Fig.40).

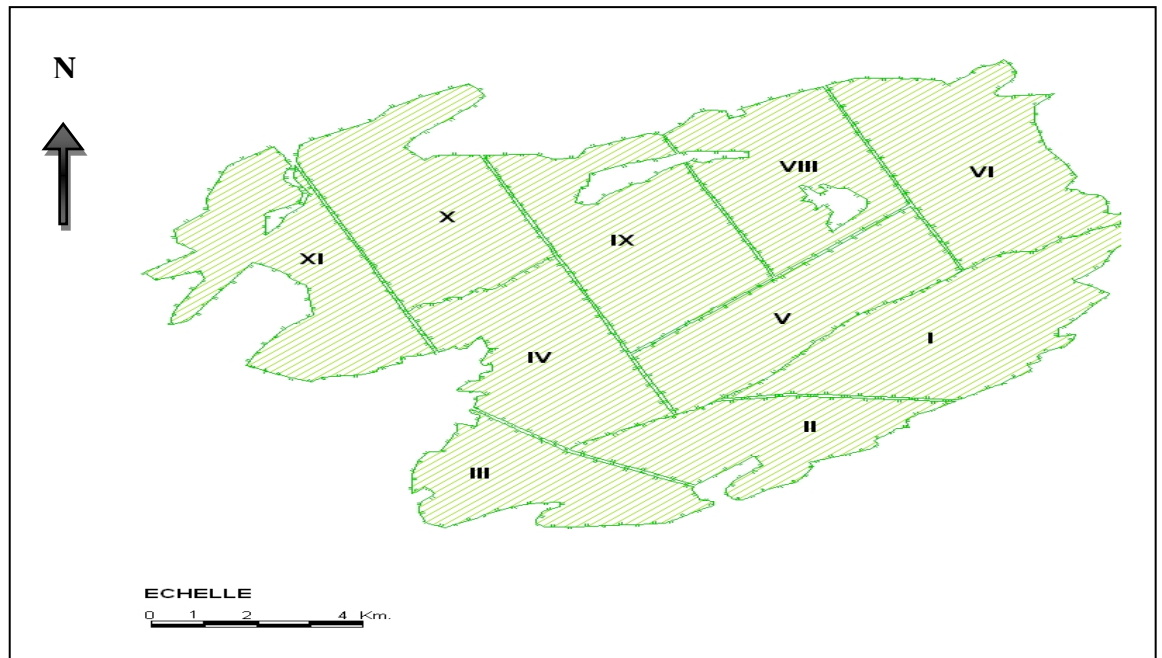


Figure 40. Les séries de la forêt de Senalba chergui (DGF)

Le tableau (12) regroupe les coordonnées et les caractéristiques des sites prospectés pour ce projet PCLIM

Tableau 12. Les coordonnées géographiques des nids considérés dans l'étude de la phénologie de la processionnaire du pin dans la pinède naturelle de Senalba Chergui 2014 à 2017.

Sites	Les coordonnées GPS	Elévation	L'orientation
1	34°64.342'N 3°16.916'E	1294	Sud-Est
1	34°64.387'N 3°16.852'E	1295	Sud-Est
1	34°64.339'N 3°16.827'E	1299	Sud-Est
1	34°64.309'N 3°16.791'E	1298	Sud-Est
1	34°64.308'N 3°16.724'E	1305	Sud-Est
1	34°64.317'N 3°16.624'E	1314	Sud-Est
2	34°62.572'N 3°14.077'E	1337	Sud-Ouest
2	34°62.562'N 3°14.039'E	1331	Sud-Ouest
2	34°62.582'N 3°14.000'E	1328	Sud-Ouest
2	34°62.596'N 3°13.980'E	1331	Sud-Ouest
2	34°62.572'N 3°13.897'E	1333	Sud-Ouest
2	34°62.542'N 3°13.876'E	1338	Sud-Ouest
3	34°61.233'N 3°09.841'E	1374	Nord-Ouest
3	34°61.351'N 3°09.847'E	1328	Nord-Ouest
3	34°61.433'N 3°09.856'E	1322	Nord-Ouest
3	34°61.431'N 3°09.848'E	1325	Nord-Ouest

3	34°61.590'N 3°09.828'E	1319	Nord-Ouest
3	34°61.673'N 3°09.907'E	1317	Nord-Ouest
4	34°62.880'N 3°12.734'E	1343	Nord
4	34°62.965'N 3°12.830'E	1327	Nord
4	34°62.996'N 3°12.860'E	1331	Nord
4	34°63.079'N 3°13.011'E	1328	Nord
4	34°63.054'N 3°13.017'E	1329	Nord
4	34°63.122'N 3°13.062'E	1332	Nord
5	34°66.421'N 3°16.405'E	1289	Nord-Est
5	34°66.429'N 3°16.411'E	1288	Nord-Est
5	34°66.449'N 3°16.444'E	1292	Nord-Est
5	34°66.489'N 3°16.504'E	1293	Nord-Est
5	34°66.515'N 3°16.552'E	1294	Nord-Est
5	34°66.569'N 3°16.635'E	1297	Nord-Est

5.8. Estimation du taux de défoliation

Les taux de défoliation estimés à la fin de l'hiver n'étaient pas en accord avec les densités de nids installés initialement sur les arbres (Imbert, 2012). Nous avons alors regroupé les arbres en classes de défoliation pour traiter nos données. Les arbres non défolié et très peu défolié (0% à 10%), les arbres peu défoliés (10 à 25%), les arbres moyennement défoliés (25 à 50%) et les arbres très défoliés (50 à 75%) et les arbres totalement défoliés (100%). Ce dispositif permet de tirer des informations sur l'état des infestations dans les divers biotopes prospectés.

L'évaluation du taux de défoliation pour chacun des arbres échantillonnés a été estimée en fonction des degrés d'attaque de la biomasse foliaire (Fig.41)

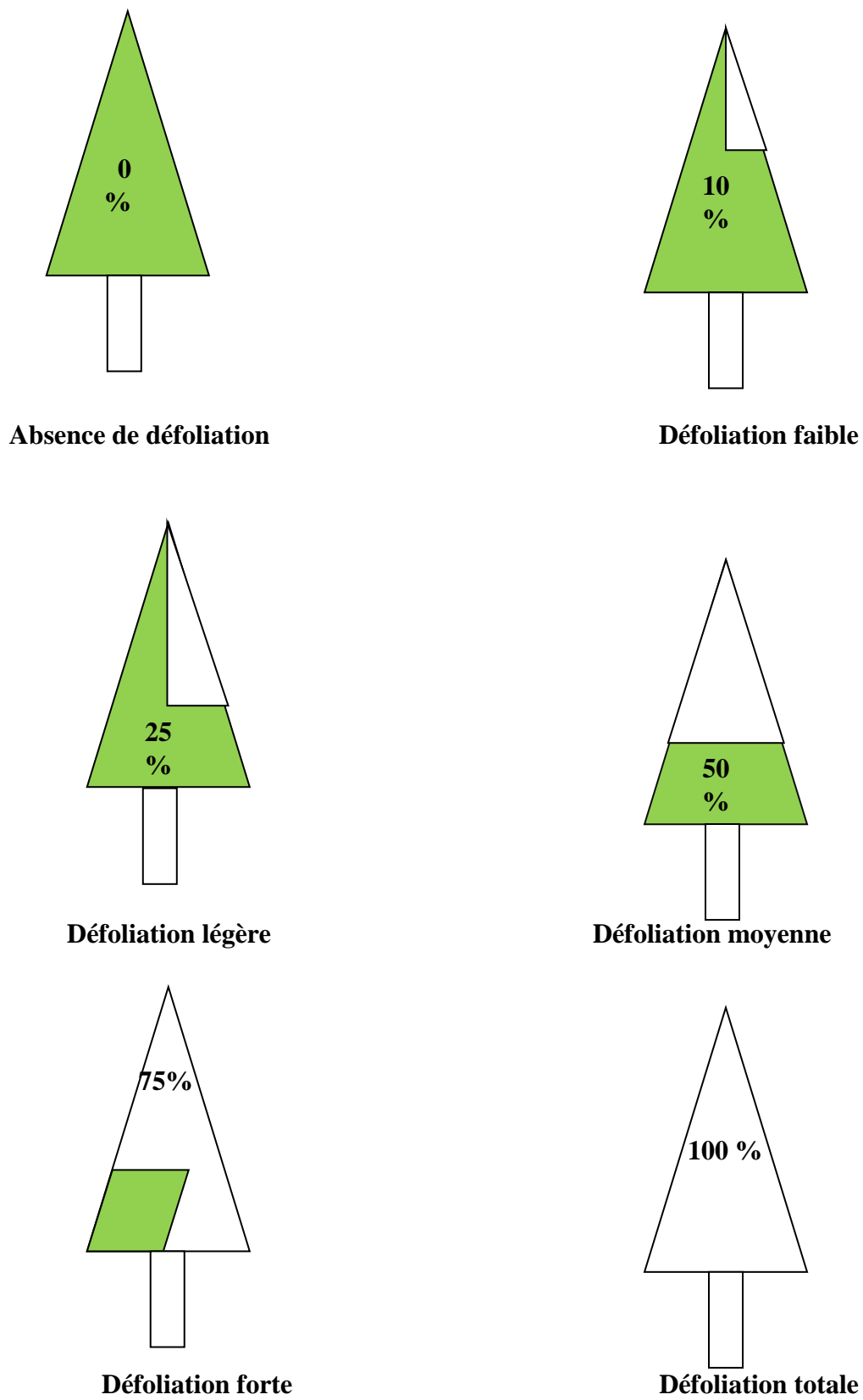


Figure 41. Schémas des taux de défoliation causé par la chenille processionnaire sur le Pin d'Alep

5.9. Dénombrement des nids d'hiver de la processionnaire du pin

Le comptage des nids a été effectué en hiver des années 2013, 2014, 2015 et 2016 dans les jeunes reboisements. On a pris en considération 100 arbres en ligne selon un plan systématique. La méthode adoptée est basée sur le comptage des nids d'un arbre sur deux suivant un transect linéaire. Dans un premier volet, nous avons compté le nombre de nids sur chaque arbre et déterminé systématiquement la hauteur de l'arbre. Dans un second volet, 15 nids ont été récoltés à l'aide d'un sécateur, pour chaque nid nous avons noté ses dimensions à l'aide d'un pied à coulisse. Pour éviter les effets de bordure, nous avons choisi le transect à environ 4 m à l'intérieur des peuplements. De même on a étudié l'effet de bordure (lisière) sur les populations de la processionnaire pour tirer des informations sur échanges et la migration des adultes à partir de leur site d'origine vers les sites avoisinants.

6. Méthodes d'exploitations des données

Plusieurs méthodes d'analyse biométrique ont été effectuées dans le but de tirer des informations sur les populations de la processionnaire du pin en milieu semi-aride

6.1. Analyse descriptive

Il s'agit d'un ensemble de méthodes permettant de décrire les unités statistiques qui composent une population. Elle a essentiellement pour but de dégager un certain nombre de renseignements quantitatifs et qualitatifs pour une comparaison et présenter les données observées sous une forme telle qu'on puisse facilement en prendre connaissance. Cette analyse est basée sur un calcul effectué séparément pour chaque variable, dans ce volet statistique, plusieurs calculs sont effectués ; les moyennes, les écarts-types et le coefficient de variation. Ceux-ci ont été réalisés à l'aide des logiciels Excel et Statistica 6.2.

6.2. Distribution fréquentielle

L'analyse fréquentielle représente la méthode pratique pour la description d'une population ou d'un échantillon et d'en procéder avant tout à une distribution de fréquence. Ceci dans le but de caractériser les populations dans leur ensemble et de présenter les données sous une forme synthétique, sans perdre l'essentiel de l'information contenue dans les valeurs de la variable à établir. Les données sont rangées, puis regroupées dans un nombre restreint de classes. Il s'agit donc d'une distribution qui montre la probabilité

d'apparition de toutes les valeurs d'une variable théorique. Cette analyse a concerné la biométrie et le dénombrement des pontes.

6.3. Analyse de la variance (ANOVA)

L'objectif de ce traitement est de tester les différences significatives entre les moyennes. Des analyses à un facteur ont été effectuées pour tester l'effet d'un facteur contrôlé ayant des modalités sur les moyennes d'une variable quantitative (Dagnelie, 2007).

6.4. Le modèle linéaire à effets mixtes par le logiciel (R)

Le modèle linéaire à effets mixtes est une extension du modèle linéaire qui prend en compte la variabilité liée aux individus. Ce modèle est composé d'une partie fixe et d'une partie aléatoire. La partie fixe est identique pour chaque individu et représente l'effet population. La partie aléatoire est propre à chacun des individus et traduit la variabilité des biotopes au cours du temps et l'effet du parasitisme dans le cas de ces travaux. La prise en compte de la variabilité se fait en ajoutant au modèle une constante aléatoire (Gaudart *et al.*, 2010).

$$Y_{i,t} = (\alpha + \alpha_i) + \beta t + \varepsilon_{i,t}$$

$$\varepsilon_{i,t} \sim N(0, \sigma^2)$$

$$\alpha_i \sim N(0, \mu^2)$$

α_i : effet aléatoire

$\alpha, \beta, \sigma, \mu$: paramètres à estimer

Sur ce modèle la constante aléatoire s'interprète comme suit : à $t = 0$ il y a un point de départ moyen de α_i ; cependant $\alpha_i \sim N(0, \mu^2)$.

Le second modèle à titre illustratif est le modèle à pente aléatoire.

$$Y_{i,t} = \alpha + (\beta + \beta_i)t + \varepsilon_{i,t}$$

$$\varepsilon_{i,t} \sim N(0, \sigma^2)$$

$$\beta_i \sim N(0, v^2)$$

α, β : effets fixes

$\varepsilon_{i,t}$: terme d'erreur aléatoire

β_i : effets aléatoires

$\alpha, \beta, \sigma, \nu$: paramètres à estimer (Gaudart *et al.*, 2010).

Les analyses ont été effectuées à l'aide d'un modèle mixte linéaire afin de prendre en compte l'effet du type de peuplement et de la distance du lot d'œufs au bouton d'aiguille, sur les variables dépendantes (le nombre des œufs parasités par *Ooencyrtus pityocampae* et *Baryscapus servadeii*). Les interactions entre les facteurs ont été testées pour déterminer si la mortalité des œufs était liée à la distance entre le lot d'œufs et le bourgeon de l'aiguille dans les peuplements reboisé et naturels. Les nombres des arbres dans les sites ont été utilisés comme un effet aléatoire. Tous les tests statistiques ont été réalisés avec la version 3.2.0 de R (Package nlme, Pinheiro *et al.*, 2017).

6.5. Régression linéaire

C'est une méthode statistique qui consiste à décrire les relations entre une variable privilégiée, appelée variable expliquée et plusieurs variables jouant un même rôle par rapport à la première, appelées variables explicatives. Le coefficient de détermination R^2 calculé, représentant la mesure de la proportion de la variable explicative par la variable à expliquer. Il évalue le degré d'association entre les deux variables et permet de juger la qualité de l'ajustement des points par la droite de régression (Dagnelie, 2007). Les probabilités sont calculées pour tirer le degré de signification entre le nombre d'œufs et la taille des pontes.

6.6. Analyse des tableaux croisés (PIVO)

Le but de cette méthode d'analyse est d'avoir des informations sur la relation entre deux variables prises en considération. Cette analyse dérive de l'analyse canonique. Elle permet de mieux expliquer en parallèle la relation des deux variables considérées

QUATRIEME CHAPITRE
RÉSULTATS ET DISCUSSION

QUATRIEME CHAPITRE

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. Données sur les caractéristiques biométriques et sur le poids des aiguilles, support végétal

1.1. Analyse des longueurs d'aiguilles support des pontes

Les résultats des mensuration biométriques des aiguilles support des pontes de la processionnaire du pin en provenance des deux biotopes prospectés sont présentés dans le tableau 13.

Tableau 13. Analyse descriptive du matériel biologique examiné

Année / biotope	2012		2014		2015	
	Forêts Naturelles	Plantations	Forêts Naturelles	Plantations	Forêts Naturelles	Plantations
Effectifs des aiguilles témoins	60	60	90	90	90	90
Longueurs moyennes des aiguilles témoins (mm)	56,67	62,47	50,82	55,56	58,72	63,41
Effectifs des aiguilles support des pontes	104	138	391	453	90	90
Longueurs moyennes des aiguilles support des pontes (mm)	46,63 ± 9,3	53,28 ± 10,5	44,97 ± 5,58	50,60 ± 9,74	50,41 ± 8,8	54,23 ± 10,68
Valeurs extrêmes des longueurs d'aiguilles support des pontes (mm)	24 - 69	25 - 77	31,65 - 57	32 - 87,72	33,4 - 76,1	30,92 - 97,9
Longueurs moyennes des parties basal (mm)	4,70 ± 5,15	12,90 ± 8,54	3,99 ± 3,16	10,56 ± 6,25	-	-
Valeurs extrêmes	0 - 25	2 - 45	0 - 11	0 - 32	-	-
Longueurs moyennes des parties portant des pontes (mm)	21,81 ± 4,9	25,16 ± 4,81	21,42 ± 3,6	23,17 ± 4,85	23,14 ± 4,8	24,37 ± 5,05
Valeurs extrêmes des pontes	6 - 36	11 - 38	15 - 32	10 - 35	15 - 35	10 - 35
Longueurs moyennes des parties apicales (mm)	38,56 ± 15	37,32 ± 6,8	41,65 ± 5,1	32,35 ± 18,6	-	-
Valeurs extrêmes (mm)	0 - 60	21 - 57	27,6 - 53,2	0 - 63,74	-	-

Les mesures des longueurs des aiguilles montrent que les aiguilles témoins sont plus longues pour le matériel biologique en provenance des plantations. L'analyse des aiguilles support des pontes varie entre 45 et 55 mm avec des écarts-type comparables entre eux (Fig. 42). Sur la base des résultats obtenus, la longueur des aiguilles rentre dans le choix des femelles de la processionnaire pour effectuer leur ponte respective. Ces résultats restent très discutables et à confirmer par des études complémentaires sur la structure des supports des pontes. Les valeurs extrêmes des pontes sont variables d'un biotope à un autre et dépendent de la capacité de la fécondité des femelles pondeuses. Vraisemblablement les pontes sont sous l'égide de plusieurs facteurs environnementaux.

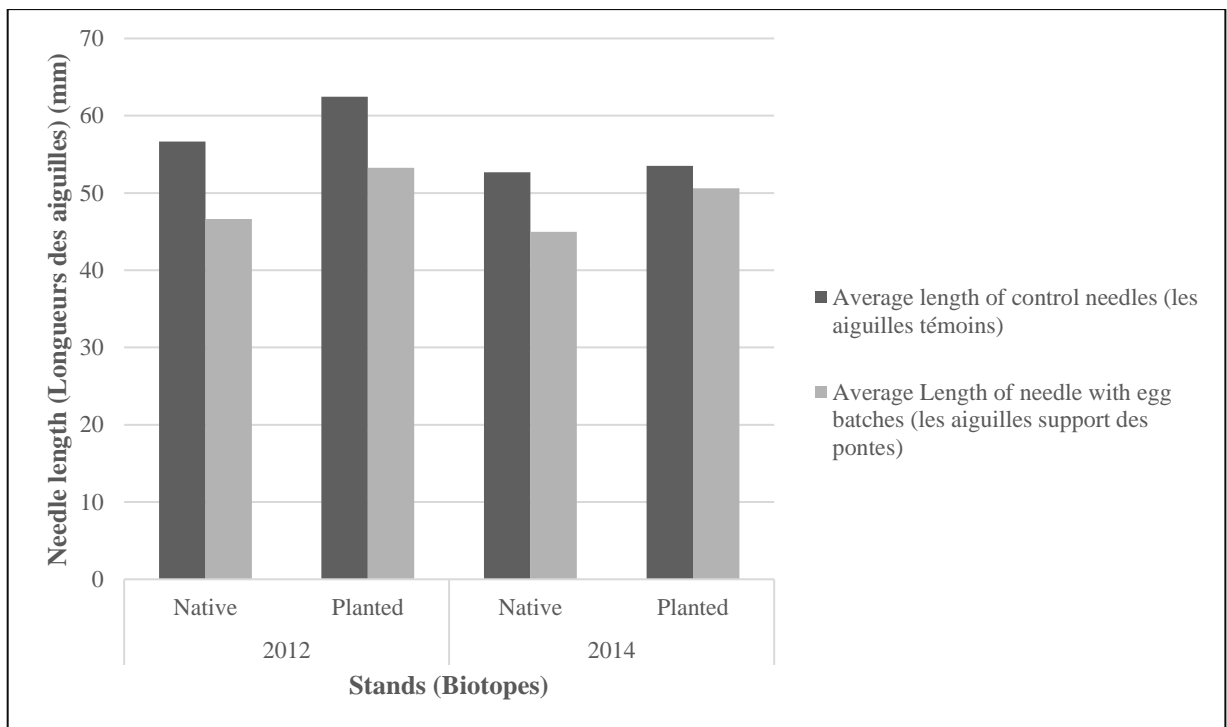


Figure 42. Mensurations des longueurs des aiguilles, support des pontes

L'influence des sites des pontes sur le rendement de la progéniture est un des facteurs pouvant modeler de façon évolutive le choix d'un site d'oviposition. Le choix des sites des pontes chez certains insectes peut aussi influencer la valeur adaptative des femelles (Kharrat et Jarraya, 2005). Les analyses biométriques de plante hôte peut dissimuler beaucoup d'informations sur le choix des femelles de la processionnaire du pin. A ce sujet, Idrissi-Hassani et Lebreton (1992) notent que la longueur moyenne des aiguilles chez le

pin maritime est plus significative dans les reboisements en comparaison avec les forêts naturelles. Cette constatation rejoint nos résultats.

La figure 43 illustre les longueurs des différentes parts des aiguilles support des pontes dans les reboisements et les forêts naturelles prospectées.

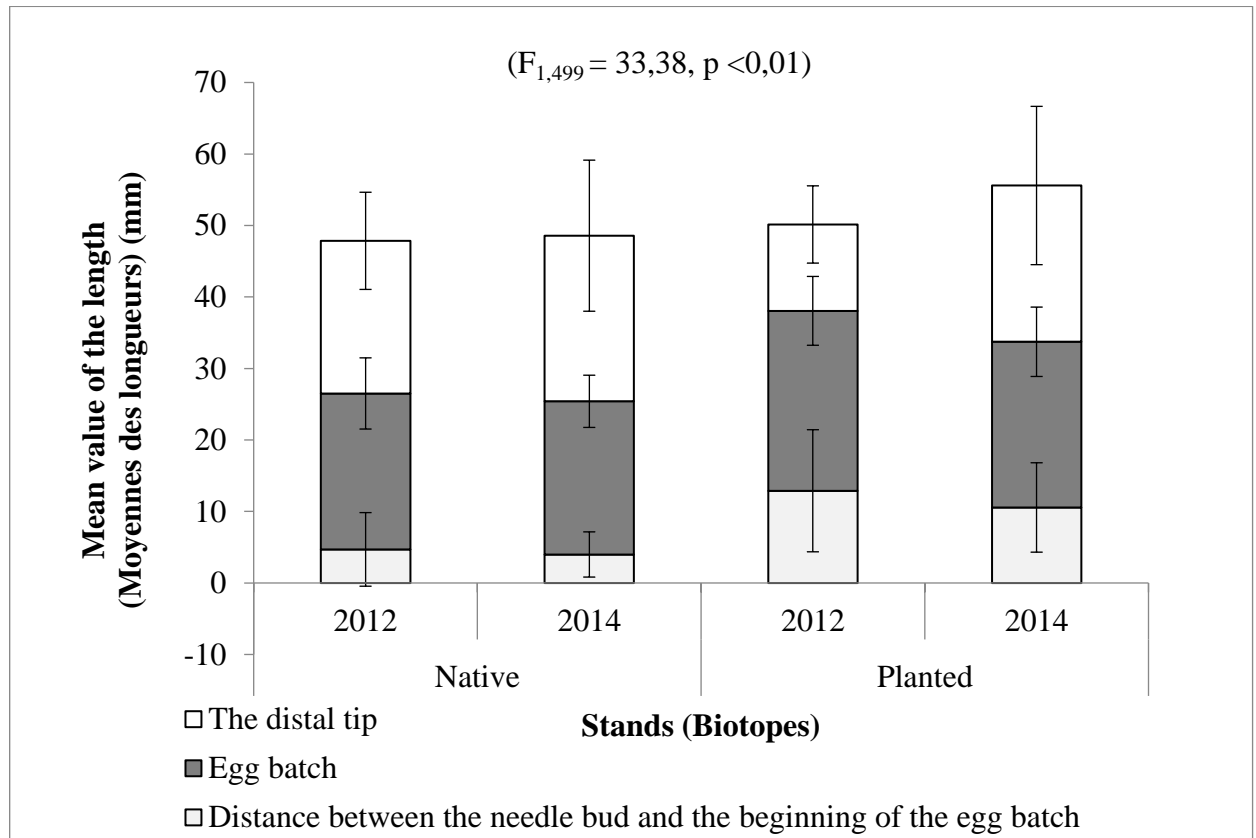


Figure 43. Moyennes des longueurs des différent part des aiguilles support des pontes en relation avec la position de la ponte

Etant donné que les aiguilles des plantations sont légèrement plus longues et plus fines que celles des peuplements naturels, les sections des aiguilles portant des œufs (pontes) sont plus longues dans les peuplements reboisés que dans les peuplements naturels. A ce sujet, Samalens et Rossi (2011) notent que la distribution des pontes de la processionnaire du pin s’effectue selon la nature du peuplement ; naturel ou reboisé.

Sur l’effectif global des échantillons analysés, les diamètres des aiguilles témoins issues des forêts naturelles sont plus conséquents et plus significatifs en comparaison avec celles issues des plantations qui restent comparables seulement entre elles.

En réalité, le calcul des moyennes fait perdre souvent de l'information en statistiques, nous proposons de tester nos données par ANOVA. Les aiguilles témoins des forêts naturelles sont plus larges (Fig. 44).

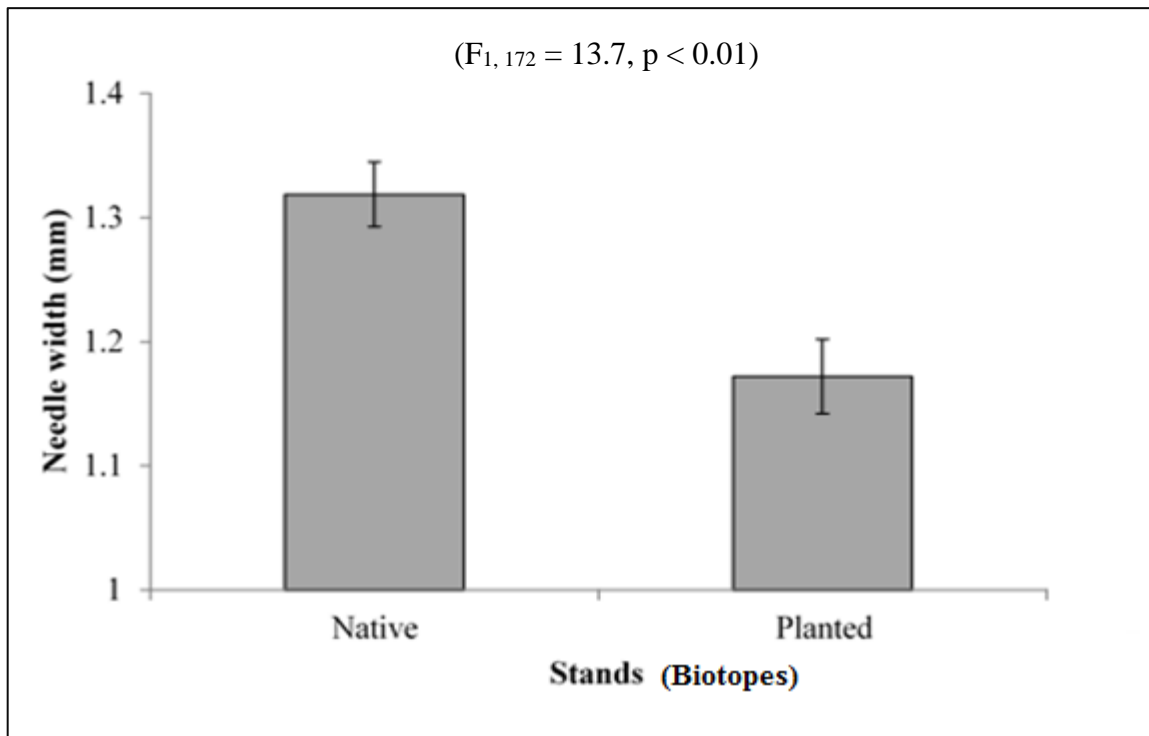


Figure 44. Mensurations des diamètres des aiguilles témoins

Les résultats obtenus montrent que le diamètre d'aiguilles choisi par la femelle de la processionnaire rentre dans le choix des femelles pondueuses, leur choix diffère significativement d'un biotope à un autre, qui pourrait aider la femelle à effectuer aisément sa ponte par le maintien sur l'aiguille sélectionnée pour l'émission de ses œufs. De même ce choix est prédit pour que la progéniture à l'éclosion s'alimente des aiguilles tendres à proximité de la ponte.

La comparaison des moyennes des poids des aiguilles témoins entre les deux biotopes considérés montrent une différence significative au seuil de 8 % et que les aiguilles des plantations sont légèrement plus conséquentes en comparaison avec celle des forêts naturelles (Fig. 45).

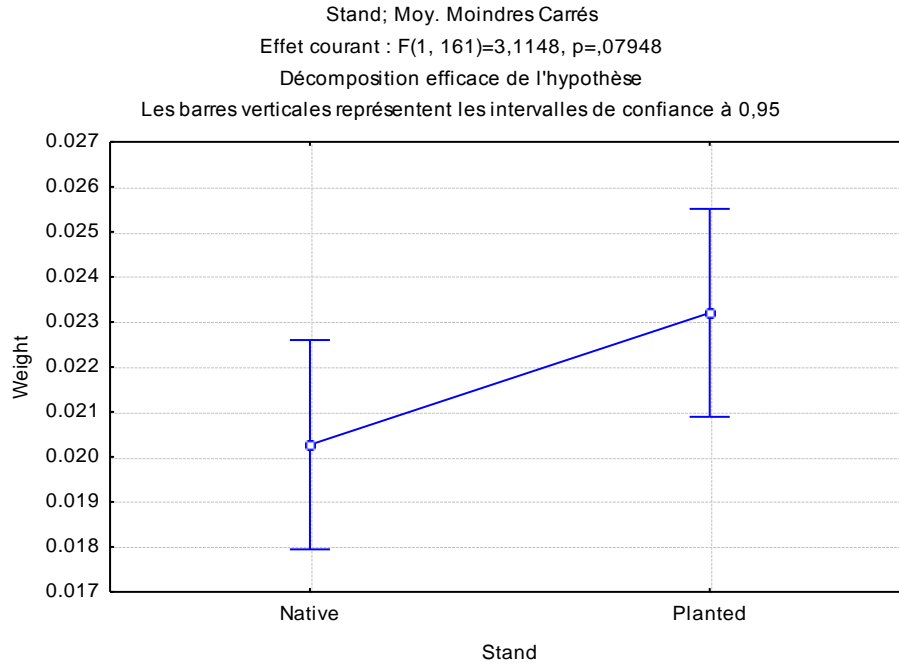


Figure 45. Comparaison des moyennes des poids des aiguilles témoins par ANOVA

A ce propos, Daligault (1991) note que le poids sec d'une aiguille est de l'ordre de 20 mg pour le pin d'Alep, l'incertitude sur le poids provient, certes pour une part de l'imprécision de la balance, mais surtout la sensibilité de l'ensemble de la mesure.

1.2. Analyse des pontes de la processionnaire du pin

Entre les sites des deux milieux prospectés, naturels et reboisés, les mensurations en longueur sont comparables entre elles. Si nous considérons les valeurs en longueurs obtenues entre les deux milieux, il ressort une valeur plus significative pour les mesures des pontes en provenance des reboisements. La moyenne des longueurs des pontes des reboisements est de l'ordre de 25,16 mm en 2012, de 23,17 en 2014 et de 24,37 en 2015. Pour les pinèdes naturelles on note des valeurs moyennes oscillant entre 21 et 23 mm pour les années de 2012 à 2015 (Fig. 46).

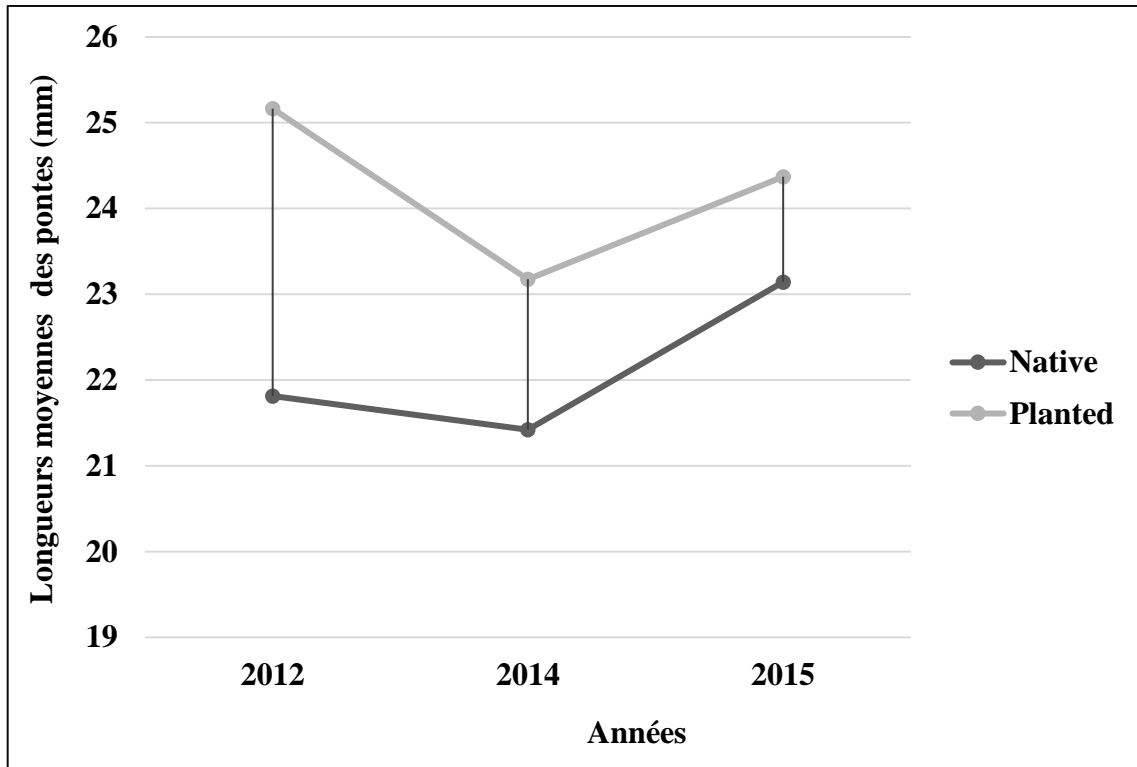


Figure 46. Comparaison des longueurs des pontes dans les biotopes prospectés

Comme l'analyse descriptive des moyennes peut dissimuler des informations, une analyse de la variance a été réalisée dans le but de tirer des résultats plus fiables. La comparaison des moyennes des longueurs des pontes par ANOVA montre une différence significative entre les deux biotopes considérés et entre les périodes d'étude (2012, 2014, et 2015) (Tableau 14).

En 2014, une diminution remarquable est notée pour les deux biotopes considérés. Cette diminution de fécondité est probablement due à la combinaison de deux facteurs ; le stress thermique en lui-même et la physiologie de la plante hôte et l'insuffisance en certains nutriments. A ce sujet, l'ONM a déclaré que l'année 2014 reste la plus chaude enregistrée, même si l'on estime que les marges d'incertitude afférentes aux moyennes annuelles sont plus importantes que l'écart de température entre les années les plus chaudes. En 2014, la température moyenne à la surface du globe était supérieure d'environ 0,57 °C (1,03 °F) à la normale calculée pour la période 1961-1990, qui est de 14,00 °C (57,2 °F). Les variations climatiques influencent directement sur la phénologie de la processionnaire du pin ce qui explique cette diminution notée en 2014. Ces résultats restent très discutables.

Tableau 14. Tests de significativité des pontes

Effet	Tests Univariés de Significativité pour Longueur des pontes (mm) (Feuille de do Paramétrisation sigma-restreinte Décomposition efficace de l'hypothèse				
	SC	Degr. de Liberté	MC	F	p
ord. origine	308064.5	1	308064.5	13669.22	0.000000
Stands	638.3	1	638.3	28.32	0.000000
year	213.3	2	106.7	4.73	0.009112
Stands*year	140.4	2	70.2	3.12	0.045040
Erreur	14513.5	644	22.5		

Une différence très hautement significative est notée entre les longueurs des pontes dans les plantations et dans les forêts naturelles ($p=0,0001^{***}$) et entre les années considérés (0,009). A ce sujet sur un transect altitudinal de pin noir, Imbert (2012) a obtenu sur des pontes échantillonnées de la zone de refuge glaciaire en Espagne jusqu'au front au sud de la région parisienne des longueurs moyennes de pontes variables de 24,27 à 34,55 mm. De même l'auteur note que dans la vallée de la Durance les pontes récoltées sur pin d'Alep et sur pin sylvestre ont des longueurs moyennes respectives de 23,7 mm et de 26,4 mm. Sur la base de ces résultats, il ressort que la structure de la plante hôte et sa composition peuvent influencer la fécondité des femelles dans leur environnement. Un effet de station régional est noté pour les populations de la processionnaire du pin dans leur biotope.

1.3. Analyse fréquentielle des longueurs des pontes

Les classes des longueurs des pontes de la processionnaire du pin dans les biotopes prospectés sont illustrées dans la figure 47.

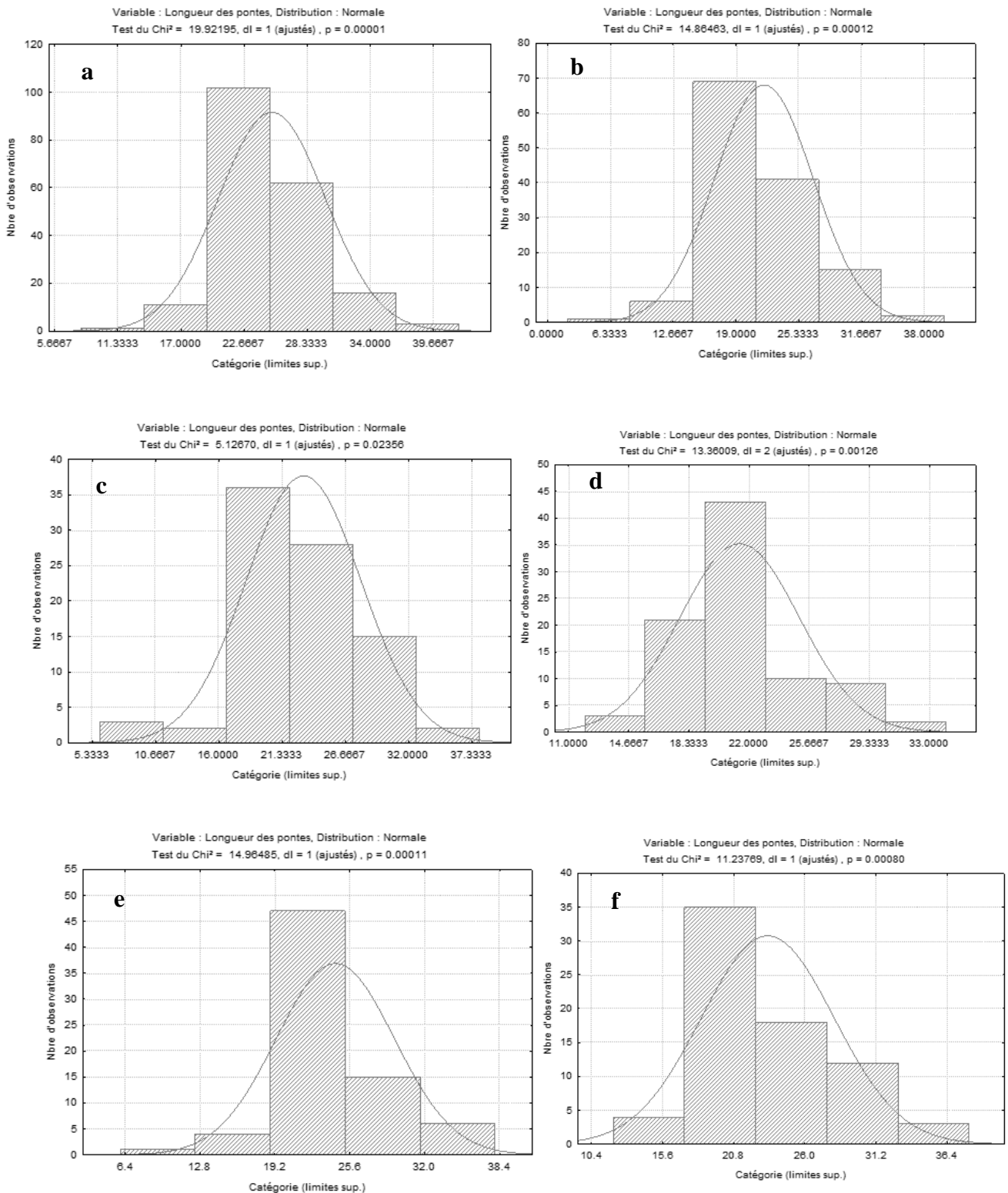


Figure 47. Catégories des longueurs des pontes récoltées dans les reboisements et forêts naturelles ; **a.** plantations en 2012, **b.** forêts naturelles en 2012, **c.** plantations en 2014, **d.** forêts naturelles en 2014, **e.** plantations en 2015, **f.** forêts naturelles en 2015.

L'analyse fréquentielle des longueurs des pontes a mis en évidence cinq à six classes pour les lots récoltés des divers biotopes considérés. Les données recueillies mettent en évidence une différence très hautement significative entre les lots testés ($p=0,0001^{***}$). Sur un effectif de 138 pontes récoltées en 2012 dans des plantations, soit environ 72 % des pontes ont une longueur comprise de 20-24 mm. Pour les forêts naturelles 67 % de l'effectif global (104) ont des longueurs de 16-20 mm. En 2014, un pourcentage de 14 % ont des longueurs comprises entre 21 et 26 mm dans les reboisements et 11 % ont des longueurs de 16-22 mm dans les reboisements et les forêts naturelles. Dans les plantations, la classe de 19 à 25,6 mm représente 51 % de l'effectif global, 40 % ont des longueurs des 16-21 mm dans les forêts naturelles, en 2015. Une variabilité entre les deux distributions des pinèdes naturelles et reboisées est notée.

1.4.Comparaison planifiée (Cas des quatre sites)

Pour tirer plus d'informations, le test LSD a été effectué pour comparer deux à deux les populations considérées dans les deux biotopes prospectés. La matrice des corrélations du tableau 15 met en évidence les significations possibles.

Tableau 15. Analyse LSD des quatre stations prospectées

Stations	Test LSD ; Variable Longueurs des pontes (mm) Différences significatives marquées à $p < ,05000$			
Stations	{1} 24,984	{2} 24,750	{3} 21,176	{4} 22,885
S2 {1}				
S1 {2}	0,824031			
S4 {3}	0,001136**	0,005229**		
S5 {4}	0,040486*	0,090968	0,113515	

Les longueurs des pontes en provenance des deux reboisements et les deux pinèdes naturelles sont comparables entre elles.

Si on considère les longueurs des pontes en provenance du reboisement de (1) avec les valeurs obtenues dans les deux forêts naturelles, une haute signification est notée. Contrairement, les longueurs des pontes récoltées dans le reboisement de (2) ne montre pas une signification avec les données recueillies dans le site naturel (4) ce que peut être expliqué par la proximité de deux stations prospectés (10 Kms) et par l'échange entre les milieux avoisinants.

1.5. Corrélation entre les longueurs des aiguilles et des pontes

Le choix des aiguilles pour le dépôt des pontes peut être en relation avec la morphologie des aiguilles ce qui peut expliquer le choix des femelles pour l'émission de leurs œufs.

La figure 48 mis en évidence, la corrélation entre les longueurs des aiguilles et des pontes dans les deux biotopes reboisés et naturels prospectés.

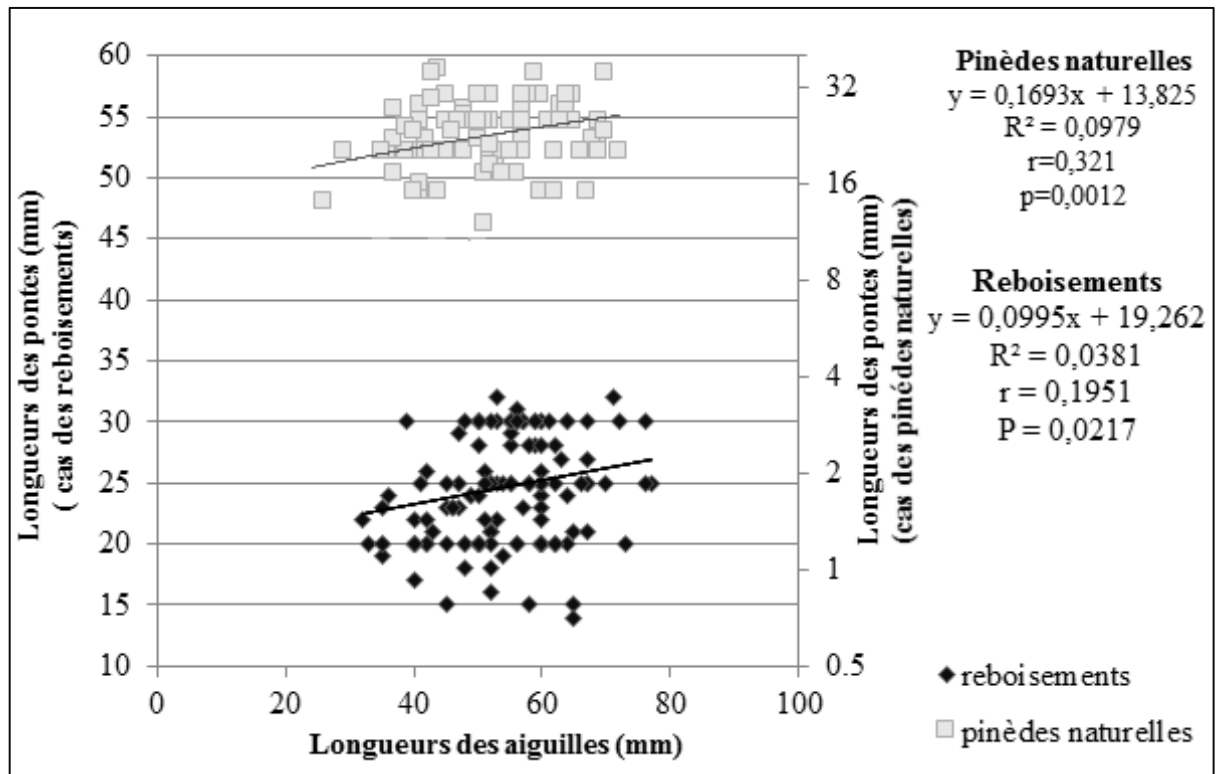


Figure 48. Relation entre les longueurs des pontes et les longueurs des aiguilles

L'analyse de la régression linéaire montre une corrélation significative entre les longueurs des pontes et des aiguilles pour les deux reboisements ($p=0,0217$) et pour les deux pinèdes naturelles ($p=0,0012$). A ce sujet Arnaldo et Torres (2006) ont montré que l'hôte peut influencer la structure des pontes. Pimentel *et al*, (2010) notent que la différence observée en longueur des pontes est liée à la répartition des hôtes et à la morphologie de leurs aiguilles, ce qui corrobore nos résultats.

Les femelles ont une capacité spécifique de corréler entre les longueurs des pontes et des aiguilles et de choisir la partie pour pondre et même de contrôler le nombre des œufs pondus, cet insecte peut aller vers un choix plus sélectif au sien de même hôte, on a observé

qu' il existe une sélectivité des aiguilles de même arbre, les aiguilles longues sont les plus recherchés par les femelles de la processionnaire du pin notamment car ils offrent une longueur confortable pour déposer ses œufs facilement.

1.6. Analyse croisée entre les longueurs des aiguilles et des pontes (Cas des quatre sites)

Les rapports des analyses croisées entre les longueurs des pontes et les longueurs des aiguilles des deux biotopes sont illustrés par la figure 49.

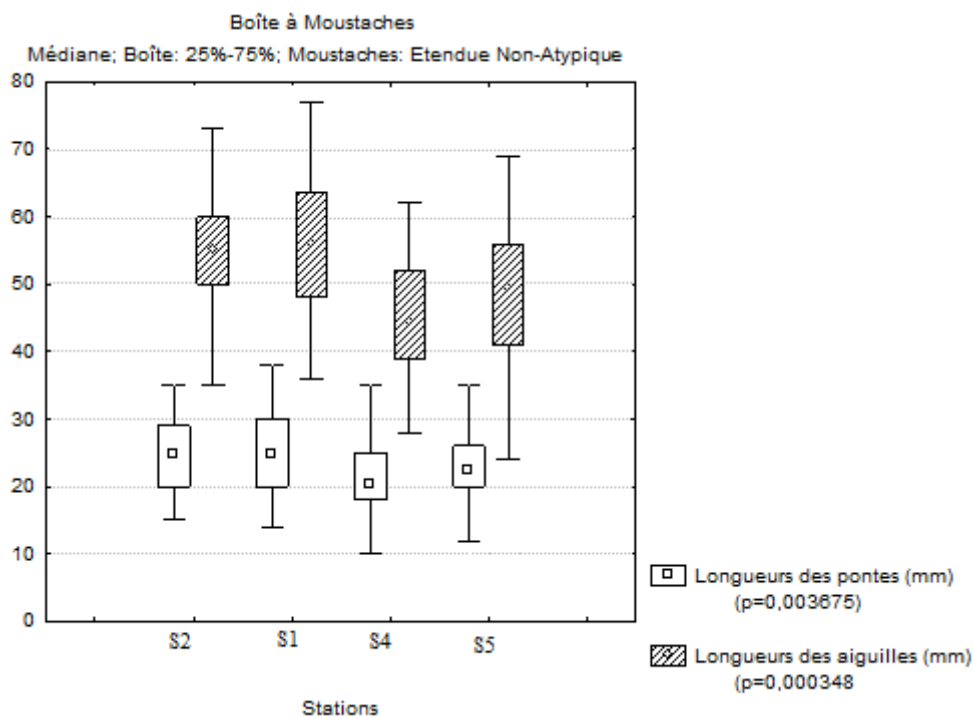


Figure 49. Distribution des longueurs des aiguilles et des pontes

La probabilité calculée est hautement significative entre les pontes des quatre populations examinées et très hautement significative pour les lots des aiguilles des quatre stations prospectées. Dans le reboisement (S2) 50% de l'effectif global compte des longueurs des pontes allant de 20 à 29 mm avec valeur médiane d'environ 25mm et une plus grande variabilité du côté supérieur allant jusqu'à 35mm. Dans le reboisement (S1), la valeur médiane se maintient à la même valeur que précédemment mais l'intervalle de 50% s'étend jusqu'à 30mm, ce qui important c'est la grande variabilité des longueurs des pontes qui peuvent allant jusqu'à 39mm. Dans la pinède naturelle (S4), 50% des longueurs des pontes

limités entre 19 et 25 mm avec une valeur médiane proche de 21mm et une variabilité très importante dépassant 35 mm. Dans la pinède naturelle (S5), 50 % des pontes ont des longueurs limitées entre 20 et 25 mm avec une variabilité plus réduite et une valeur médiane d'environ 22 mm.

L'examen des longueurs des aiguilles support des pontes montre que dans le reboisement (S2), 50 % des aiguilles ont des longueurs limitées entre 50 et 60 mm avec une valeur médiane d'ordre 55mm et une variabilité très importante dépassant 73 mm. Dans le reboisement (S1), 50 % des aiguilles s'étendant entre 48 et 64 mm avec une valeur médiane d'ordre 55 mm et une variabilité importante dépassant 76mm. Les étendues des 50% des longueurs des aiguilles de la pinède naturelle (S4) allant de 40 à 52 mm avec une valeur médiane d'environ 42 mm et une variabilité maximale dépassant 62 mm et minimale allant à 29 mm. Dans la station naturelle (S5), 50 % des aiguilles ont des longueurs limitées entre 41 et 55 mm avec une variabilité maximale allant jusqu'à 70 mm et une valeur médiane d'environ 50 mm.

1.7.Importance des pontes dans le barrage vert

Pour tirer des informations sur la stratégie du choix des femelles pondueuses de la processionnaire du pin dans la région semi-aride et sur la capacité du vol des femelles, des études ont été effectuées sur l'importance des pontes dans les jeunes plantations reboisées qui offrent des conditions favorables pour la population de la processionnaire du pin dans son aire de répartition. La figure 50 illustre la répartition moyenne des pontes par arbre du pin en fonction des positions sur la couronne des arbres (Basale, Médiane et Apicale) et en fonction des hauteurs des arbres (Fig. 51).

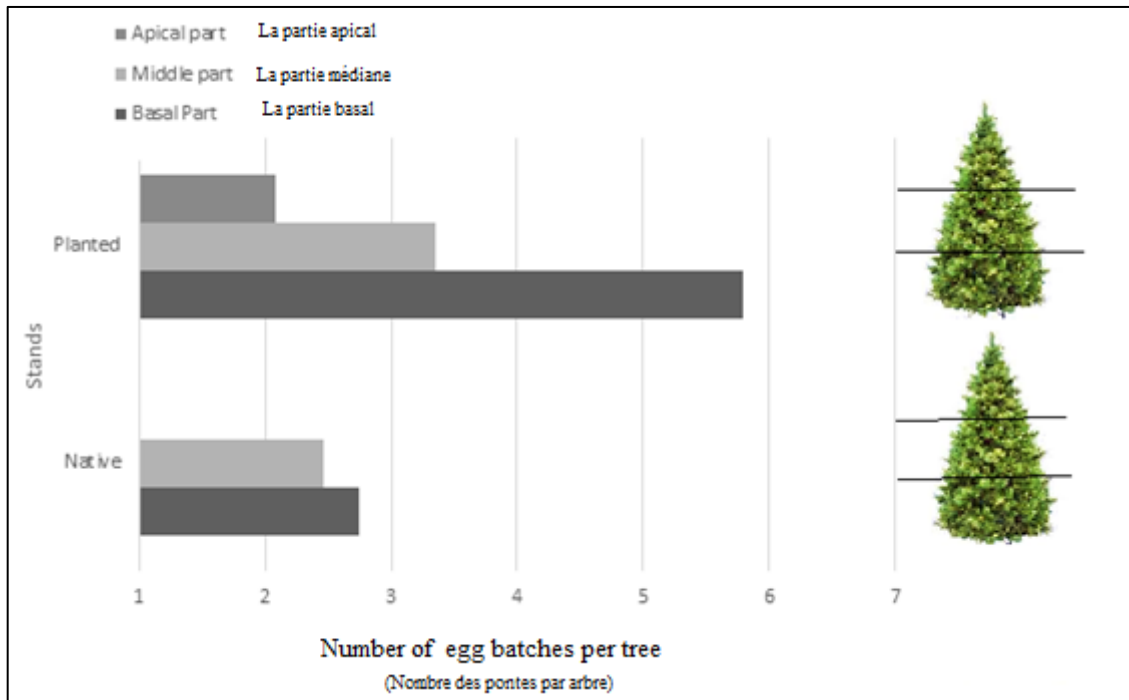


Figure 50. Importance des pontes par arbre en fonction de la position.

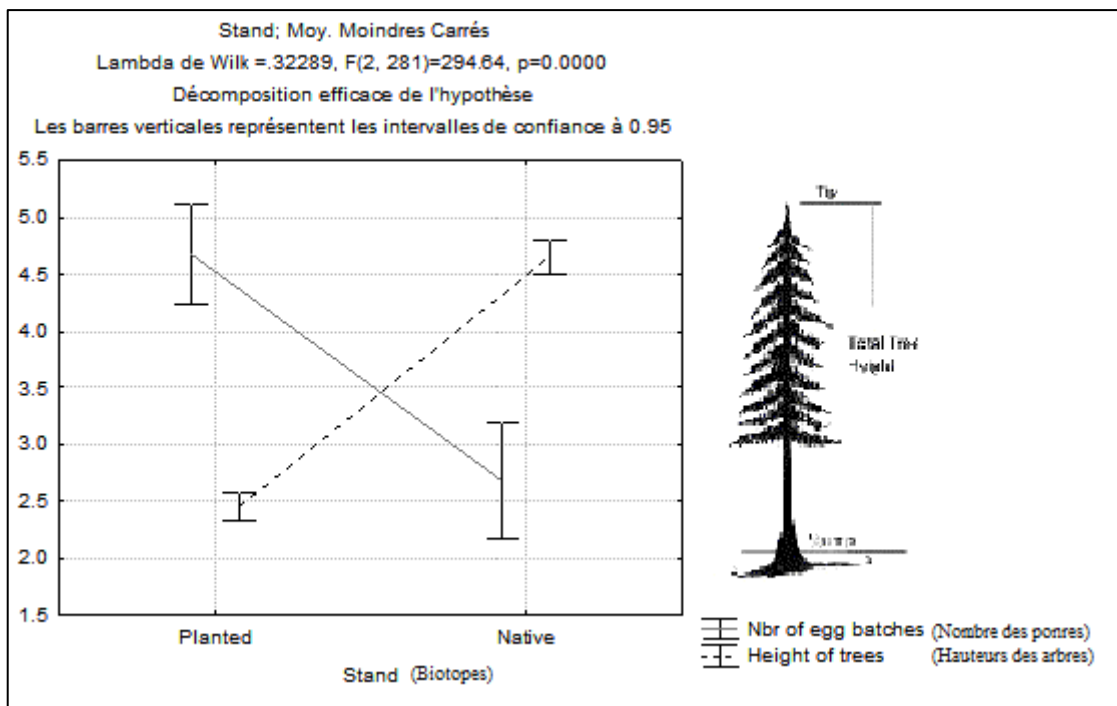


Figure 51. Distribution des pontes en fonction de la hauteur de l'arbre dans les deux biotopes prospectés

Les résultats montrent que les femelles de la processionnaire du pin préfèrent la partie basale de l'arbre pour pondre leurs œufs et que les jeunes arbres reboisés ayant des hauteurs

de l'ordre de 2,50 m sont les plus recherchés pour l'oviposition des femelles pondueuses. Ces résultats donnent une idée générale et une réflexion sur la capacité du vol des femelles de la processionnaire du pin dans le barrage vert. Une migration s'effectue vers les jeunes plantations au cours du temps. Rousselet *et al.* (2009) notent que les femelles de la processionnaire peuvent voler à une distance maximale de 3,5 km pour rechercher les jeunes arbres des plantations particulièrement en lisière afin d'assurer le succès de la descendance.

1.8.Degré de sélectivité des rameaux pour l'oviposition dans les zones néo-colonisées et la lisière

Sur la base des résultats recueilles sur le choix des plantes hôtes par les femelles de la processionnaire et pour tirer des informations sur le degré de sélectivité des aiguilles et des rameaux dans les milieux reboisés (à l'intérieur et à la lisière) et les arbres isolés qui sont néo-colonisés par la processionnaire (Fig.52), qui peut s'exprimer quantitativement par le ratio de sélectivité des sites des pontes par unité d'arbre (α) (le nombre des pontes sur rameaux par arbre/ le nombre total des pontes) si le ratio $\alpha = 1$, on note que les femelles changent leur stratégie d'oviposition. Les résultats montrent que α tendre vers 1 significativement pour les arbres isolés et la lisière des peuplements artificiels mais aussi à l'intérieur des jeunes arbres reboisés.

Sur la base des observations et les mesurent conduites sur le matériel biologique considéré, les arbres reboisés se caractérisent par des aiguilles courtes (Fig. 53). Après une défoliation totale notée au cours de l'année précédente les femelles de la processionnaire préfèrent pondre leurs œufs sur les rameaux du pin qui leur offrent un site plus favorable (hypothèse qui reste à confirmer davantage). Les interactions plantes-insectes sont encore trop peu étudiées. Il est évident que de rares pontes sur rameaux de pin sont observés dans les peuplements de pins depuis longtemps.

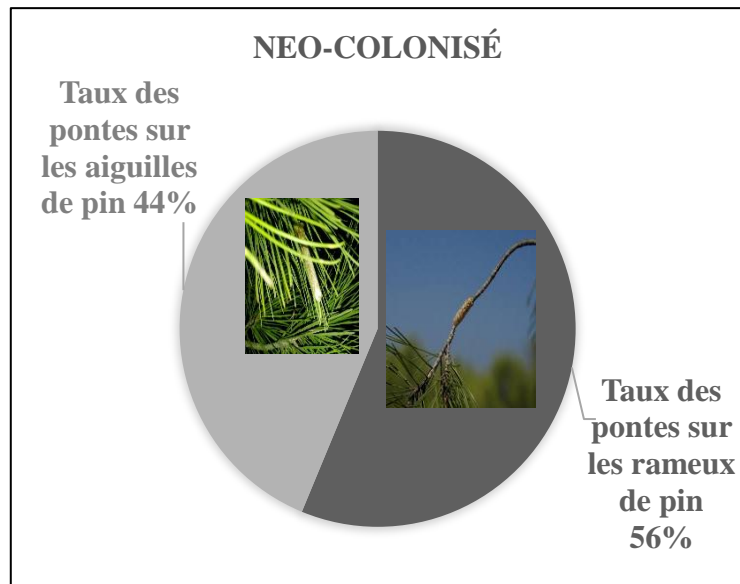
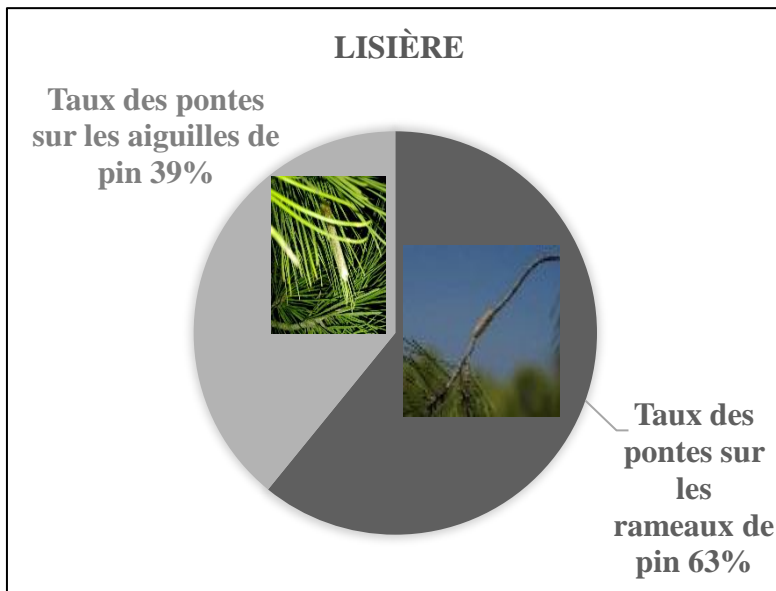
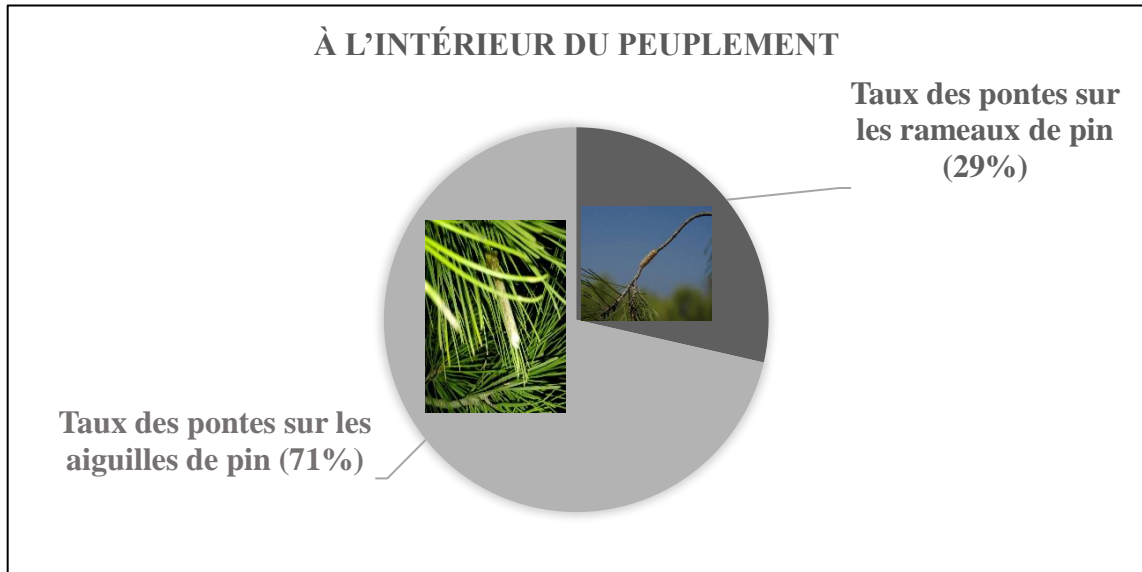


Figure 52. Distribution des pontes sur les aiguilles et les rameaux de pin d'Alep, cas du reboisement de Moudjebara.



Figure 53. Cas de ponte sur rameau de pin d'Alep

2. Données recueillies sur les émergences

Pour l'ensemble des sites prospectés, le début des éclosions a été noté à partir de la dernière décade du mois d'août jusqu'au mois de septembre pour l'ensemble du matériel. Les conditions climatiques gèrent les éclosions après une période variable de 30 à 45 jours après l'émission des œufs. Les données temporelles des éclosions sont regroupées dans le tableau 16.

Tableau 16. Périodes d'éclosion des œufs des populations étudiées

Sites	2012		2014		2015	
	Début	La fin	Début	La fin	Début	La fin
S1	20/08	26/09	10/09	30/09	01/09	27/09
S2	26/08	22/09	12/09	29/09	29/08	30/09
S3	23/08	24/09	12/09	01/10	03/09	28/09
S4	24/08	22/09	17/09	03/10	07/09	27/09
S5	02/09	24/09	10/09	30/09	31/08	20/09
S6	21/08	20/09	15/09	28/09	05/09	29/09

A ce sujet, Demolin, (1969a) note que la température joue un rôle important sur les dates d'éclosion des larves de la processionnaire, la fréquence des éclosions en fonction des températures moyennes journalières est illustrée par la figure 54.

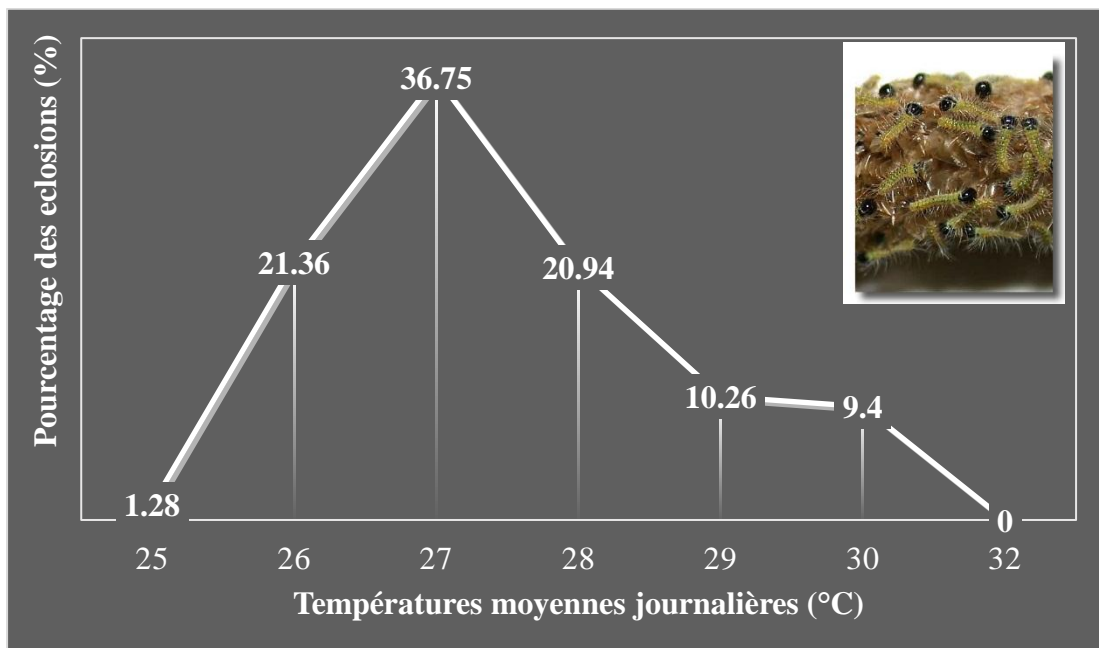


Figure 54. Fréquence journalière d'éclosion de pontes en fonction des températures moyennes journalières

Les éclosions se sont échelonnées au cours des trois premières semaines du mois de septembre. La fréquence journalière des éclosions est variable. Les journées chaudes se caractérisent par un faible nombre d'éclosion. L'optimum de développement de la processionnaire du pin se situe entre 20 et 25 °C, par contre une température excédant les

32°C peut causer la mort d'une partie de la population. A ce propos, Démolin (1987) confirme que l'éclosion se déclenche lorsque la somme des températures moyennes journalières annuelles à l'éclosion avoisine 780 °C.

2.1.Cumul des éclosions

La courbe cumulative des éclosions représentée par la figure 55 explique davantage la date de calage à laquelle on note 50 % des émergences de la population.

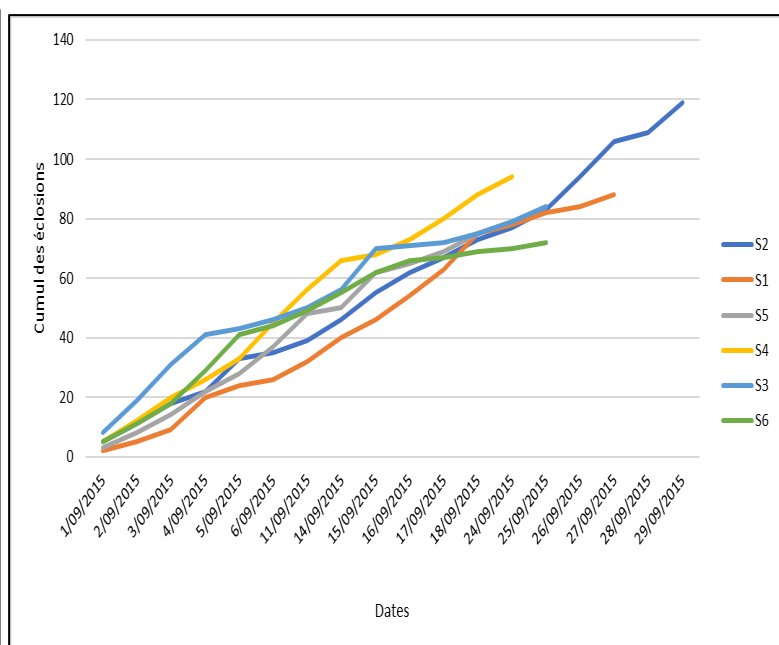
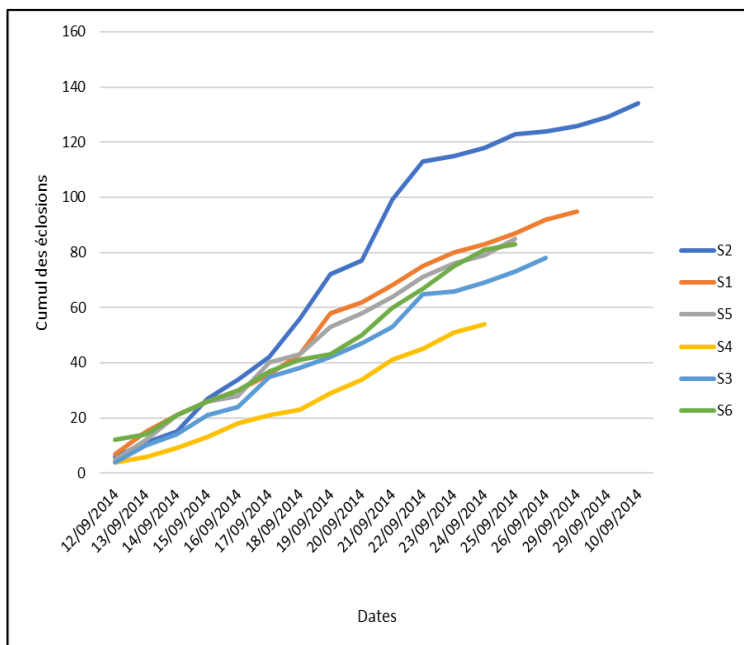
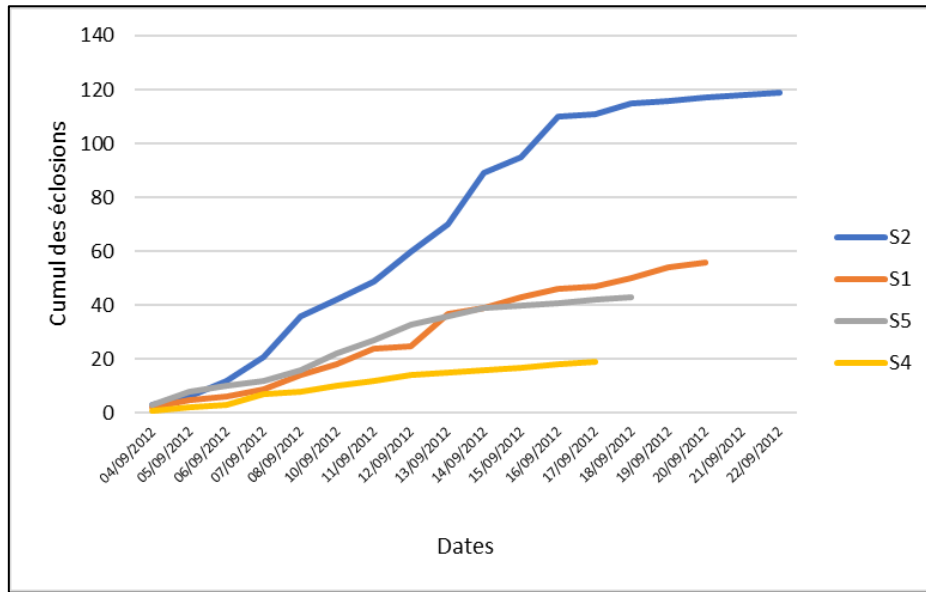


Figure 55. Courbes cumulatives des éclosions en 2012, 2014 et 2015

Nous retenons que le 17 septembre, 12 septembre correspondant aux dates de calage qui aide à la décision des interventions contre les chenilles de premières émergences pour les reboisements S1 et S2, respectivement. De même, le 16 septembre correspondant à la date de calage calculée pour les forêts naturelles S4 et S5 en 2012. En 2014, le 19 septembre correspondant à la date de calage approximative calculée pour les six sites prospectés. En 2015, nous retenons que le 19 septembre, correspondant à la date de calage approchante.

2.2. Taux d'éclosion des pontes

Les taux d'éclosion des pontes de la processionnaire du pin sont regroupés dans le tableau 17.

Tableau 17. Analyse comparative des taux d'émergence des pontes de la région semi-aride centre.

Variabes	2012	2014	2015
Effectif des pontes	242	844	180
Effectif des pontes écloses	178	576	138
Effectif des pontes non écloses	64	268	42
Taux d'éclosion (%)	73,55	68,24	76,66

Sur la base des résultats enregistrés, le taux d'éclosion est plus élevé en 2015. Il est de 76,66 %. Selon Démolin et Millet (1981), les pontes n'ont écloses sont dues au vol tardif de la population qui s'effectue après le mois de juillet et ne donne pas des descendance. Contrairement dans notre cas, nous avons noté des éclosions au mois d'août et de septembre dans le matériel biologique considéré. Des investigations complémentaires doivent être menées pour des explications complémentaires,

3. Analyse des catégories d'œufs

Les œufs examinés à la loupe binoculaire présentent une forme arrondie de couleur blanche. Les œufs éclos se divisent en deux catégories. Ceux qui se caractérisent par une ouverture à gros diamètre impliquent la sortie de la chenille et celles dont la tête est apparente, sont considérés comme chenilles mortes à l'éclosion. Les œufs parasités sont aussi divisés en deux types ; œuf parasité par *Baryscapus servadeii* caractérisé par un diamètre plus réduit qui se localise au côté de l'œuf ; l'œuf parasité par *Ooencyrtus pityocampae* a un petit trou parfaitement arrondi et se localise au centre de l'œuf (Fig.56).

Les œufs non éclos sont intacts. Les œufs non fertiles peuvent être observés dans de rares cas.

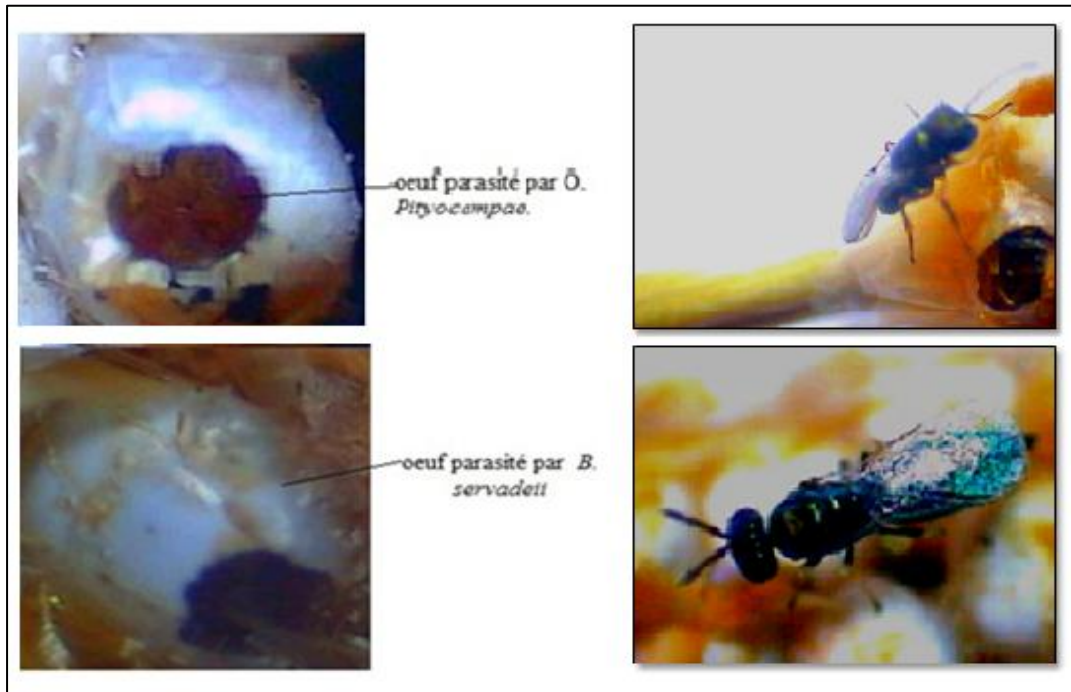


Figure 56. Les parasitoïdes actifs de la processionnaire du pin

Les données relatives aux analyses des différentes catégories d'œufs des pontes recueillies sont regroupées dans le tableau 18.

Tableau 18. Analyse descriptive des catégories d'œufs

Variables	Biotopes	
	Forêts naturelles	Plantations
Effectifs des pontes	104	138
Effectifs des œufs	10097	19770
Nombre moyen des œufs/ponte	134,6 ± 3,5	135,3 ± 2,8
Nombre moyen œufs éclos	87,0 ± 5,3	107,2 ± 2,7
Nombre moyen des œufs éclos mortes	15,6 ± 2,2	3,5 ± 0,5
Nombre moyen des œufs non éclos	41,7±3,7	13,1±0,6
Les œufs parasités par <i>O. pityocampae</i>	3,3 ± 0,4	2,1 ± 0,07
Les œufs parasités par <i>B. servadeii</i>	7,1 ± 0,6	7,0 ± 0,5
Taux de parasitisme par <i>O. pityocampae</i> (%)	2,4	1,5
Taux de parasitisme par <i>B. servadeii</i>	5,3	5,2

La fécondité des femelles pondueuses de la processionnaire du pin est proportionnellement plus faible à la limite sud de l'aire de sa distribution variant de 130 à 140 œufs par femelle. A ce sujet Zamoum *et al.* (2015) notent des données très comparables. Les données de Démolin (1969) et Pimentel *et al.* (2010) sont plus conséquentes et plus significatives dans l'aire principale de distribution, il s'élève de 200 à 240 œufs par ponte. Les moyennes des œufs éclos montrent qu'il existe une très grande différence pour les deux biotopes prospectés. De même les moyennes des œufs non éclos présentent une plus grande signification pour les pinèdes naturelles.

Sur la base des données de dénombrement des œufs pour les quatre populations de la processionnaire, des analyses fréquentielles ont été effectuées et reportées dans le tableau 19.

Tableau 19. Catégories du nombre d'œufs par ponte

Reboisements					
S2			S1		
Classes	Effectifs	% Observé	Classes	Effectifs	% Observé
92 - 105	19	16,81	95 - 89	5	15,62
105 - 150	59	52,21	89 - 123	10	31,25
150 - 195	32	28,32	123 - 157	11	34,37
195 - 240	2	1,77	157 - 191	4	12,5
240 - 245	1	0,88	191 - 231	2	6,25
Forêts naturelles					
S5			S4		
Classes	Effectifs	% Observé	Classes	Effectifs	% Observé
56 - 84	3	4,28	52 - 82	1	2,94
84 - 118	7	10	82 - 114	8	23,54
118 - 152	32	45,71	114 - 146	13	38,24
152 - 186	24	34,28	146 - 178	10	29,41
186 - 197	4	5,71	178 - 208	2	5,88
p = 0,0001***					

Les données relatives aux pontes examinées montrent une probabilité très hautement significative pour la comparaison des échantillons des quatre stations ($p=0,0001***$). Pour les reboisements, la deuxième et la troisième classe sont les plus représentatives soit 80,52 % de l'effectif global des pontes récoltées dans la station prospectée à Tokerssan (S2) et un taux de 65,62 % dans la station prospectée à Moudjbara (S1). Le matériel biologique récolté dans la station prospectée à Charef (S4) a mis en évidence des valeurs variables de 114 à 178 œufs avec un taux d'éclosion de l'ordre de 67,64 %. Dans la pinède naturelle de

Senalba (S5) le nombre des œufs par ponte varie de 118 à 186 œufs par ponte, soit un taux de 80 %.

Les résultats des taux, relatifs aux catégories des œufs sont groupés dans le tableau 20 et représentés par les figures 57 et 58.

Tableau 20. Catégories d'œufs en pourcentage

Variables	Biotopes	
	Forêts naturelles	Plantations
Effectifs des pontes	104	138
Effectifs des œufs	10097	19770
Taux des œufs éclos vivants (%)	54,05	79,83
Taux des œufs éclos morts (%)	8,81	2,29
Taux des œufs non éclos (%)	30,34	9,55
Taux de parasitisme (%)	6,79	8,33

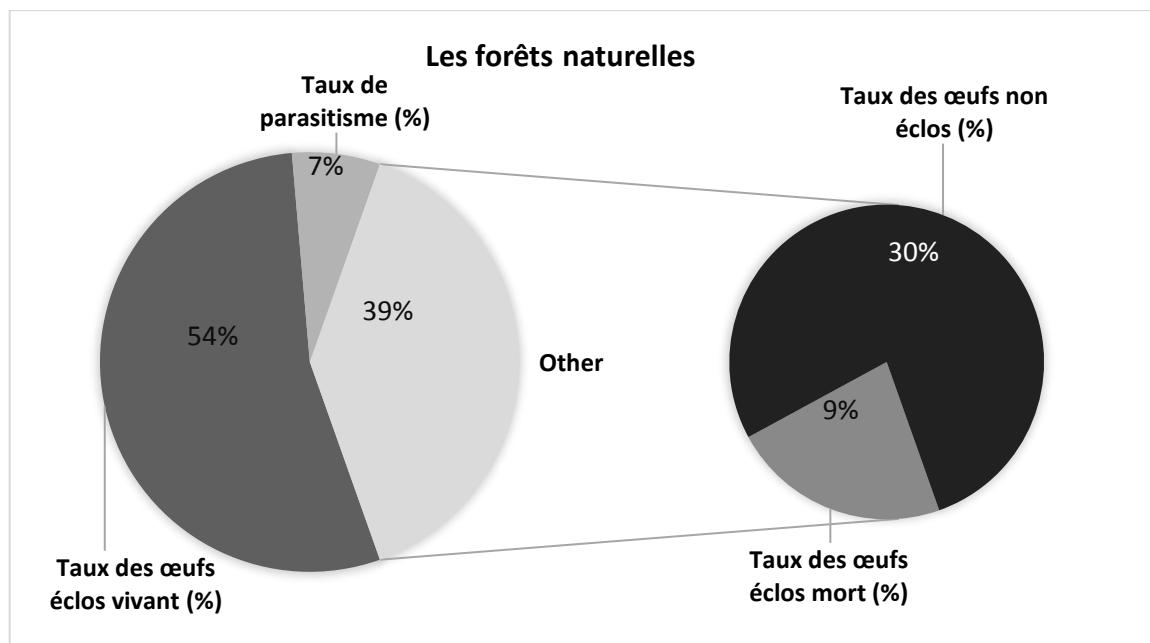


Figure 57. Représentation sectorielle des diverses catégories des œufs des pontes (Cas des forêts naturelles)

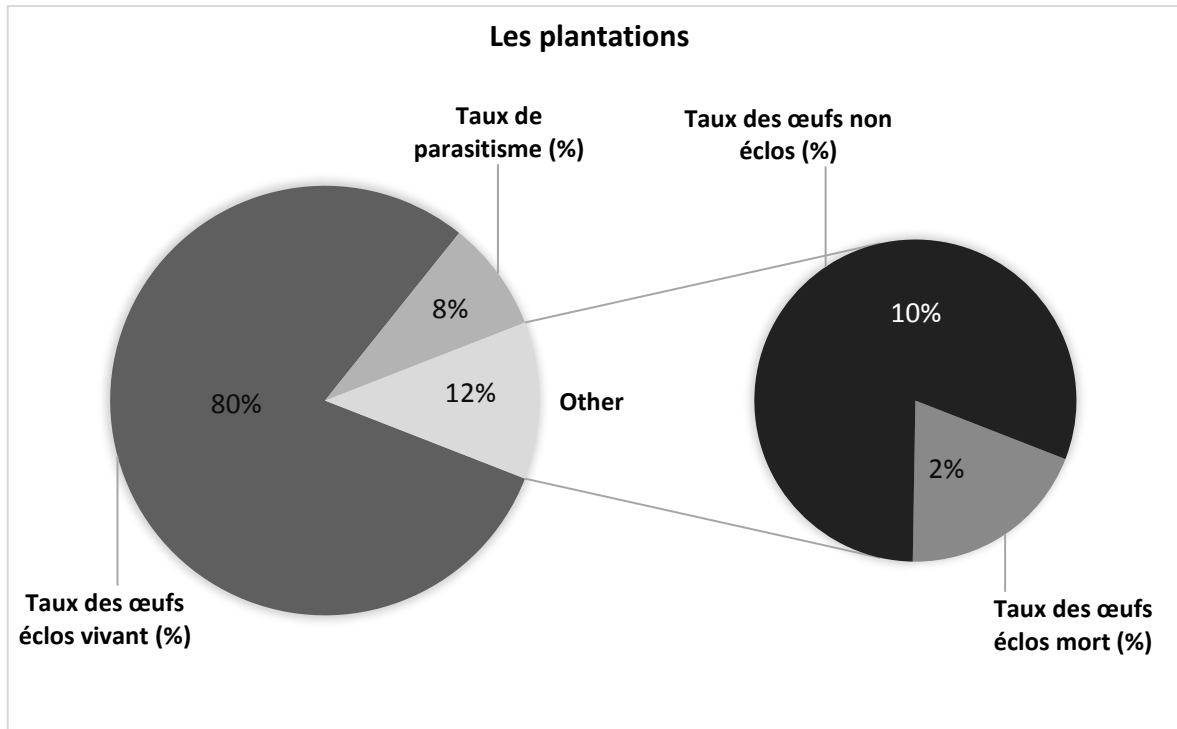


Figure 58. Représentation sectorielle des diverses catégories des œufs des pontes (Cas des reboisements)

Le nombre d'œufs éclos reste conséquent et significatif dans les reboisements et les pinèdes naturelles. Le fort succès à l'éclosion des chenilles est exprimé par un taux de 79,83 % dans les reboisements et 54,05 % dans les pinèdes naturelles sur un effectif global des œufs examinés. Morel (2008) dans son étude sur les pontes de la processionnaire du pin sur *Pinus sylvestris* et *Pinus nigra* dans le massif central en France, démontre un taux d'éclosion des œufs de l'ordre de 88 %. La mortalité naturelle des larves à l'intérieur des œufs est plus importante dans les pinèdes naturelles (10 %) par contre dans les reboisements est plus faible (3 %). Ces résultats sont comparables à ceux d'Imbert, (2012) qui mentionne un taux variable de 2 à 12 %. Le taux de parasitisme dans les deux reboisements est de l'ordre de 8 % et de 7 % dans les pinèdes naturelles. Par ailleurs le taux des œufs non éclos avoisine 10 % dans les reboisements et s'élève à 30 % dans les pinèdes naturelles. Ces résultats sont moins significatifs que ceux mentionnés par Arkam (2011), qui note 10,18 % et 19,42 % dans le même reboisement de Moudjbara et la pinède naturelle de Senalba. De même, El-Mokhfi (2016) note une valeur moins importante des œufs non-éclos pour les populations de cèdre (Theniet El Had, Chréa et Chélia) et une valeur plus élevée a été reportée pour la population de Chréa. Cette variabilité reste très discutable.

Pour comprendre et expliquer le taux élevé des mortalités noté dans les pinèdes naturelles, on a essayé d'étudier les facteurs qui peuvent influencer la mortalité des chenilles ; l'effet de parasitisme et l'effet de la structure des plantes hôtes.

4. Éclosion et mortalité des chenilles de processionnaire

La quantification des larves émergentes et mortes à l'intérieur des œufs est regroupées dans le tableau 21. La figure 59 illustre des cas de chenilles mortes à l'éclosion

Tableau 21. Dénombrement des larves (L1) de pontes

Stations	Forêts naturelles		Plantations	
	Vivantes	Mortes	Vivantes	Mortes
Nbre total de larves	2834	450	7966	296
Nbre moyen de larves	134,6	11,83	131,66	3,07
Valeurs extrêmes	9 – 170	0 – 133	18 – 198	0 - 34



Figure 59. Cas des larves mortes à l'intérieur de l'œuf

Sur l'effectif global des échantillons analysés, les nombres moyens de larves mortes sont variables d'un biotope à un autre. Le taux de mortalité naturel des embryons de la processionnaire du pin enregistré est de 12 % en moyenne pour les pinèdes naturelles et de

3 % pour les reboisements. Ces résultats authentifient celui d'Imbert (2012) obtenu dans la zone néo-colonisée et la zone cœur dans le massif central en France, où le taux de mortalité naturel des larves varie en moyenne de 2,82 à 12,24 % et les populations de la zone cœur ont un taux de mortalité naturelle qui est significativement plus élevé que les populations des zones Néo-colonisées. Les aiguilles examinées à partir des pinèdes naturelles sont courtes et n'offrent pas un support idéal pour la ponte, les œufs des pontes collectés à partir de ces sites naturels sont compacts ce qui peut impacter sur le taux d'efficacité des survies de larves.

5. Les parasitoïdes et leur fréquence

5.1. Émergence des parasitoïdes

Deux parasites oophages actifs ont été identifiés sur les pontes de la processionnaire dans les deux biotopes considérés ; il s'agit de, *Baryscapus servadeii* qui est considéré comme un spécialiste de l'essence hôte et d'*Ooencyrtus pityocampae* considéré comme un généraliste polyphage. Les mêmes résultats ont été trouvés en Algérie au Mont. Orest, Bouhman par Tsankov *et al.* (1995), en Italie par Tibéri (1990), Maroc par Schmidt *et al.* (1997), en Portugal par Mirchev & Tsankov (2000), en Turquie par Mirchev *et al.* (2004), en Grec par Mirchev *et al.* (2010) et en en Bosnie. Herzégovine par Mirchev *et al.* (2015).

La température a une action directe sur l'émergence des parasitoïdes ($F_{16, 440} = 38,88$, $P < 0,0001$). Les taux importants d'émergence des deux parasitoïdes ont été observés à une température variante entre 22 et 25 ° C, soit 79,98 et 78,92 % en 2013, 74,86 et 72,38 % en 2014, respectivement. Les parasitoïdes sont significativement présents en 2013 par rapport à 2014 ($F_{2, 220} = 30,97$, $p < 0,0001$) (Tableau 22 ; Fig.60).

Tableau 22. L'effet des températures journalières sur l'émergence des parasitoïdes

2013		
T(C°)	Emergence <i>O. pitocampae</i> (%)	Emergence <i>B. servadeii</i> (%)
19	2,74 ± 2,8c	2,36 ± 3,5c
22	43,49 ± 2,40a	40,94 ± 11,38a
26	39,04 ± 2,79a	35,43 ± 8a
27	8,22 ± 1,77b	10,24 ± 4,51b
28	5,82 ± 1,39bc	9,25 ± 5,14bc
30	0,68 ± 0,1c	1,18 ± 1,10c
32	00c	0,59 ± 0,45c
2014		
	Emergence <i>O. pitocampae</i> (%)	Emergence <i>B. servadeii</i> (%)
19	12 ± 1,58b	9,08 ± 2,38b
20	16,44 ± 2,34b	15,23 ± 2,21b
22	40 ± 3,81a	34,86 ± 5,25a
25	31,56 ± 4a	40,82 ± 3,49a

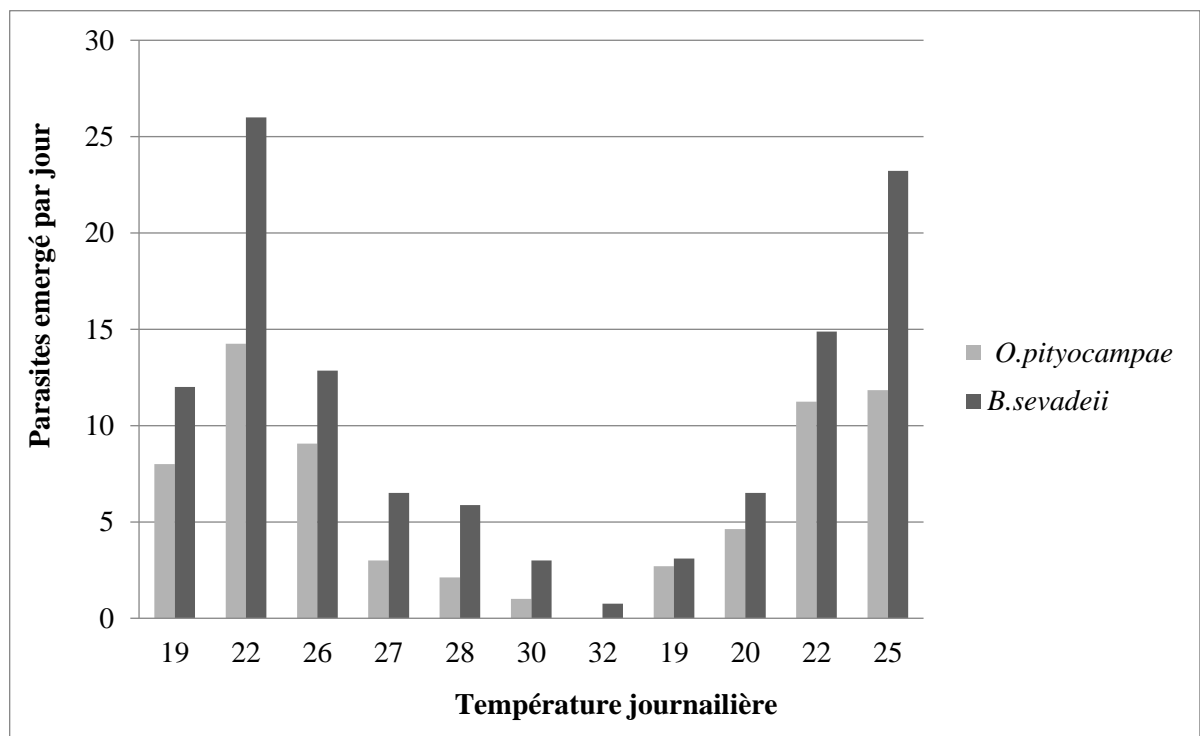


Figure 60. Émergence des parasitoïdes en fonction de la variation des températures journalières.

Les températures 22 °C et 25 °C sont considérées comme les températures les plus favorables pour l'émergence des parasitoïdes embryonnaires de la processionnaire du pin. A ce sujet, Mirchev *et al.* (2012) notent que *O. pityocampae* est plus sensible aux températures supérieures à certaines limites.

Le contrôle des émergences des parasitoïdes a concerné les parasites actifs, *B. servadeii* et *O. pityocampae*. L'émergence de ces deux parasitoïdes est illustrées dans les figures 61 et 62.

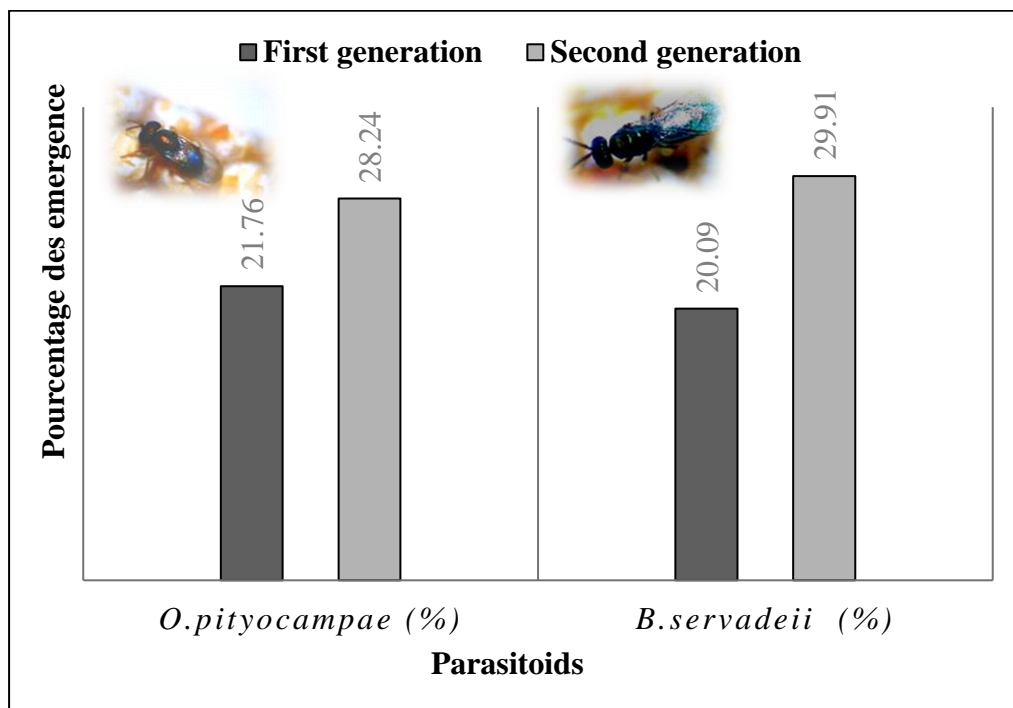


Figure 61. Taux d'émergence des parasitoïdes dans les sites prospectés

La dynamique de la population de *B. servadeii* évolue plus significativement par rapport à *O. pityocampae*. L'émergence des deux antagonistes s'est échelonnée en parfaite synchronisation. Les deux espèces de parasitoïdes n'ont pas un pic d'émergence simultané.

L'émergence des parasitoïdes a diminué lorsque la température dépasse 30 C°. Le parasitoïde spécialiste est plus sensible que le parasitoïde généraliste, en 2013 et 2014. Les émergences de parasitoïde *O. pityocampae* de la première génération ont été notées entre les mois d'aout et septembre. Pour la seconde génération, les émergences ont été notées

entre les mois de mai et avril. Il apparait donc que la période de vol de la génération de parasitoïde polyphage, *O. pityocampae* est en parfaite synchronisation avec l'apparition des papillons de l'espèce *T. pityocampa* évoluant sur pin d'Alep. Cette stratégie d'occupation mérite plus d'investigation pour tirer plus d'informations fiables sur la dynamique de cet auxiliaire en zone semi-aride.

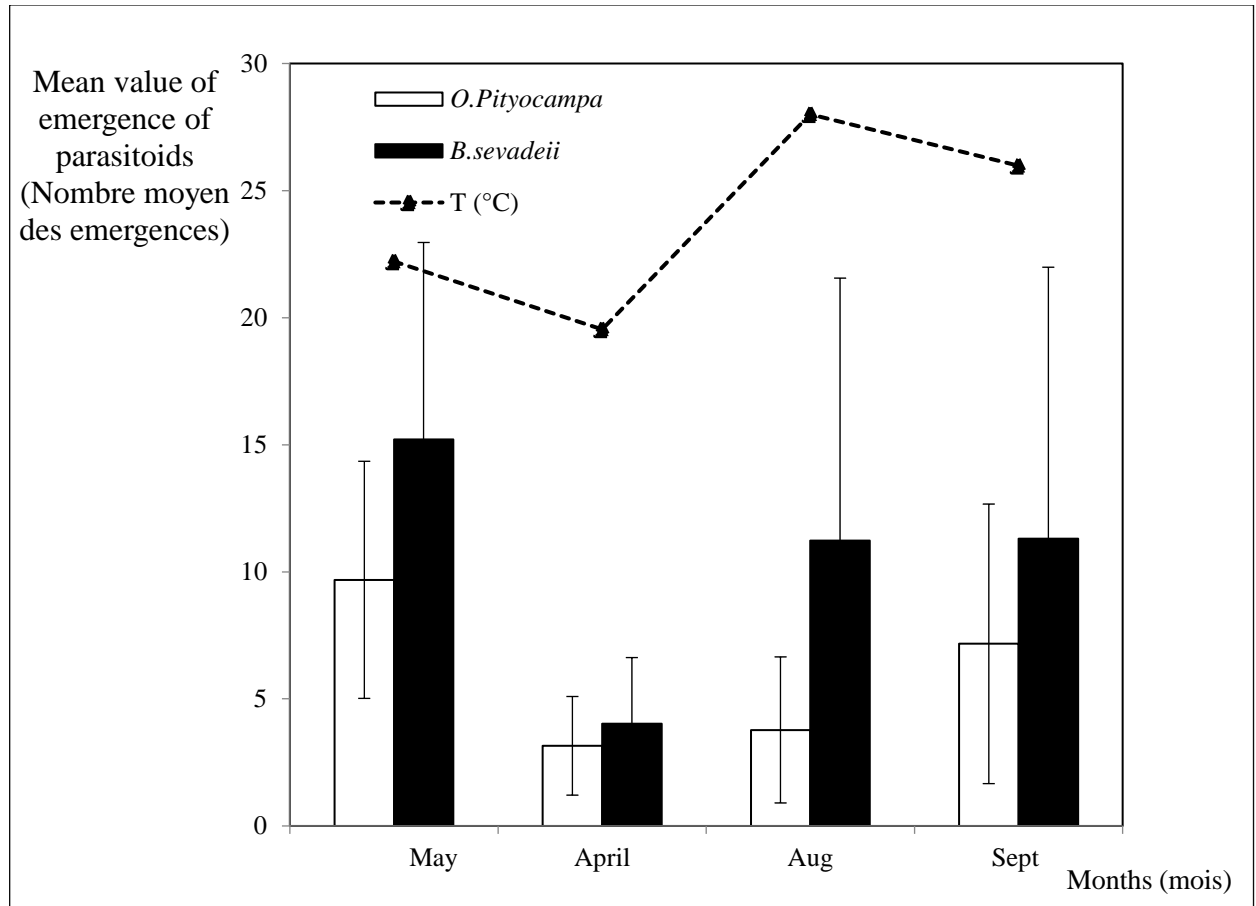


Figure 62. Nombre moyen mensuel des émergences au cours du temps (2013 et 2014)

Le nombre moyen de parasitoïdes émergeant par jour est de $7,12 + 5$ pour *O. pityocampae* et de $12 + 6,3$ pour *B. sevadeii* variant respectivement de 0 à un maximum de 20 et de 0 à 45. Les valeurs les plus basses ont été enregistrées en avril, les plus élevées en mai pour les deux parasitoïdes avec une différence hautement significative ($F_{6,436} = 20,14$, $P < 0,0001$).

Les températures moyennes quotidiennes vont d'un de minimum de 19 ° C au maximum de 32 ° C. L'émergence de *O. pityocampae* et de *B. servadeii* au cours des quatre mois diffère de manière significative en fonction des valeurs de variation de la température ($F_{16,436} = 36,96$, $P < 0,0001$).

5.2. Analyse globale du parasitisme

Sur l'ensemble des pontes contrôlées deux parasitoïdes ont émergé, il s'agit de *Baryscapus servadeii* et *Ooencyrtus pityocampae*. Le tableau 23 regroupe les taux de parasitisme relatifs à chaque espèce.

Tableau 23. Fréquence des parasitoïdes dans les régions prospectées

Stations	Plantations		Pinèdes naturelles	
	<i>B. servadeii</i>	<i>O. pityocampae</i>	<i>B. servadeii</i>	<i>O. pityocampae</i>
Effectif des pontes parasitées	56	16	41	18
Fréquence de présence (%)	69,71	20,79	71,58	23,75

Le parasitoïde spécifique de la processionnaire *Baryscapus servadeii* est présent en majorité dans les quatre stations avec une fréquence de présence de l'ordre de 70 % dans chaque site. La fréquence de l'espèce polyphage, *Ooencyrtus pityocampae* oscille entre 21 et 24 % respectivement dans les reboisements et les pinèdes naturelles. Ces résultats restent comparables avec ceux d'Imbert (2012) qui mentionne 30 à 40 % de parasitisme par *Ooencyrtus pityocampae* et 65 à 70 % pour *Baryscapus servadeii* cela dépend de l'écotype et de l'année d'échantillonnage. Des études précédentes sur d'autres Lépidoptères en expansion ont montré la forte relation entre le taux de parasitisme, la richesse spécifique des parasitoïdes et la date de colonisation du milieu par leur hôte (Grobler et Lewis, 2008 ; Grabenweger *et al.*, 2010).

5.3. Importance et répartition du parasitisme sur la surface des pontes

Le nombre des œufs parasités est plus significatif aux deux extrémités (P1 et P3) pour les deux biotopes prospectés. Le pourcentage de parasitisme sur chaque position de la ponte est illustré par la figure 63.

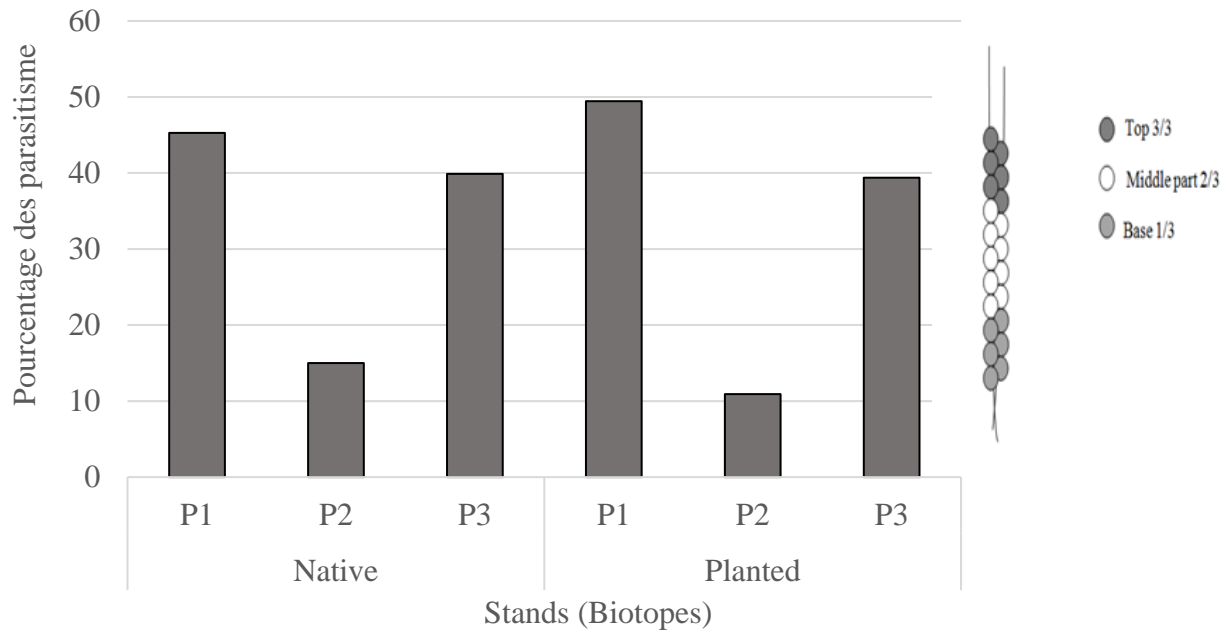


Figure 63. Répartition des parasitoïdes sur la surface de la ponte (P1 partie basal, P2 partie médiane, P3 partie apicale)

La comparaison des moyennes du nombre de parasites aux trois positions de la ponte montre une signification au seuil ($p=0,079$) entre les deux biotopes prospectés. Le nombre de parasites est plus conséquent aux deux extrémités de la ponte. A ce sujet Arnaldo et Torres, (2006) notent que les différents hôtes de la processionnaire du pin ont une morphologie d'aiguilles différente qui va influencer sur la structure des pontes de processionnaire du pin et sur les espèces de parasitoïdes associés.

6. Relation entre la structure de la plant hôte et la mortalité de la processionnaire

Plusieurs recherches ont été effectuées sur l'effet de la plante hôte sur le potentiel reproductif des femelles. Dans cette étude, on a remarqué que le taux de mortalité est plus élevé en pinèdes naturelles, les conditions environnementales des sites naturels et des sites reboisés peuvent expliquer le taux des œufs non éclos. Une investigation sur un plus grand nombre de ponte et sur d'autres sites à l'échelle nationale serait intéressante pour confirmation et de tirer plus de renseignements sur les variables qui conditionnent les éclosions de pontes.

La relation entre la structure des aiguilles du pin et la mortalité embryonnaire en provenance des sites naturels et reboisements a été étudiée par des analyses des modèles mixtes en utilisant le logiciel R « nlme packages » (Fig. 64).

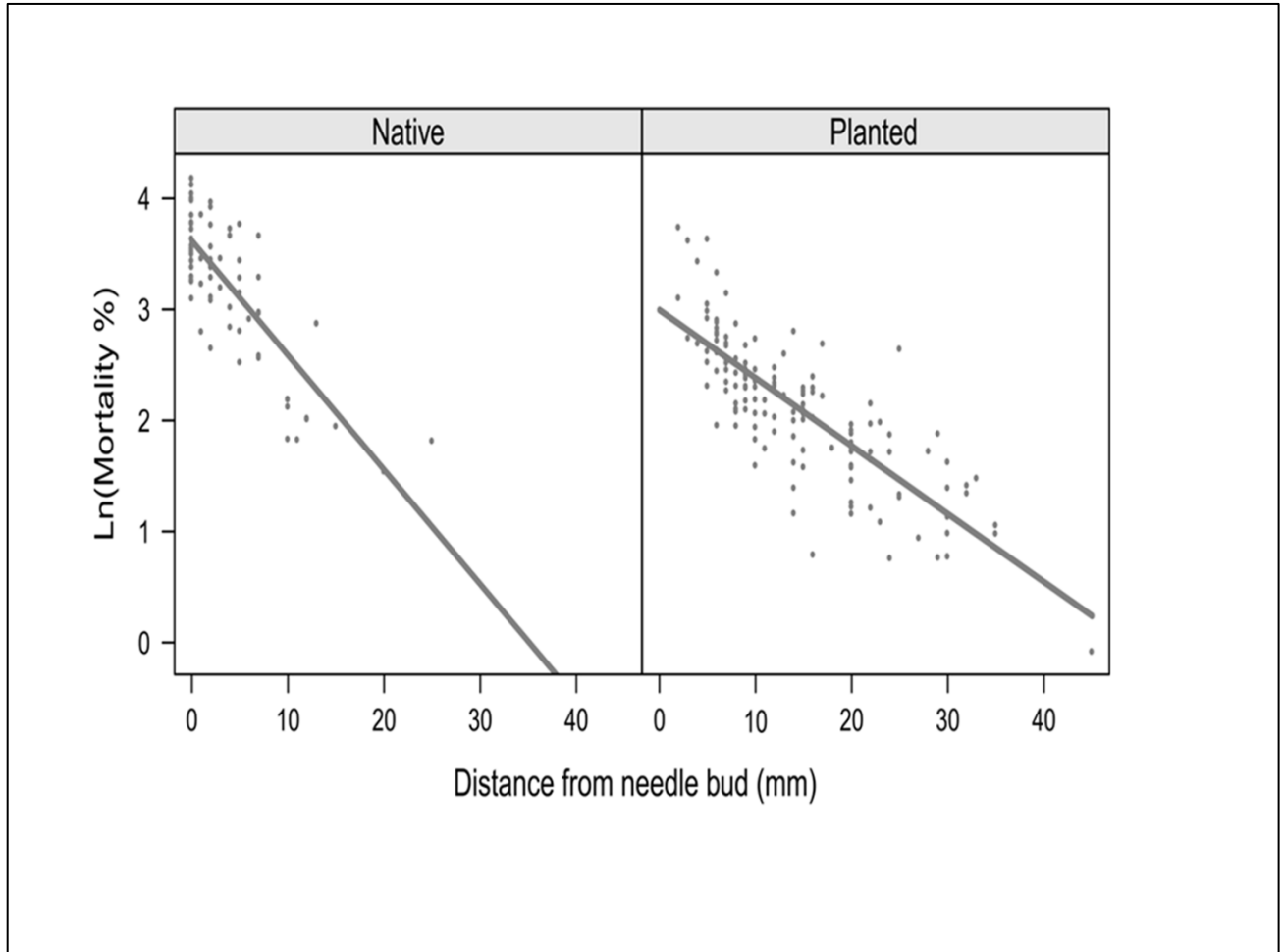


Figure 64. Relations entre le nombre d'œufs non éclos et la distance entre le bouton d'aiguille et le début du lot d'œufs dans les deux biotopes

La mortalité des œufs de *T. pityocampa* diminue lorsque les œufs pondus sont éloignés de l'extrémité de l'aiguille du pin d'Alep, cas des reboisements. Comme les femelles réagissent aux petites variations de diamètre des aiguilles et inspectent les aiguilles de pin à partir de la base (Démolin, 1969), il est probable qu'elles ont trouvé des conditions optimales pour la ponte à distance de la base avec des aiguilles plus longues. Les aiguilles du pin des reboisements sont plus longues mais le nombre d'œufs pondus par les femelles de la processionnaire est comparable avec celles des forêts naturelles. De même, Pimentel *et al.* (2010) ont également constaté que la morphologie des aiguilles affecte la longueur des pontes.

Sur la base des données recueillies, la position des œufs sur les aiguilles a eu certains effets sur les performances de la processionnaire du pin. La mortalité est généralement plus élevée dans les lots d'œufs pondus plus près de la base des aiguilles, quel que soit le type de peuplement.

Les effets plus importants de la mortalité observée dans les forêts naturelles sont probablement dus aux caractéristiques des aiguilles qui sont plus courtes et plus épaisses dans ce biotope, qui rendent le lot d'œufs plus compact et plus proche du bourgeon de l'aiguille. Le parasitisme n'a eu aucun effet significatif sur les taux de mortalité de *T. pityocampa* dans les deux peuplements. Une explication probable de cette mortalité observée est constituée par les conditions abiotiques pouvant compromettre le développement embryonnaire et l'éclosion des œufs. Milani (1990) a observé que les écailles pouvaient aider à capter le rayonnement solaire et à augmenter de manière significative la température des œufs, comparativement aux pontes à l'ombre ou aux pontes sans écailles.

Sur la base de ces observations, la position des œufs sur les aiguilles peut influencer sur la quantité de rayonnement solaire reçue et entraîner ainsi des températures variables. Il est connu que la température affecte le développement embryonnaire chez la processionnaire du pin et des différences sont déjà détectées parmi les populations (Santos *et al.* 2011). Par conséquent, la structure de la ponte peut affecter la survie des œufs dans cette population située à la limite sud de l'aire de répartition dans des conditions assez extrêmes. La mesure de la température des œufs dans les peuplements naturels et artificiels est une nécessité pour établir les causes de la différence des taux de mortalité.

7. Relation entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs

La figure 65 illustre les corrélations entre la longueur des pontes et le nombre d'œufs pour les deux biotopes prospectés

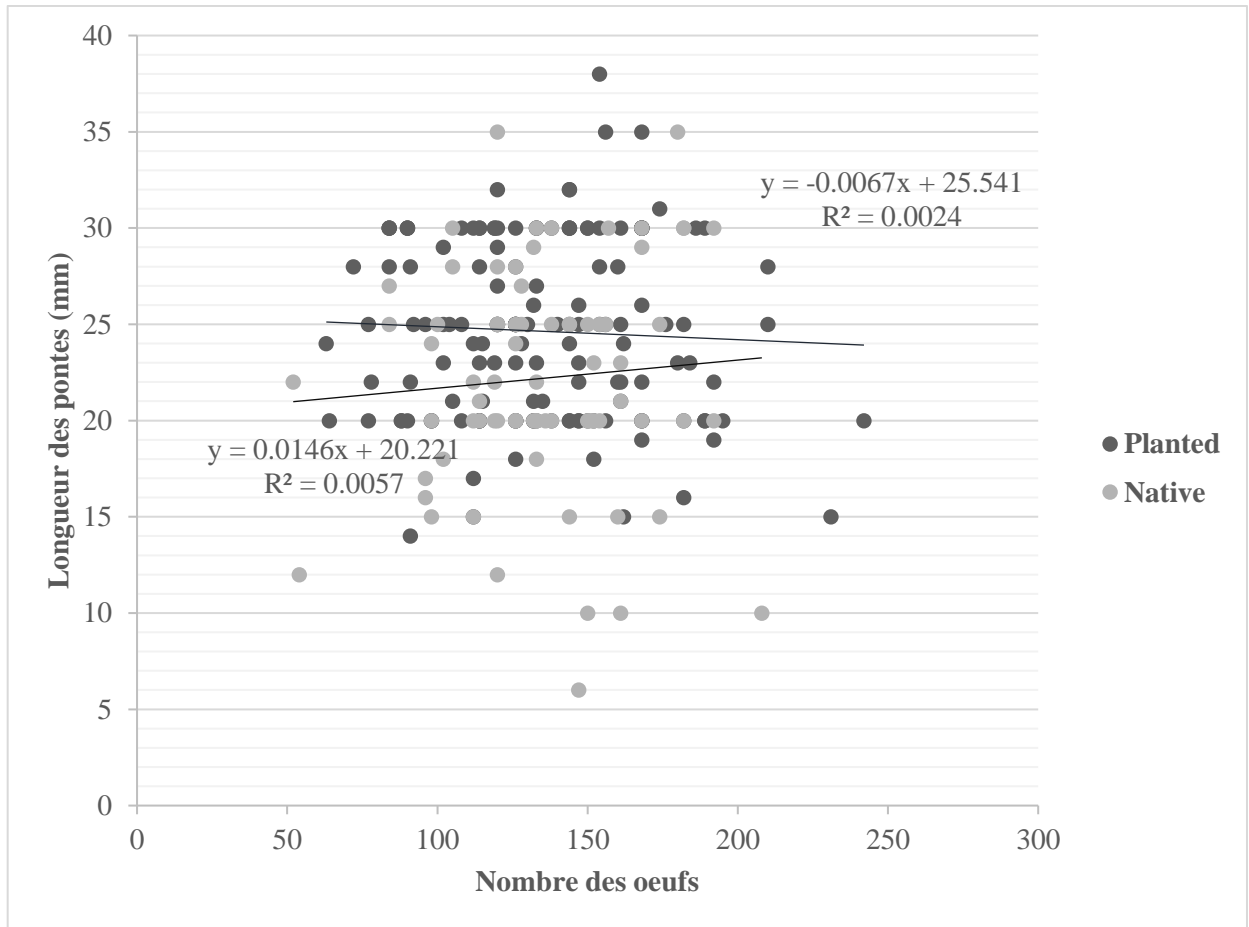


Figure 65. Relation entre la longueur des pontes et le nombre d’œufs pondus par les femelles de la processionnaire

L’analyse de la régression linéaire ne montre pas une corrélation significative entre la longueur des pontes et le nombre d’œufs ($R^2 = 0,006$) et ($R^2 = 0,002$) pour les reboisements et les forêts naturelles respectivement. Contrairement, Rahim (2016) note une corrélation très hautement significative pour les populations de la processionnaire d’été qui attaque le cèdre d’Atlas. A ce sujet Pimentel *et al.* (2010) ont montré une différence au niveau de la morphologie des pontes de processionnaire du pin corrélée avec la latitude. Dans leur investigation la latitude influence la longueur des pontes et le nombre d’œufs pondus par femelle. La différence observée serait donc liée à la répartition des hôtes potentiels et à la morphologie de leurs aiguilles.

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. La figure 66 présente la relation entre les deux variables considérées.

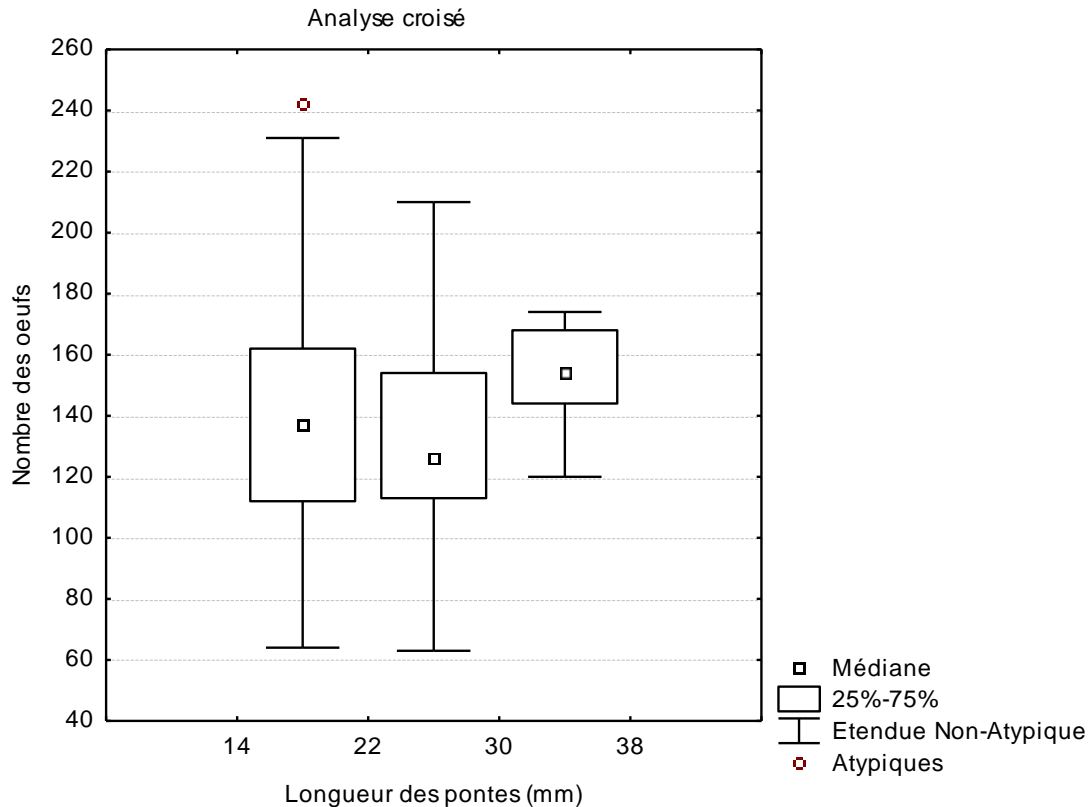


Figure 66. Distribution du nombre d’œufs en fonction de la longueur des pontes dans les reboisements prospectés

A la première catégorie de longueurs comprise entre 14 et 22 mm, la valeur médiane est de 137 œufs/femelle ponduse avec une grande variabilité de part et d’autre. Par ailleurs, 50 % de la population de cette catégorie de femelles pondent de 100 à 160 œufs/femelle. Si nous considérons la seconde catégorie de longueurs des pontes comprise entre 22 et 30 mm, 50 % de la population effectue une émission entre 112 et 152 œufs/ femelle avec une valeur médiane de 124 œufs/ femelle. Une variabilité conséquente et notée pour cette classe de femelles ponduses. La troisième catégorie des femelles ayant des pontes de 30 à 38 mm, 50 % de la population de cette catégorie pondent de 142 à 169 œufs/ femelle avec une variabilité plus limitée que précédemment

Les rapports des analyses croisées entre les longueurs des pontes et le nombre d’œufs en forêts naturelles sont illustrés par la figure 67.

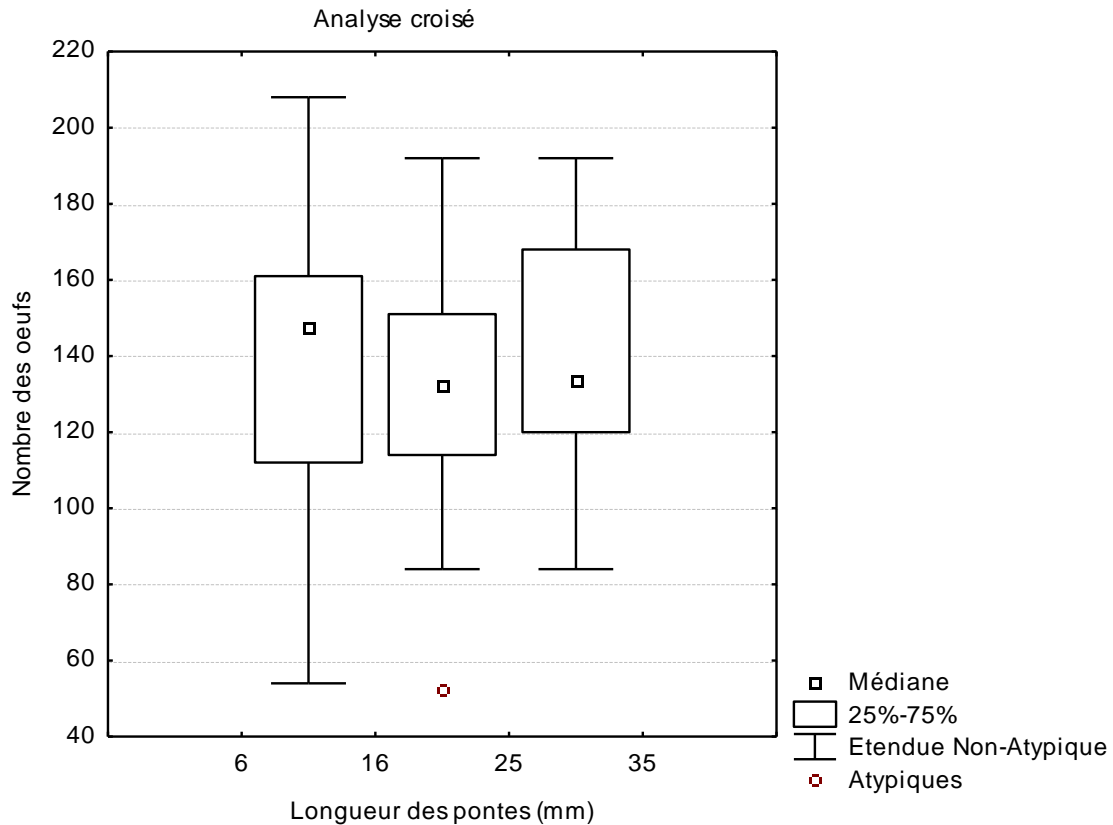


Figure 67. Distribution du nombre d'œufs en fonction de la longueur des pontes dans les forêts naturelles

A la première catégorie des longueurs comprises entre 6 et 16 mm, la valeur médiane est de 150 œufs/femelle ponduse avec une grande variabilité de part et d'autre. Par ailleurs, 50 % de la population de cette catégorie de femelles pondent de 118 à 160 œufs/femelle. Si nous considérons la seconde catégorie des longueurs des pontes comprises entre 16 et 25 m, 50 % de la population effectue une émission entre 118 et 150 œufs/ femelle avec une valeur médiane de 130 œufs/ femelle. Une variabilité conséquente et notée pour cette classe de femelles ponduses. La troisième catégorie des femelles ayant des pontes de 25 à 35 mm, 50 % de la population de cette catégorie pondent de 120 à 165 œufs/ femelle avec une variabilité maximale dépassant 190 œufs/femelle et minimale de 82 œufs/femelle.

8.Synthèse des données phytochimiques

L'existence de liens physiques et chimiques entre insectes et plantes a été reconnue dès le début du XX^e siècle (Richardson, 1925 in Robert 1986). L'identification du végétal-hôte par les femelles ponduses des insectes phytophages perçues à distance de la plante-hôte par des odeurs typiques (Robert, 1986).

L'hypothèse d'une barrière chimique à la colonisation de l'arbre hôte suggère que les insectes qui repèrent leur hôte par certains composés volatiles (Dulaurant, 2012), le même auteur note que dans les peuplements mixtes, le signal olfactif émis est donc plus complexe que dans les peuplements purs. A ce propos, Jactel *et al.* (2015) note que la plante hôte sélectionnée par la processionnaire du pin implique une large gamme d'indices physiques et chimiques agissant à différentes échelles spatiales et temporelles.

Les réactions de caractérisation ont permis de mettre en évidence plusieurs groupes chimiques dans la poudre des aiguilles de *Pinus halepensis*. Nous avons recherché dans les feuilles de l'espèce *Pinus halepensis* les principales classes des métabolismes secondaires, à savoir alcaloïdes, saponines, tanins, et flavonoïde. Le tableau 24 présente les résultats obtenus.

Tableau 24. Résultats des réactions de caractérisation de la poudre des aiguilles de pin d'Alep

Recherche	Coloration	Interprétation
Cas Reboisement aiguilles sans pontes (peuplement pur)		
Tanins catéchiques : Réaction de Stiasny	Précipité Brun verdâtre	++
Tanins galliques : Réaction de Stiasny	Bleu-noirâtre	++
Flavonoïdes	Jaune clair	++
Sponines	Mousse persistante	++
Alcaloïdes	Négative	-
Caroténoïdes	Bleue	+
Oses et holosides	Rouge	++
Hétérosides triterpéniques	Anneau rouge- brunâtre	+++
Terpènes et stérols	Cercle marron	++
Cas Reboisement aiguilles support des pontes (peuplement pur)		
Tanins catéchiques : Réaction de Stiasny	Précipité brun verdâtre	++
Tanins galliques : Réaction de Stiasny	Bleu-noirâtre	++

Flavonoïdes	Jaune clair	+++
Sponines	Mousse persistante	++
Alcaloïdes	Négative	-
Caroténoïdes	Bleue	+
Oses et holosides	Rouge	++
Cas des aiguilles des forêts naturelles sans pontes (peuplement mixte)		
Tanins catéchiques : Réaction de Stiasny	Précipité rouge clair	++
Tanins galliques : Réaction de Stiasny	Bleu-noir	++
Flavonoïdes	Couche claire dans la partie supérieure du tube	++
Sponines	Mousse visible	+
Alcaloïdes	Négative	-
Caroténoïdes	Bleue	+
Oses et holosides	Rouge	++
Cas des aiguilles des forêts naturelles support des pontes (peuplement mixte)		
Tanins catéchiques : Réaction de Stiasny	Précipité brun	++
Tanins galliques : Réaction de Stiasny	Bleue-noirâtre	+++
Flavonoïdes	Changement de couleur	+++
Sponines	Mousse visible	++
Alcaloïdes	Négative	-
Caroténoïdes	Bleue	+
Oses et holosides	Rouge	++

Les résultats sont exprimés selon :

(+++) : Réaction positive

(++) : Réaction moyennement positive

(+) : Traces

La phytochimie qualitative basée sur des réactions colorées ou des précipitations par des réactifs chimiques spécifiques réalisée sur les extraits reconstitués à partir de la poudre

lyophilisée de chaque échantillon végétal génère pour une première estimation des données préliminaires sur les constituants des extraits.

Le signe “+” traduit la présence du groupe de composés chimiques en quantité supérieure au seuil de détection, et le signe “-” une réaction négative. Il révèle la présence ou l’absence d’un groupe de métabolite secondaire.

Les tests phytochimiques ont révélé que :

- La présence d’une forte teneur en tannins et flavonoïdes pour les aiguilles support des pontes de la processionnaire du pin
- La présence de terpènes et stérols en quantité moyennement riche dans les tous les aiguilles.
- Les saponines sont présentes pour les aiguilles support des pontes des reboisements moyennement riche.
- Pour le teste des alcaloïdes aucun précipité n’a été observé pour l’extrait des aiguilles de pin d’Alep donc absence des Alcaloïdes

A ce sujet, Amari et Mechouche (2017) notent que l’extrait phénolique de la résine de *P. halepensis* constitue une source importante en composés phénolique. Des teneurs relativement élevées ont été enregistrées en phénols totaux ($232 \pm 12,72$ mg EAG/ gE), en flavonoïdes ($91,81 \pm 2,66$ mg EQ/ gE) et en proanthocyanidines ($607,73 \pm 19,28$ mg EC/ gE), confirmant ainsi ce qu’a été déjà supposé concernant sa richesse en composés phénoliques. La différence d’un certain nombre de facteurs intrinsèques et extrinsèques à savoir les conditions de croissance, le processus de maturation, les techniques d’échantillonnage et les conditions de stockage (Bergonzi *et al.*, 2001), les facteurs climatiques et environnementaux : la zone géographique, sécheresse, sol, la méthode d’extraction et de quantification peuvent influencer les résultats obtenus.

Les flavonoïdes présentent de nombreuses activités ; antioxydantes, anti-inflammatoires, inhibitrices d’enzymes (Sharma *et al.*, 2008).

Les tanins favorisent la régénération des tissus en cas de blessures superficielles ou de brûlures. Ils ont un effet vasoconstricteur sur les petits vaisseaux superficiels. D’une façon générale, ce sont des inhibiteurs enzymatiques. Certains tanins, aux structures voisines de

celles des flavonoïdes, ont des propriétés vitaminiques (protecteur capillaire) (Roux *et al.*, 2007).

Sur la base des propriétés de flavonoïdes et de tanins, les femelles de la processionnaire du pin choisissent les aiguilles du pin qui offrent les meilleures conditions pour leur descendance. Par ailleurs, certains flavonoïdes peuvent parfois avoir un rôle attractif pour les papillons, c'est alors la présence et la teneur en différents glycosides qui attirent la femelle du papillon. La femelle de la processionnaire du pin repère les reboisements purs du pin d'Alep facilement que les pinèdes naturelles mixtes par des signaux olfactifs qui rendent plus difficile le repérage de l'essence hôte dans les biotopes naturels mixtes. Ces idées restent à développer davantage par d'autres investigations de recherches.

9. Chronologie des écophases et évolution temporelle du cycle

Le cycle de vie de la processionnaire est généralement annuel mais peut s'étendre sur plusieurs années selon les conditions climatiques, montrant une forte variabilité de la phénologie de la processionnaire en fonction de la latitude et de l'altitude et la température (Démolin 1974). Un décalage temporel du cycle évolutif a été remarqué dans les régions semi-arides. La durée du développement larvaire dépend des conditions environnementales (et de l'hôte) et la date de procession est conditionnée par la date de ponte et la chronologie de développement larvaire. La synthèse des diverses écophases du cycle au cours du temps est représentée par la figure 68.

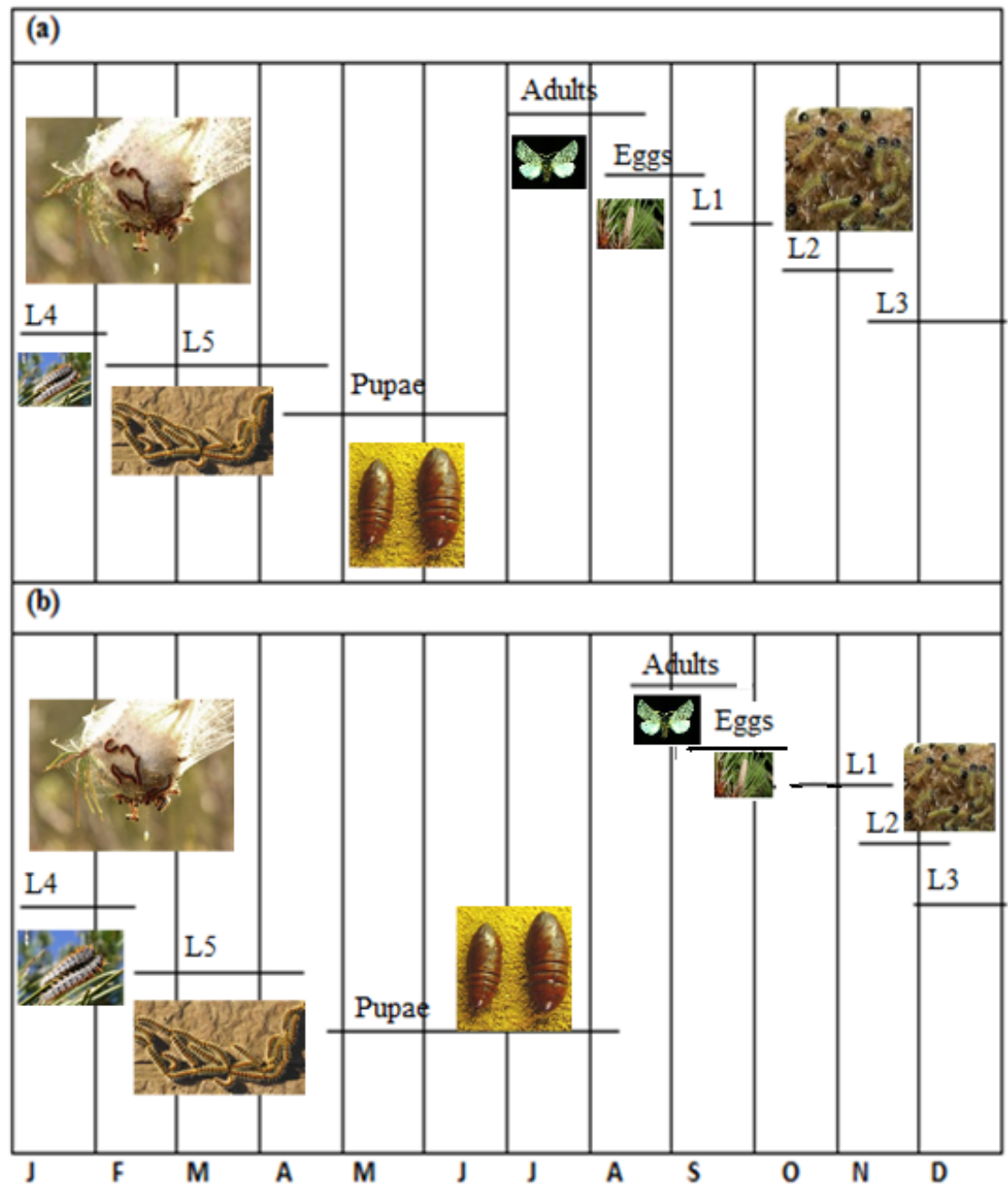
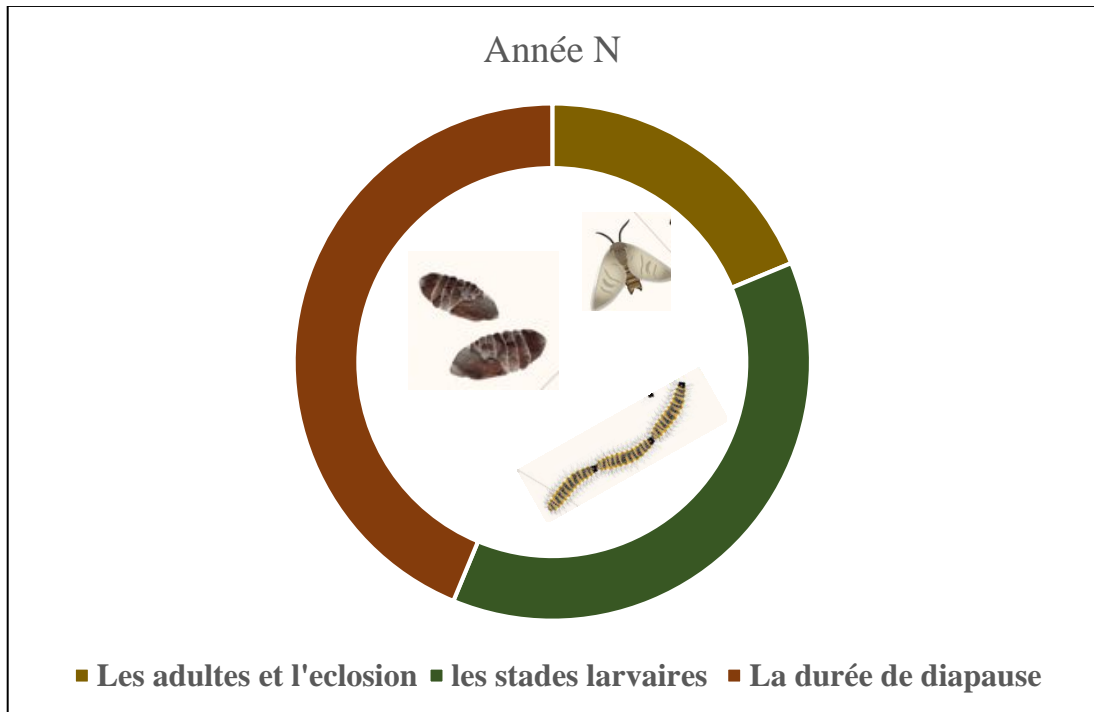


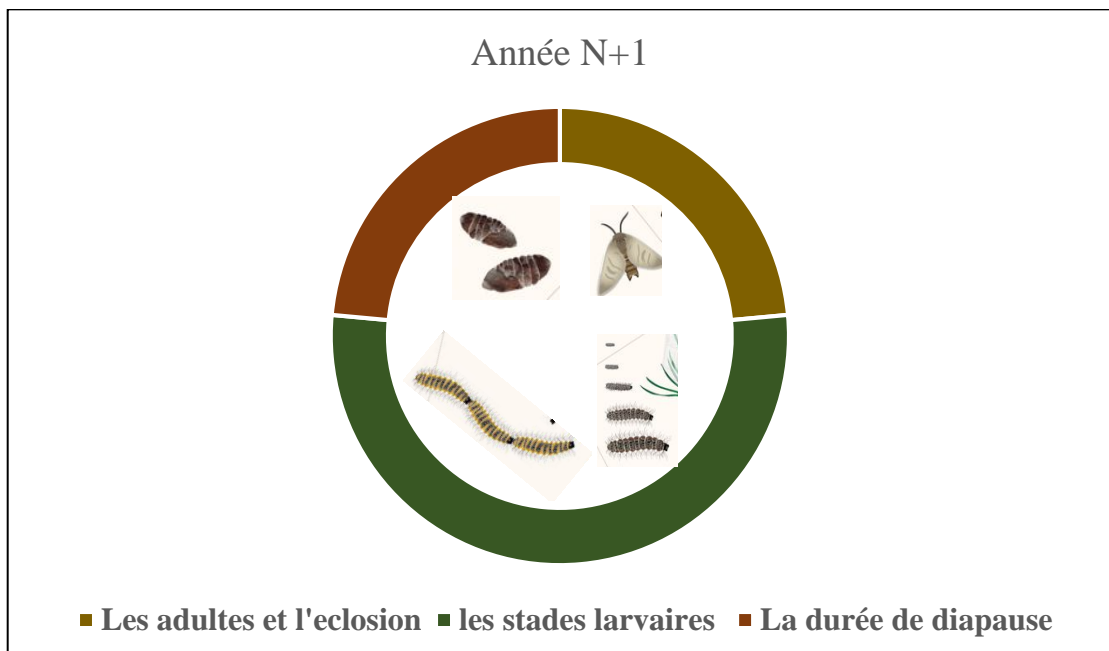
Figure 68. Chronologie temporelle du cycle évolutif de la processionnaire du pin dans le barrage vert (a) en 2012 et (b) en 2018

La sortie des adultes pourra être retardée et le cycle de développement pourra être déclenché selon les températures journalières, à ce sujet, Démolin et Rive (1968) notent que les dates d'émergence des adultes sont variables suivant l'altitude et la latitude. Ce cas est général

pour toute l'aire d'extension de l'espèce. Chaque année les adultes de la processionnaire du pin dans la région semi-aride de Djelfa émergent de plus en plus en retard (Fig.69 a et b).



(a)



(b)

Figure 69. Évolution du cycle biologique de la processionnaire en zone semi-aride

10.Stratégie d'occupation

L'insecte marque sa présence plus dans les reboisements que dans les pinèdes naturelles. Une stratégie de migration des populations s'effectue au cours du temps entre les deux milieux, naturel et artificiel. Les conditions environnementales des reboisements en zones semi-arides rendent plus facile l'extension et l'expansion de la processionnaire du pin dans son aire de répartition. La région de Djelfa a un climat semi-aride caractérisé par une sécheresse estivale récurrente un hiver froid et les moyennes des précipitations qui varient en fonction des altitudes qui caractérisent chaque station. Zamoum, (1998) note que les déficits thermiques induisent en effet dans la nature un comportement d'intense activité de tissage. Les populations construisant des nids denses et bien architecturés dans les conditions les plus favorables (Geri, 1980). A Djelfa les nids ne sont pas très développés ce qui permet de retenir que les chenilles à la fin de leur développement ne subissent pas la pression des températures minimales. Les stress abiotiques tels que la sécheresse, les feux ou le gel semblent ainsi augmenter la fragilité de l'arbre hôte à une défoliation (Davidson *et al.* 2001). En Italie nordique, au cours de 10 ans, son aire géographique s'est étendue en latitude et altitude probablement en réponse à l'augmentation des températures hivernales (Battisti *et al.* 2005, Robinet *et al.* 2007). La structure et l'âge de l'arbre ont une influence directe sur les pullulations de la processionnaire du pin. A ce sujet, Boege (2005) note que les jeunes arbres sont en effet souvent très réactifs à la défoliation l'importance de la taille de l'arbre hôte, les capacités de réserve carbonée et le rapport (biomasse des pousses / des racines) augmentent avec l'âge et la taille de l'arbre (Medhurst *et al.*, 1999) ce qui suggère une réponse différenciée à la défoliation en fonction de l'âge.

La structure des aiguilles reste un élément de choix dans la répartition de la processionnaire du pin. Les aiguilles tendres et fournie en éléments nutritifs sont les plus recherchées par les colonies de la processionnaire du pin. Comme chaque année des programmes de reboisements sont effectués dans les zones semi-arides, les populations de la processionnaire ont tendance à migrer et à prendre plus de l'extension. De même des populations peuvent revenir quelques années sur les mêmes sites qui se sont reconstitués.

La présence des sites naturels à proximité des reboisements sont des réservoirs qui alimentent au cours du temps ces derniers. Les adultes peuvent s'échapper et regagner facilement les parcelles reboisées en pin d'Alep.

11. Prédiction des extensions d'attaque

Les niveaux d'infestation de la processionnaire connaissent des phases de pullulation cycliques tous les 6 à 8 ans (Robinet 2006). Battisti (1988) note que dans un reboisement défolié par la génération précédente était ralenti du fait de déficit énergétique de ce dernier. Les populations de la processionnaire du pin ont tendance à migrer pour assurer une meilleure alimentation. De même les dernières études ont montré une adéquation entre les variations et les changements climatiques et l'extension du défoliateur vers le nord du bassin méditerranéen. Bien d'autres variables peuvent rentrer et conditionner la stratégie d'occupation de la processionnaire. La capacité de vols, estimée à 3 kilomètres pour les femelles et à 25 kilomètres pour les mâles assure le renforcement des populations dans divers sites de pins, particulièrement dans les reboisements du barrage vert qui reste menacé dans son ensemble par la processionnaire du pin. Sur la base des données recueillies, vraisemblablement les traitements répétés dans les reboisements ont conduit à une partie de la population de la processionnaire du pin à changer de stratégie d'occupation par une migration vers les sites d'origine et les plantations regarnis en forêts naturelles. Une investigation de recherche pourrait mieux expliquer cette hypothèse pour prédire le modèle de choix du défoliateur dans les peuplements de pin d'Alep. Tout un ensemble de variables environnementales doit être pris en considération pour une meilleure explication de la migration des populations entre les sites naturels et artificiels. L'évolution et l'occupation de la processionnaire du pin restent très complexes. Un modèle sur son extension et son expansion pourrait apporter des réponses prometteuses pour une meilleure gestion sylvicole en zones semi-arides.

12. Phénologie de la processionnaire, cas du barrage-vert (projet PCLIM)

En réponse au réchauffement climatique, la processionnaire du pin est une des espèces qui est en train d'étendre son aire de répartition en latitude et en altitude (Battisti *et al.*, 2005). Cette réponse contemporaine relativement rapide suggère que son aire de répartition a fortement évolué dans le passé en réponse aux fluctuations climatiques du pléistocène (Rousselet *et al.*, 2010).

La zone favorable au développement de la chenille a commencé à s'étendre. Autres facteurs clés permettant l'expansion de la processionnaire : sa nourriture préférée, les pins et cèdres, est présente dans tout le territoire, que ce soit sous forme de petites plantations ou d'arbres isolés.

A ce sujet, Roques *et al.* (2015) constate qu'aujourd'hui, c'est la majeure partie du la méditerranéen, du point de vue des températures, est favorable à la chenille. Si elle n'a pas encore tout envahi. Le laboratoire de l'unité de recherche Zoologie forestière laboratoire coordonne actuellement un réseau, appelé PCLIM réunit 80 chercheurs de 20 pays. L'objectif est d'apprécier les réponses adaptatives au changement climatique des processionnaires et de leurs organismes associés (Escalón, 2013).

La figure 70 présent la distribution de la processionnaire du pin en 2014 établie par l'équipe du projet PCLIM. A ce propos, nos relevés dans ce cadre témoignent d'une variabilité temporelle des stades larvaires en zone semi-aride selon les altitudes et l'exposition des sites prospectés

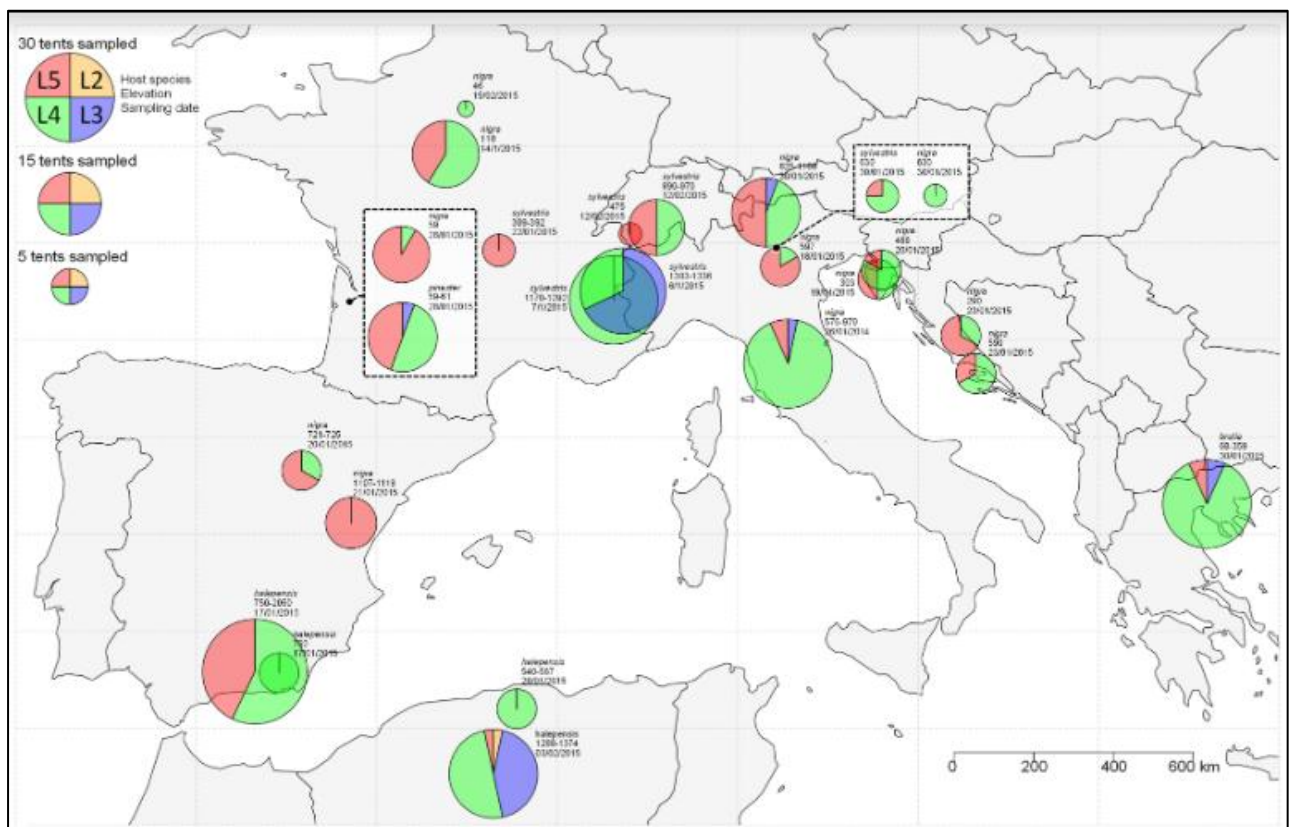


Figure 70. Evolution des populations de la processionnaire du pin en 2014. La carte présentée est fournie par l'équipe du projet PCLIM. A noter que la partie, relative à l'Algérie dérive de nos résultats récoltés en zone semi-aride (Barrage vert)

Sur la base de la méthodologie d'échantillonnage des chenilles de la processionnaire du pin proposée dans le cadre du projet « PCLIM » des investigations ont été conduites de

2014 à 2016, les résultats de degrés d'infestation durant ces années sont illustrés par la figure 71

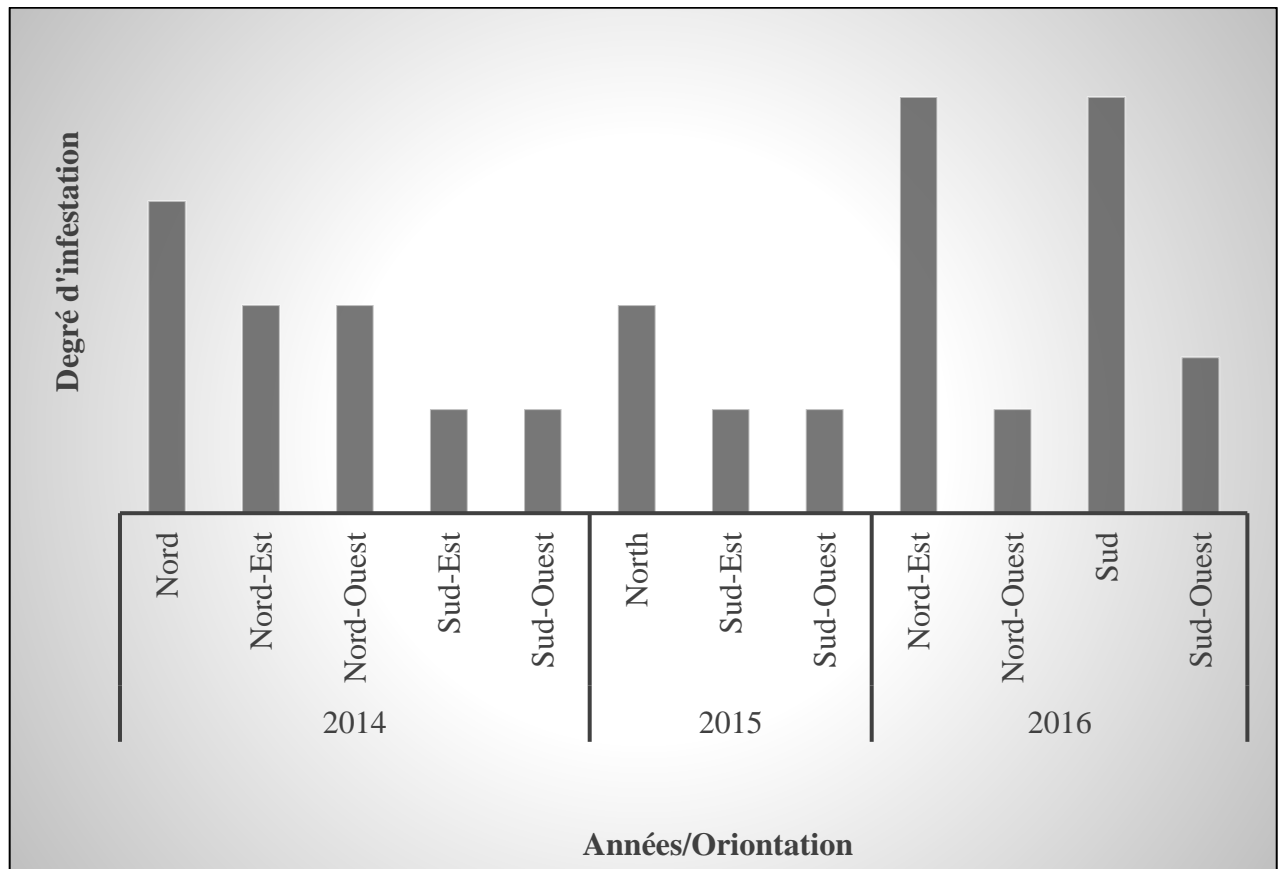


Figure 71. Degré d'infestation en fonction d'orientation

La processionnaire du pin étend son aire de répartition grâce au réchauffement climatique en latitude (Robinet *et al.*, 2007) et en altitude (Battisti *et al.*, 2006). Dans les reboisements du barrage vert, la processionnaire du pin s'installe progressivement avec une forte fréquence et sa répartition prend de l'extension.

Le degré d'infestation est plus significatif dans les zones exposées au nord en 2014 et 2015. En 2016 les zones exposées au nord et au sud sont les plus infestées, ces résultats restent très discutables.

13. Expansion des parasites embryonnaires de la processionnaire du pin

Une étude réalisée sur les parasitoïdes embryonnaires de la processionnaire du pin a montré que le taux de parasitisme était en fonction du temps. Les résultats de l'importance temporelle des parasitoïdes de 2012 à 2015 en fonction d'altitude a montré une synchronisation entre les deux parasites embryonnaires et la répartition de leur hôte dans la région semi-aride (Fig.72). A ce sujet Imbert (2012) note que si l'aire de répartition des ennemis naturels est uniquement limitée par celle de leur hôte et s'ils ont une capacité de dispersion équivalente, ils vont être capables de suivre sa progression et la capacité de vol des parasitoïdes est plus faible, ils seront incapables de suivre la vitesse d'expansion de leur hôte, en conséquence, dans les zones néo-colonisées, le taux de parasitisme dû aux parasitoïdes spécialistes est plus faible que dans la zone d'origine résultant d'une population plus réduite.

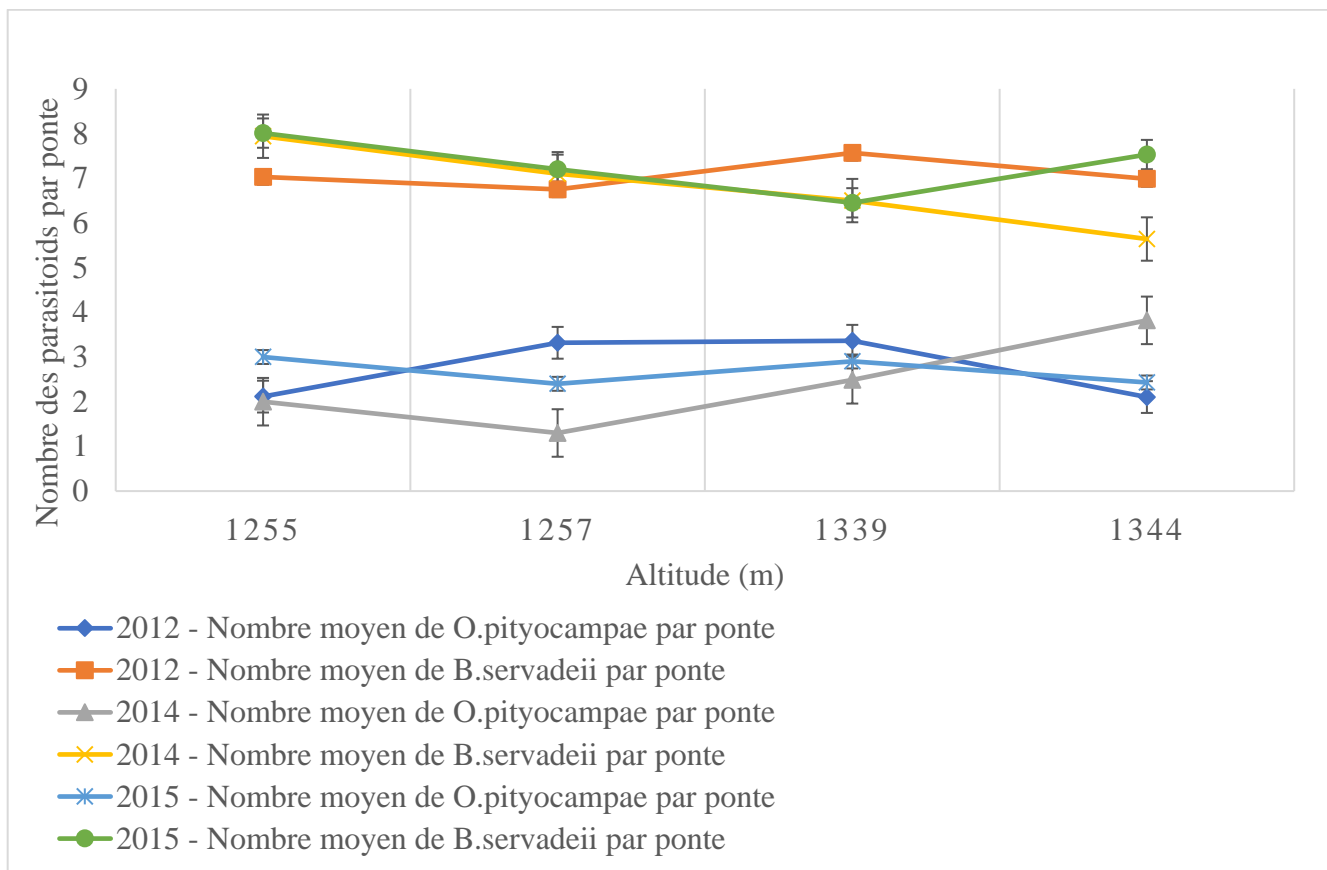


Figure 72. Evolution des parasitoïdes embryonnaires en fonction de l'altitude.

Le cortège des parasitoïdes de la processionnaire n'a pas pu suivre l'adéquation avec son hôte pour une meilleure régulation. D'autres facteurs biotiques et abiotiques peuvent

impacter la dynamique des parasitoïdes et cette hypothèse restent à confirmer par des autres recherches. La pression des ennemis naturels est moins forte aux limites de l'aire de répartition de leur hôte. L'évolution de la relation entre la processionnaire du pin et ses parasitoïdes oophages dans le contexte de l'expansion de l'aire de répartition de l'hôte en relation avec le changement climatique reste très discutable.

14.Complexe d'interaction des facteurs

Le changement climatique se répercute positivement sur la vie et la phénologie de la processionnaire du pin et négativement sur ses parasitoïdes, particulièrement embryonnaires. Parmi les perturbations attendues des écosystèmes forestiers de la région de Djelfa dans le cadre du changement climatique, les dégâts causés par la processionnaire du pin qui devraient augmenter en raison notamment de la hausse des températures. Ces dommages devraient réduire la capacité des forêts à stocker du carbone. Plus spécifiquement, il est prédit que l'augmentation des pullulations par ce défoliateur conduit à une diminution importante de la productivité des forêts mais leur impact réel reste difficile à comprendre (Fig.73).

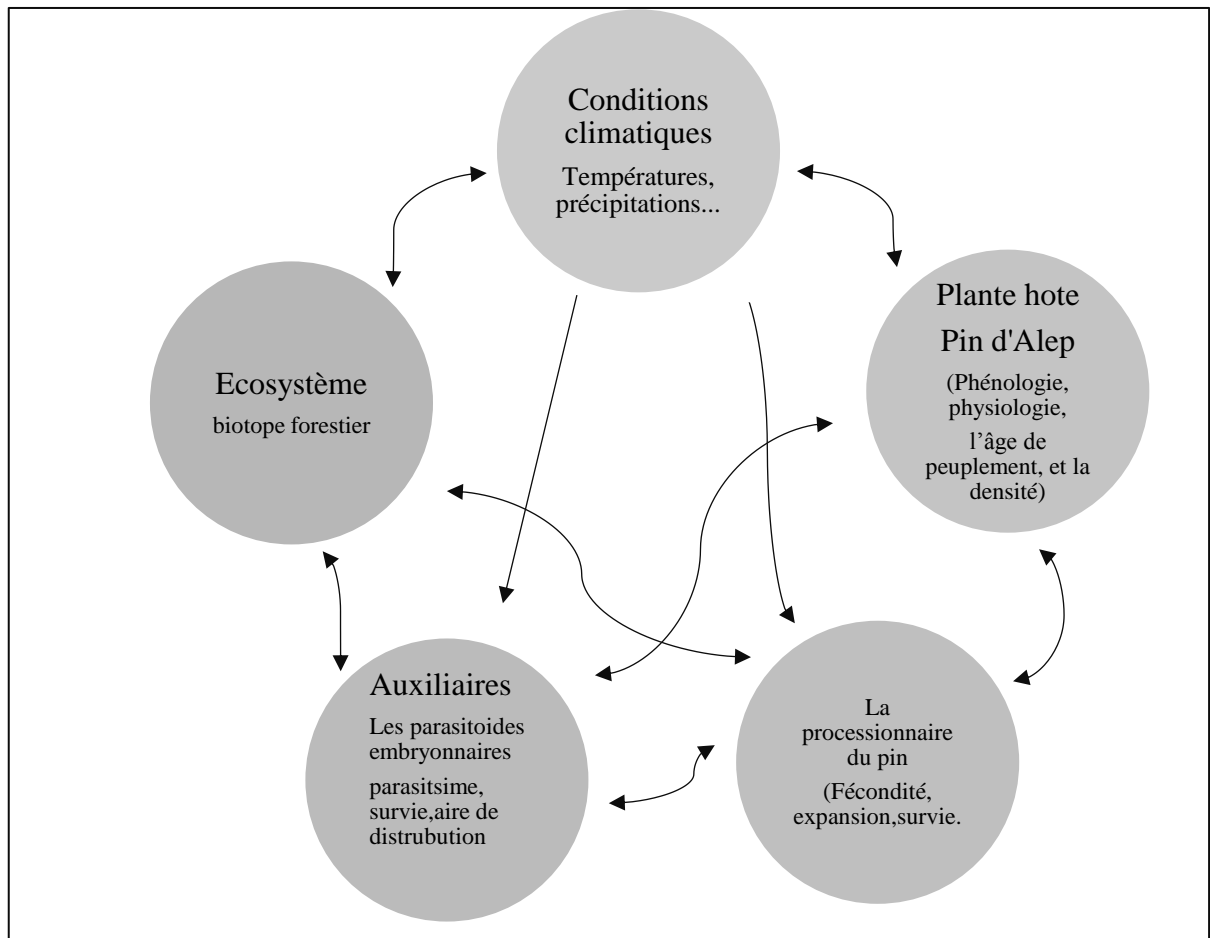


Figure 73. Fonctionnement des écosystèmes et interaction avec la processionnaire

Les résultats confirment la complexité de la réponse stratégique des populations de la processionnaire à l'éco-physiologique de l'arbre et aux conditions climatiques. Il existe un effet direct de l'augmentation des températures sur la fréquence, l'intensité et la distribution géographique de la processionnaire du pin, par contre un effet négatif sur les ennemis naturels (parasites, pathogènes et prédateurs).

Des études ont été effectuées sur l'impact de la température, photopériodisme, l'exposition, l'humidité du sol, la nature de biotope et l'hétérogénéité du milieu confirment que la phénologie et la dynamique de la processionnaire du pin, ainsi que la sensibilité de ses parasitoïdes sont liés aux plusieurs facteurs biotiques et abiotiques.

15. Analyse des défoliations par la processionnaire du pin et répartition des nids d'hivers

Les taux de défoliations sont extrêmement variables entre les biotopes prospectés et les arbres examinés et divers variables environnementales influencent les infestations et l'extension de l'espèce. Les différents groupes de défoliations proposés en méthodologie nous ont permis de tirer des renseignements sur l'état des défoliations dans les divers biotopes prospectés

Les taux des défoliations dans les quatre stations d'étude sont regroupés dans le tableau 25

Tableau 25. Taux de défoliation relevés en 2013 et 2014

Défoliations en classes (%)	% de défoliation	
	Reboisements	Pinèdes naturelles
0 – 10	48,5	49,5
10 - 25	20	34,5
25 - 50	25	8,5
50 - 75	5	5,5
75 - 100	1,5	1

Les taux de défoliations sont calculés à partir de 100 arbres par station prospectée. Entre les deux milieux prospectés, naturels et reboisés, le taux de défoliation par la processionnaire du pin est plus significatif pour la classe de 0 à 10 %. Les défoliations comprises entre 10 et 25 % sont plus représentés en forêts naturelles. Les défoliations supérieures à 50 % sont très faibles, ce qui peut expliquer une évolution régressive de l'insecte dans son biotope. A ce sujet Jacquet (2012), note dans son étude sur les taux de défoliations de pin sylvestre de 55 % pour la classe de 75 à 100 et de 52 % pour la classe de 50 à 74. Cette différence s'explique par les variations des facteurs environnementaux tels que les conditions climatiques et la phase de gradation, vraisemblablement en phase de culmination.

La figure 74 présente des exemples des cas de défoliations des arbres observés. La figure 75, illustre de fortes défoliations dans le reboisement de Moudejbara.

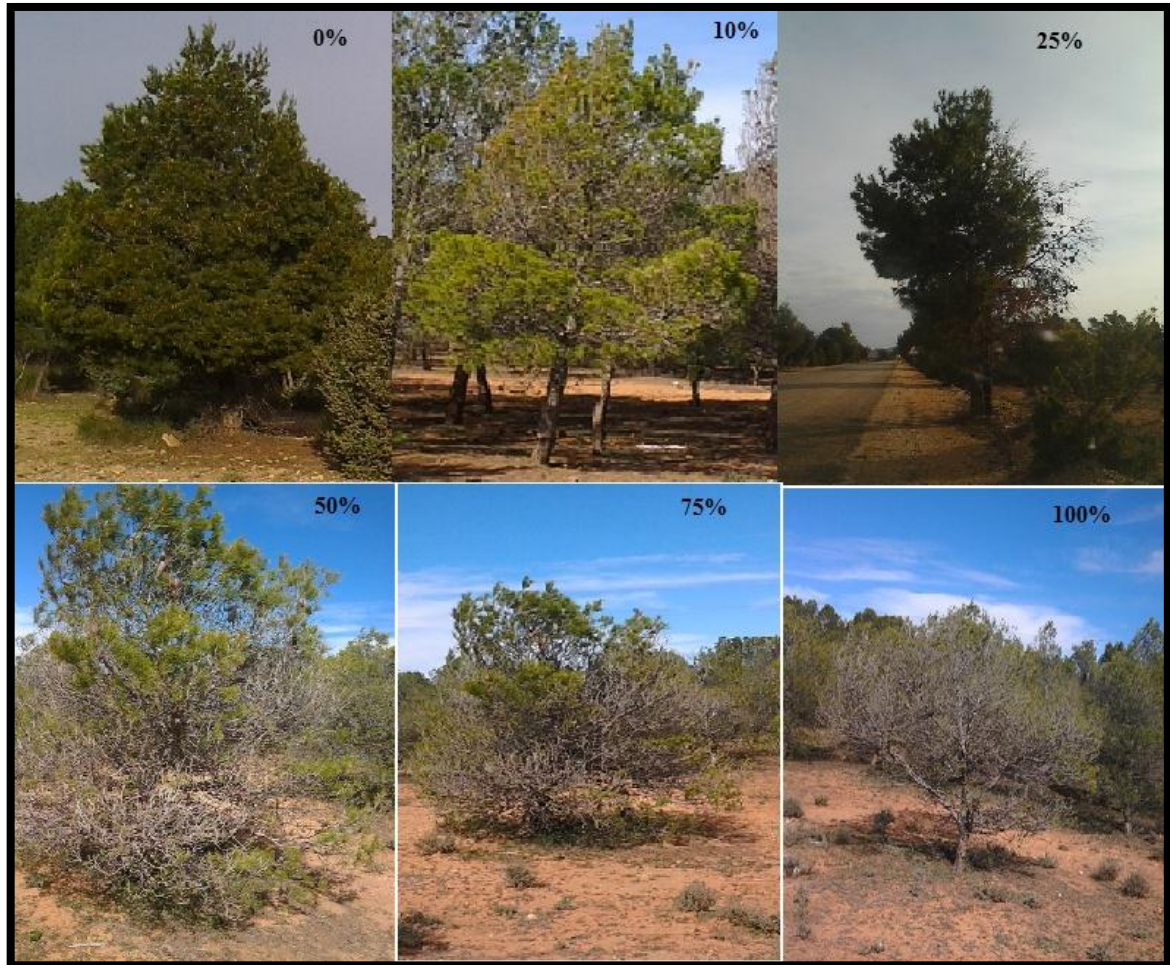


Figure 74. Exemples des cas de défoliations des arbres



Figure 75. Défoliation totale localisée dans le reboisement de Moudejbara

Une défoliation n'engendre pas seulement une modification morphologique de l'arbre, mais provoque des modifications physiques et physiologiques de l'arbre (Haukioja, 1990 et Kaitaniemi *et al*, 1999). La défoliation par un défoliateur peut créer une réaction de défense par l'hôte (Haukioja, 1990; Nykanen et Koricheva, 2004). Cette réaction peut se traduire par une diminution de la qualité de la nourriture pour le défoliateur (Smits et Larsson, 1999). Ce changement pourra causer une diminution de la population du ravageur en question. Il a été montré que chez le pin sylvestre, une défoliation par la processionnaire du pin avait un impact sur la survie des chenilles qui se développaient l'année suivante sur ces mêmes pins (Hodar *et al*, 2004).

Les figures 76 et 77 présentent les taux de défoliations causés par la processionnaire du pin et les degrés d'infestation notés en 2013 et en 2014

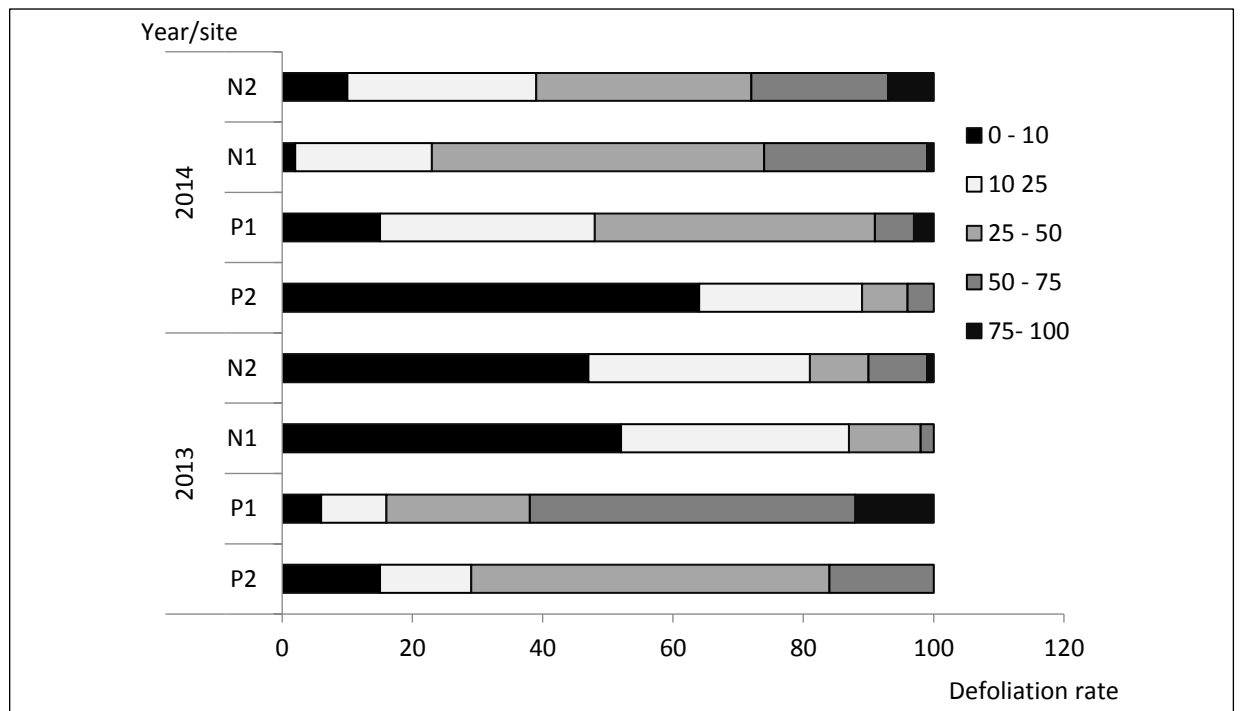


Figure 76. Evaluation du taux de défoliation causé par la chenille processionnaire du pin pour les sites considérés (N1 ; S5), (N2 ; S4), (P1 ; S1), (P2 ; S2).

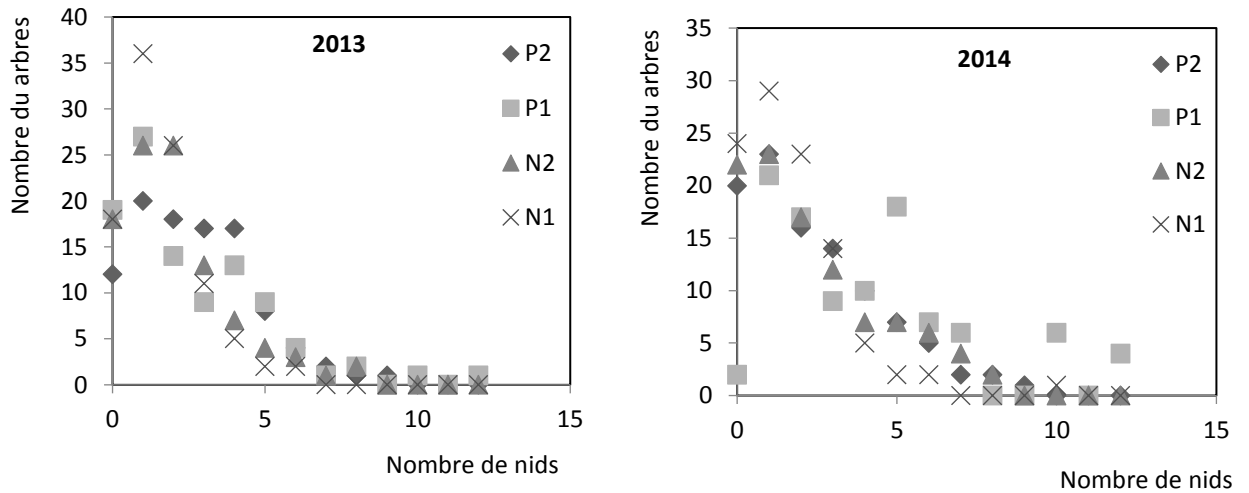


Figure 77. Cartographie de la distribution des degrés d’attaque de la processionnaire du pin (N1 ; S5), (N2 ; S4), (P1 ; S1), (P2 ; S2).

L’allure des courbes des sites met en évidence, l’importance de la distribution des nids va en décroissance de 1 à 12. Les valeurs extrêmes sont limitées. Nous retenons que la forte concentration des attaques concerne l’intervalle de 1 à 4 nids par arbre dans les reboisements et 1 à 2 nids pour les forêts naturelles.

Si nous considérons les degrés d’infestation, relative à la distribution des nids au cours des deux ans, l’allure des courbes reste très comparable. A ce sujet, Démolin (1962) note que la fermeture du peuplement est un facteur essentiel de régulation des populations de la processionnaire du pin. Un peuplement qui se referme sera mieux protégé vis-à-vis de la processionnaire du pin.

La matrice de distribution des nids d’hiver montre une signification vis-à-vis du nombre 1 et 2 nids par arbre et une faible concentration au-delà de 5 nids par arbre dans les stations prospectées.

Sur la base des observations effectuées dans le barrage vert, les colonies des chenilles choisissent préférentiellement le niveau basal et médian de la couronne pour construire leurs nids d’hiver. La stratégie de construction des nids reste très complexe et sous la dépendance des variables environnementales.

Des études réalisées sur la relation entre la diversité des essences forestières et la résistance de l'écosystème forestier à l'herbivorie, montre que la processionnaire du pin change sa stratégie de distribution selon la nature et la composition de biotopes. Les monocultures homogènes de pin présentent un milieu très favorable au développement de la processionnaire. A ce sujet, Jactel *et al.* (2010) confirment l'efficacité de ce type de mécanisme pour limiter les niveaux d'infestation de la processionnaire.

CONCLUSION

Conclusion

Le barrage vert est l'un des plus ambitieux projets agroécologiques mis en œuvre en Algérie pour lutter contre la désertification, au cours de ces dernières années, ces plantations de pin sont très recherchées par la processionnaire du pin. Les femelles de la processionnaire du pin ont une stratégie d'oviposition très complexe, la structure et de la disponibilité des substances volatiles de la plante hôte rentrent dans le choix et la sélection des femelles pondueuses, de plus, les facteurs physico-chimiques de pin d'Alep peuvent influencer le développement et la fécondité de ce défoliateur. La structure des aiguilles reste un élément de choix dans la répartition de la processionnaire du pin. Les aiguilles tendres et fournies en éléments nutritifs sont les plus recherchés par les colonies de la processionnaire du pin. Comme chaque année des programmes de reboisements sont effectués dans les zones semi-arides, les populations de la processionnaire ont tendance à migrer et à prendre plus de l'extension et de l'expansion.

Sur la base des données recueillies sur la processionnaire du pin, les mensurations des longueurs d'aiguilles témoins sont très comparables entre elles. Cependant la comparaison entre les biotopes met en évidence une longueur plus significative pour les aiguilles en provenance des reboisements. L'analyse des aiguilles support des pontes montre que les aiguilles des plantations sont légèrement plus longues et plus fines que celles des peuplements naturels, et la section des aiguilles portant des œufs (pontes) est plus conséquente dans les peuplements reboisés que dans les peuplements naturels. Ces résultats permettent d'affirmer que la structure des aiguilles rentre dans le choix des femelles de la processionnaire pour effectuer ses œufs. D'autres études complémentaires sur la structure et la composition chimique et biochimique des supports de ponte peuvent apporter plus d'informations sur le choix des sites recherchés par les femelles. Le choix des femelles pondueuses diffère significativement d'un biotope à un autre et peut avoir une influence adaptative et sur la fécondité. La comparaison des moyennes des longueurs des pontes de la processionnaire du pin montre une différence significative entre les deux biotopes considérés, les plantations sont les plus recherchées par les femelles de la processionnaire du pin. En 2014, une diminution remarquable des longueurs des pontes est notée pour les deux biotopes considérés et qui peut être la conséquence de variations exceptionnelles des températures durant l'année, ce que confirme l'impact des variations climatiques sur la phénologie de la processionnaire du pin. L'analyse fréquentielle des

longueurs des pontes de la processionnaire du pin montre une variabilité significative entre les deux biotopes considérés au cours du temps.

L'analyse de la régression entre la longueur des pontes et la longueur des aiguilles confirme que les femelles de la processionnaire du pin ont une capacité spécifique de corrélérer entre les longueurs des pontes et des aiguilles et de choisir la partie pour pondre et même de contrôler le nombre d'œufs pondus. Dans son aire naturelle, la processionnaire du pin peut aller vers un choix plus sélectif au sien du même hôte. Une sélectivité des aiguilles sur un même arbre peut s'effectuer par une femelle. Les aiguilles longues sont les plus recherchées par les femelles de la processionnaire du pin car elles offrent une taille confortable et convenable pour l'émission des œufs.

Dans la zone semi-aride du barrage vert de Djelfa, les femelles de la processionnaire du pin préfèrent la partie basale des jeunes arbres reboisés pour pondre leurs œufs. De même, elles préfèrent davantage les lisières des peuplements reboisés qui offrent des conditions plus favorables. Cependant après une défoliation totale notée au cours des années précédentes, les femelles de la processionnaire changent leur stratégie d'oviposition, elles préfèrent les jeunes rameaux du pin qui leur offrent un site plus favorable.

Sur la base des observations chronologiques de développement, les premières éclosions se sont manifestées vers la fin du mois d'août et se sont échelonnées jusqu'à la première semaine du mois d'octobre. La température journalière a un effet direct sur l'émergence des populations de la processionnaire, les journées chaudes se caractérisent par un faible nombre d'éclosion. Le taux d'éclosion noté varie de 68 à 77 % respectivement pour les années 2012 et 2015.

Sur l'effectif global des échantillons analysés, la mortalité à l'émergence est variable d'un milieu à un autre. Le taux de mortalité naturel enregistré est de 15 chenilles par ponte en moyenne (8,81 %) pour les pinèdes naturelles et de 4 chenilles par ponte en moyenne (2,29 %) pour les reboisements. Le nombre d'œufs éclos noté reste très élevé dans les divers milieux naturels et reboisés prospectés. Le fort succès à l'éclosion des chenilles est exprimé par 135 œufs/ponte en moyenne (79,83 %) dans les reboisements et de 134 œufs/ponte en moyenne (54,05 %) pour les forêts naturelles. Les moyennes des œufs éclos montrent qu'il existe une différence significative pour les deux biotopes prospectés. De même les moyennes des œufs non éclos présentent une plus grande signification pour les pinèdes naturelles.

Parmi les parasitoïdes actifs, Le parasitoïde spécifique de la processionnaire *Baryscapus servadeii* est majoritaire avec une fréquence de présence de l'ordre de 5,3 % par ponte. La fréquence de l'espèce polyphage, *Ooencyrtus pityocampae* oscillent entre 1,5 et 2 % par ponte respectivement dans les reboisements et les pinèdes naturelles. Ces deux antagonistes parasitoïdes jouent un rôle prometteur dans la régulation des gradations des populations de la processionnaire du pin. Le cortège de ces ennemis naturels varie selon les biotopes et les années et les variations des températures journalières.

Les émergences du parasitoïde *O. pityocampae* de la première génération ont été notées entre les mois d'août et de septembre. Pour la seconde génération, les émergences ont été notées entre les mois d'avril et de mai. La période de vol de la génération de parasitoïde polyphage, *O. pityocampae* en période estivale est en parfaite synchronisation avec l'apparition des papillons de l'espèce *T. pityocampa* évoluant sur pin d'Alep. Cette stratégie reste très discutable et mérite plus d'investigation pour tirer plus d'informations fiables sur la dynamique de cet axillaires et de son évolution.

Des taux culminants d'émergence des deux parasitoïdes compris entre 70 et 80 % ont été observés à une température variante entre 22 et 25 °C, respectivement entre 2013 et 2014. La dynamique de la population de *B. servadeii* évolue très significativement par rapport à *O. pityocampa*. L'émergence des deux antagonistes s'est échelonnée parallèlement. Les deux espèces de parasitoïdes n'ont pas un pic d'émergence simultané. L'émergence des parasitoïdes est diminué lorsque la température dépasse 30 °C. Le parasitoïde spécialiste est plus sensible que le parasitoïde généraliste. Les extrémités des pontes sont les plus recherchées par les parasitoïdes embryonnaires ; *B. servadeii* et *O. pityocampa*. La morphologie des aiguilles du pin peut influencer sur la structure des pontes de la processionnaire du pin et aussi sur les espèces de parasitoïdes associés.

Des recherches ont été effectuées sur l'effet de la plante hôte sur le potentiel reproductif des femelles montre qu'il y a une relation directe sur les variables. La position des œufs sur les aiguilles a eu certains effets sur les performances de la processionnaire du pin. La mortalité est généralement plus élevée dans les lots d'œufs pondus plus près de la base des aiguilles, quel que soit le type de peuplement. Les effets plus importants de la mortalité observés dans les forêts naturelles sont probablement dus à ses aiguilles plus courtes et plus épaisses, qui rendent le lot d'œufs plus compact et plus proche du bourgeon de l'aiguille.

Les analyses préliminaires des réactions chimiques des aiguilles du pin montrent une présence d'une forte teneur en flavonoïdes pour les aiguilles support des pontes de la processionnaire du pin. Sur la base des propriétés des flavonoïdes et tanins, les femelles de la processionnaire du pin choisissent les aiguilles du pin qui offrent les meilleures conditions pour leur descendance. Par ailleurs, certains flavonoïdes peuvent parfois avoir un rôle attractif pour les papillons, c'est alors la présence et la teneur en différents glycosides qui attirent la femelle du papillon. La femelle de la processionnaire du pin repère les reboisements purs de pin d'Alep facilement que les pinèdes naturelles mixtes par des signaux olfactifs qui rendent plus difficile le repérage de l'essence hôte dans les biotopes naturels mixtes. Ces idées restent à développer davantage par des investigations complémentaires de recherche.

La durée du développement larvaire dépend des conditions environnementales (et de l'hôte) et la date de procession est conditionnée par la date de ponte et la chronologie de développement larvaire. Chaque année les adultes de la processionnaire du pin dans la région semi-aride de Djelfa émergent de plus en plus en retard.

Les pullulations de la processionnaire sont favorisées par l'évolution des plusieurs variables environnementales particulièrement le changement climatique. Dans les reboisements du barrage vert, la processionnaire du pin s'installe progressivement avec une forte fréquence et sa distribution prend de l'extension et de l'ampleur. En réponse au réchauffement climatique, la processionnaire du pin est une des espèces qui est en train d'étendre son aire de répartition en latitude et en altitude. Cette réponse contemporaine relativement rapide suggère que son aire de répartition a fortement évolué. La pression des parasitoïdes est moins forte aux limites de l'aire de répartition de leur hôte. A Djelfa les nids ne sont pas très développés ce qui permet de retenir que les chenilles à la fin de leur développement ne subissent pas la pression des températures minimales. Les stress abiotiques tels que la sécheresse, les feux ou le gel semblent ainsi augmenter la fragilité de l'arbre hôte à une défoliation.

Entre les deux milieux prospectés, naturel et reboisé, le taux de défoliation par la processionnaire du pin est plus significatif pour la classe de 0 à 10 %. Les défoliations comprises entre 10 et 25 % sont plus représentées en forêts naturelles. Les défoliations supérieures à 50 % sont très faibles, ce qui peut expliquer la phase de rétrogradation de l'insecte dans son biotope.

La distribution des nids d'hiver dans les reboisements et les forêts naturelles montre que la distribution des nids reste comparable. La structure et l'âge de l'arbre ont une influence directe sur les pullulations de la processionnaire du pin. Il semble qu'il y a un mouvement des populations d'un site à autre. Une stratégie d'occupation s'effectue en relation avec plusieurs variables environnementales. Le changement des directions d'occupation est en relation avec les programmes des plantations en monoculture. L'insecte a tendance à marquer sa présence dans les jeunes reboisements que dans les pinèdes naturelles. Suite aux traitements répétés, les populations de la processionnaire du pin ont regagné ces dernières années les sites naturels, particulièrement les lisières qui sont plantées. Actuellement on assiste à une migration des populations de nouveau vers les reboisements. Ces migrations ont été effectuées vraisemblablement en relation avec les derniers traitements aux *Bacillus*. Les populations ont regagné les sites naturels après traitement des reboisements et en absence de traitements ces quelques dernières années les populations reprennent leur évolution dans les jeunes plantations ce qui permet d'affirmer que l'insecte développe une stratégie d'occupation en relation avec le milieu. Ces résultats méritent des compléments d'observations sur les années à venir afin de mieux gérer les interventions en forêts.

Les reboisements du barrage vert en monoculture sont devenus un milieu très favorable à la propagation de la processionnaire du pin. Ces dernières années on assiste à une nouvelle stratégie d'attaque et d'oviposition, ainsi une stratégie d'occupation et extension en relation avec la densité des forêts et l'effet de lisières sont notées. Les caractérisations d'écosystème rentrent aussi dans le choix stratégique des populations de la processionnaire. La présence des sites naturels à proximité des reboisements sont des réservoirs qui alimentent au cours du temps ces derniers. Les adultes peuvent s'échapper et regagner facilement les parcelles reboisées en pin d'Alep. L'évolution et l'occupation de la processionnaire du pin restent très complexe. Un modèle sur son extension et son expansion pourrait apporter des réponses prometteuses pour une meilleure gestion sylvicole en zones semi-arides.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

1. Abgrall J.F., et Souterenon A., 1991- La forêt et ses ennemis. Ed. CEMAGRAF., France, pp : 79-82.
2. Agenjo R., 1941- Monographia de la familia *Thaumetopeidae* (Lepidoptera, thaumetopeidae). Ecos. Rev. Esp. Ent. XVII, pp : 69-130.
3. Androic, M., 1957- La processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.)- étude biologique et écologique. *Glasmkza Sumski Pokuse* 13, pp : 351-359.
4. Arkam M., 2011- Caractéristiques biologiques des pontes de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* et importance des parasitoides embryonnaires en Cèdraie et en pinède. Essai d'élevage de *Trichogramma embryophagum*. Mémoire. Ing., Inst. Nat.Agro., El Harrach (Alger), 97p.
5. Amari M., Mechouche K., 2017- Contribution à l'étude des activités biologiques de la résine de *Pinus halepensis* Mill. Thèse. Master. 71p.
6. Arlettaz R., Fournier J., Zbinden N., 2000- Evolution démographique (1979–1998) d'une population témoin de Huppe fasciée *Upupa epops* en Valais et stratégie de conservation ciblée. *Nos Oiseaux* 47: 19–27.
7. Arnaldo, P.S. & Torres, L.M., 2006- Effect of different hosts on *Thaumetopoea pityocampa* populations in northeast Portugal. *Phytoparasitica*, 34, 523–530.
8. Aubry O., 2008- Lutte attracticide et lâchers inondatifs de trichogrammes contre le
9. carpocapse de la pomme, *Cydia pomonella* (Lepidoptera : Tortricidae). Université du
10. Québec à Montréal, Montréal, 103 pages
11. Bailly R., 1980- Guide pratiques de défense des cultures. Ed. Acta, Paris, pp : 371-372.
12. Barbaro L., 2008- Les oiseaux insectivores prédateurs de la processionnaire du pin. Biodiversité, Gènes et Communautés. *Colloque «Insectes et changement climatique» Micropolis 15 novembre 2008. INRA*, 26p.
13. 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.
14. Barbaro L., et Battisti, A., 2010- Birds as predators of the pine processionary moth (Lepidoptera: Notodontidae). *Biological Control*, press.Barel et Cedrus atlantica Manetti sur le pourtour du bassin méditerranéen. *Ann. Rech. For. Maroc*, T(27), pp : 577-591.
15. 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. 10.1111/cla.12181.
16. Battisti A., 1988- Host-plant relationships and population dynamics of the pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermu" ller). *Journal of Applied Entomology*, 105, pp: 393–402.
17. Battisti A (1989). Field studies on the behaviour of two egg parasitoids of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa*. *Entomophaga* 34: 29-38.
18. Battisti A., Bernardi M., & Ghirardo C., 2000- Predation by the hoopoe on pupae of *Thaumetopoea pityocampa* and the likely influence on other natural enemies. *BioControl*, 45, 311–323.
19. Battisti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques A., et Larsson S., 2005- Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecol. Applicat.*, 15(6), pp : 284-296.

20. Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E. et Larsson, S., 2006- A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12, pp : 662–671.
21. Battisti A, Avci M, Avtzis DN, Ben Jamaa ML., Berardi L, Berretima WA, Branco M, Chakali G, El Alaoui El Fels MA, Frérot B, Hodar JH, Ionescu-Malancus I, Ipekdal 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: “Processionary Moths and Climate Change” (Roques A ed). An Update. Springer-Quae, Dordrecht-Versailles, pp. 15-80.
22. Benhanifia K., 2015- Rapport sur l’analyse des agents et causes de la deforestation et de la dégradation dans les sites pilotes du projet FFEM Djelfa-Algerie., 69p.
23. Bergonzi M.C., Bilia A.R., Gallori S., Guerrini D., Vincieri F.F., 2001- Variability in the content of the constituents of *Hypericum perforatum* L. and some commercial extracts. *Drug Dev. Ind. Pharm.*, 27: 491-497
24. Bertella N., 1987- Bioécologie de *thaumetopoea pityocampa* Schiff. (Lepidoptera, *Thaumetopoeidae*) dans quelques régions de l’Algérie. *Thèse Magister*, INA, EL Harrach, 100p.
25. Biliotti, 1956. Biologie de *Phryx ecaudata* Rondani (Dipt. Larvaevoridae) parasite de la chenille processionnaire du pin. *Rev. Pathol. veg. Entomol. agric. Fr.*, 35; pp 50-65.
26. Biliotti E. (1958). Les parasites et prédateurs de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. (Lepidoptera). *BioControl*, 3(1) : 23-34.
28. Biliotti, E., Demolin, G., et Du Merle P., 1969- Parasitisme de la processionnaire du pin par *Villa quinquefasciata* Wied. apud Meig. (Diptère, Bombyliidae). Importance du comportement de ponte du parasite. *Annales des Epiphyties* 16, pp : 279-288.
29. B.N.E.F., Etude d’aménagement forestier sur 32.000 ha de pin d’Alep (Wilaya de Djelfa), Etude de milieu Senalba Chergui Superficie 20.000 ha. Bureau National des Etudes Forestier, Blida, 59p.
30. Boege K., 2005- Influence of plant ontogeny on compensation to leaf damage. *Am. J. Bot.* 92, pp: 1632-1640.
31. Bonnet C., Martin J.C., et Mazet R., 2008- la processionnaire du pin. *Nature santari* 14, pp : 29-33.
32. Bouchon J., et Toth J., 1971- Étude préliminaire sur les pertes de production des pinèdes soumises aux attaques de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. *Ann. Sc.For.* 28(3), pp : 323-340.
33. Bouhot-Delduc L., Lévy A., 1994- Rôle de la chenille processionnaire du Pin dans les dépérissements du Pin maritime landais. — *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 5 spécial “Les dépérissements d’arbresforestiers. Causes connues et inconnues”, pp. 431-436.
34. 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 la sante des forêts en 2004. *Département de la Santé des Forêts.*, échelon central, Paris. 6p.
35. Bovet R., 2008- La chenille processionnaire : un problème de santé publique. *Le journal des médecins libéraux* N°29, pp : 12-15.
36. Buffo E., Battisti A., Stastny M., & Larsson S., 2007- Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the Italian Alps. *Agricultural and Forest Entomology*, 9, 65–72.

37. Cadahia D., Enriquez L., et Sanchez A., 1975- [Attraction sexuelle chez *Thaumetopoea pityocampa* Schiff.]. *Boletín del Servicio de Defensa contra Plagas e Inspección itopatológica 1*, pp : 1-11.
38. Chakali G., 2006. Biologie et écologie de l'hylésine des pins *Tomicus destruens* Wollaston, 1865 (Coleoptera : Scolytidae) dans la forêt naturelle de Senalba Cherguie (Djelfa-Algérie). Thèse. Doct. 131p.
39. Chararas C., 1982- Role de certaines substances terpéniques dans l'attraction primaire et l'attraction secondaire chez les Scolytidae des conifères. *Bull. Soc. Zool. France*, 107, N° 4 : 625-632.
40. Charmot P., 1987- La chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff, et son importance médicale. Lyon, N°020, 132p.
41. Colautti R.I., Ricciardi A., Grigorovich I.A., MacIsaac, H.J., 2004- Is invasion success explained by the enemy release hypothesis? *Ecology Letters*, 7, pp : 721-733.
42. Corine L. C., 2010-Expansion de la chenille processionnaire du pin_ État de la biodiversité ordinaire et remarquable. « Le réchauffement climatique et le transport accidentel par l'homme responsables de l'expansion de la chenille processionnaire du pin », Forêt Wallonne, n° 108, septembre/octobre 2010, 19p.
43. Cuevas, J., Navarro-Vilá, F. and Tubía,J.M., 1989-Interprétation descisaillements ductiles vers le NE dans les gneiss de Torrox (ComplexeAlpujarride, Cordill`eres Bétiques).*Geodin. Acta*, 3, 107–116.
44. Curt T., 2017- Conséquences du réchauffement climatique sur le risque incendie de forêts. Irstea- note pour la Commission du Développement Durable et l'Aménagement du Territoire Audition à l'Assemblée nationale, le 27 octobre 2017. 4p.
45. Dagnelie P., 2007. Statistique théorique et appliquée : Statistique descriptive et bases de l'inférence statistique. Tome 1. Bruxelles, De Boeck et Larcier, 511 p.
46. Dajoz R., 1980- Ecologie des insectes forestiers. *Ed. Ghautier- Villars*, France, 489p.
47. Dajoz R., 2007- Les insectes et la foret- Rôle et diversité des insectes dans un milieu forestier. *Ed. Lavoisier*. Paris, 27, 594p.
48. Daligault O., 1991- Caractéristiques physiques des aiguilles de pin. Institut National de la218Recherche Agronomique, Document PIF9112, France.
49. Davidson C. B., Johnson E., Gottschalk K. W. et Amateis R. 2001- Prediction of stand susceptibility and gypsy moth defoliation in coastal-plain mixed pine-hardwoods. *Canadian Journal of Forest Research*, (31), pp: 1914-1921.
50. Delenatte B., 2009- Les insectes et autres petites bêtes de montagne_330 espèces dans leur milieu. *Ed. Grenat*, Paris, 247p.
51. 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.
52. Démolin G., 1965a- Estudio preliminar sobre las varaciones morfológicas de las orugas y adultos de las *Thaumetopoea* del grupo *pityocampa-wilkinsoni*. *Bol. Serv. Plag. For.*, 8 (15), pp : 28-41.
53. Démolin G., 1965b- Grégarisme et subsocialité chez *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Nids d'hiver - activité de tissage. *Actes du 5ème Congrès U.I.E.I.S.*, pp : 69-77.
54. Démolin G., & Rivé J. L., 1968- La processionnaire du pin en Tunisie. *Les Annales de l'INRF Tunisie*, 1(1), 1–19.
55. Démolin G., 1969a- Bioecología de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff., incidencia de los factores climáticos. *Bol. Serv. plag. Forest.*, 12 (3), pp : 9-22.

56. Démolin G., 1969b- Comportement des adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Dispersion, importance écologique. *Ann. Sci. For.* 26, pp : 81-102.
57. 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*, pp :33-56.
58. Démolin G., 1974- Réflexions générales sur la diapause et les diapauses renforcées chez la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiff., LepidopteraThaumetopoeidae. Compte-rendu de la Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique.
59. Démolin G., & Millet A., 1981- Essais insecticides contre la processionnaire du pin
60. (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.). Action comparative de différentes spécialités
61. commerciales Bactospéine, Dipel, Thuricide et Dimilin. *Annales des Sciences Forestières*, 38(3), 389–404.
62. Démolin G., Frerot B., Chambon J.P., et 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), pp : 577- 581.
63. D.G.F., 2004 – Direction générale des forêts : La mise en œuvre de la convention de lutte contre la désertification. Rapport national, 33 p.
64. DGF., 2005- Techniques de suivi de la biologie de la chenille processionnaire du pin avant et après le traitement insecticide prévu pour la campagne 2005. Réseau national d'avertissement contre les insectes ravageurs forestiers. Algérie, 11p.
65. DGF., 2010- Orientations pour une stratégie d'élaboration d'un programme à moyen et long terme de renouveau rural. Rapport, 21 p
66. Diallo A., 2005- Etude de la phytochimie et des activités biologiques de *syzygium guineense* willd. (myrtaceae)., Thèse. Doc. Pharmacie. 100p.
67. Dimitrakopoulos A. P., et Mitsopoulos I. D., 2006- Global forest resources assessment 2005- Report on fires in the Mediterranean Region. *Forestry Department, FAO*. Rome, 43 p.
68. Doult, R.L., Annecke D.P., et Tremblay E., 1971- Biology and host relationships of parasitoids. Ed. Dans Huffaker, New York. 511p.
69. 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. Doc. 165p.
70. Durkaya A., Durkaya B., et Dal S., 2009- The effects of the pine processionary moth on the increment of Crimean pine trees in Bartın, Turkey. *African Journal of Biotechnology*, 8 (10), 2356p.
71. Escalón, S (2013) L'inexorable avancée de la chenille processionnaire. Processionnaire du pin : une chenille sous haute surveillance, INRA.
72. El Mokhefi M, Kerdelhué C, Burban C, Battisti A, Chakali G, Simonato M (2016). Genetic differentiation of the pine processionary moth at the southern edge of its range: contrasting patterns between mitochondrial and nuclear markers. *Ecology and Evolution* 6: 4274-4288.
73. Er MK., Tunaz H., Gökçe A., 2007-Pathogenicity of entomopathogenic fungi to *Thaumetopoea pityocampa* (Schiff.) (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) larvae in laboratory conditions. *J Pest Sci* 80:235–239.
74. El Mokhefi M., Chakali G., Zamoum M., Bensidi A., and 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, pp133-134.
75. El Mokhefi M, Kerdelhué C, Burban C, Battisti A, Chakali G, Simonato M., 2016- Genetic differentiation of the pine processionary moth at the southern edge of its range: contrasting patterns between mitochondrial and nuclear markers. *Ecology and Evolution* 6: 4274-4288
 76. Fabre J.H., 1911 - Processionnaire du pin, 6e édition. Souvenirs entomologiques 6e, XVIII à XXIII, Paris, pp : 298-378.
 77. Fraval A., 2007-Les processionnaires 1^{ère} partie_ la processionnaire du pin. *Insectes n°147*, pp : 35-39.
 78. Frérot, B., et Demolin, G. 1993. Sex pheromone of the processionary moths and biosystematic considerations within the genus *Thaumetopoea* (Thaumetopoeidae Thaumetopoeinae). *Boll. Zool. Agrar. Bachic. Ser. II.* 25, pp : 33-40.
 79. 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)*, pp : 527-537.
 80. Gaudart J., Giorgi R., Thalabard J. C., Thiam D., Whegang S., 2010- Modèles linéaires à effets mixtes.
 81. Gazette., 2010- La chenille processionnaire du pin. Infos pratique. Bull. municipal de quiers sur bezonde., N° 16, pp : 4-7.
 82. Géri, C., 1980- Application des méthodes d'études demecologiques aux insectes défoliateurs forestiers. Cas de *Diprion pini* L. (Hymenoptère, Diprionidae). Dynamique des populations de la processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. (Lepidoptère, Thaumetopoeidae) dans l'île de Corse. *Thèse de Doctorat.* Université de Paris-Sud Centre d'Orsay, *Es-Sciences.* Paris.
 83. Gottschling S., Meyer S., Dill-Mueller D., Wurm D., et Gortner L., 2007- Outbreak report of airborne caterpillar dermatitis in a kindergarten. *Dermatology.* 215(1), pp : 5-9.
 84. Goubault M., 2003- Exploitation des hôtes chez un hyménoptère parasitoïde solitaire : conséquences adaptatives de la compétition intraspécifique sur les stratégies comportementales des femelles. Thèse Doctorat Univ., Renne I, 265p.
 85. Goussard F., Saintonge F.X., Geri C., Auger-Rozenberg M.A., Pasquier B.F., et Rousselet J., 1999,- Increasing risk of damage by the pine processionary *Thaumetopoea*
 86. Grabenweger G., Kehrl P., Zweimueller I., Augustin S., Avtzis N., Bacher S., *et al.*, 2010-Temporal and spatial variations in the parasitoid complex of the horse chestnut leafminer during its invasion of Europe. *Biological Invasions*, 12, 2797–2813.
 87. Grison P., Vago C., Maury M., 1959- La lutte contre la Processionnaire Pin, *Thaunietofioea pityocampa* Schiff. dans le massif du Ventottx. Essai d'utilisation pratique d'un virus spécifique. *Rev. for. fr.*, 5, 353-370.
 88. Grobler B. C., & Lewis O. T., 2008- Response of native parasitoids to a range-expanding host. *Ecological Entomology*, 33, 453–463.
 89. Grojean A.L., DE Boudouin C., et Flamant S., 2006_ Incidences environnementales et sanitaires des chenilles processionnaires et de leurs traitements en France. Atelier Santé Environnement IGS Promotion : 2005-2006. *Eco. Nat. Santé Publique, RENNE I*, France. 81p.
 90. Guerrero A., Camps F., Coll J., Riba M., Einhorn J., Descoins C., & Lallemand J. Y., 1981- Identification of a potential sex pheromone of the processionary moth,

- Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera, otodontidae). Tetrahedron Letters, 22, 2013–2016.
91. Harriet A., 2001- Les chenilles processionnaires et leur danger. France, pp : 90-91.
92. Haukioja, E., 1990- Induction of Defenses in Trees. Annual Review of Entomology, 36, 25–42.
93. Hezil S., Chakali G., Battisti A., 2014- Oviposition pattern and realized fecundity of the processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schifferuller 1775) (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) in natural and artificial Aleppo pines forests Djelfa (Algeria), Con and seed insects, Entomological research in Mediterranean Forest Ecosystems, Integrated management of Forest Defoliating insects, MedInsect, Turkey. pp: 91-92.
94. Hezil S., Chakali G., Battisti A., 2018- Plant phenotype affects oviposition behaviour of pine processionary moth and egg survival at the southern edge of its range, doi: 10.3832/ifer2675-011 vol. 11, pp. 572-576
95. Hoch, G., Toffolo, E. P., Netherer, S., Battisti, A., et Schopf, A., 2009. Survival at low temperature of larvae of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* from an area of range expansion. *Agricultural and Forest Entomology* 11, pp : 313-320.
96. Huchon H., et Démolin G., 1970- La bioécologie de la processionnaire du pin. Dispersion potentielle- Dispersion actuelle. Rev. For. Fr., N° spécial “La lutte biologique en forêt”, pp : 220-234.
97. 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.
98. Hódar J.A., Castro J., et Zamora R., 2003- Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warming. *Biol. Cons.* 110, pp: 123-129.
99. Hódar J.A., Zamora R., Castro J., et Baraza E., 2004- Feast and famine: previous defoliation limiting survival of pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* in Scots pine *Pinus sylvestris*. *Acta Oecol.* 26, pp : 203-210
100. Idrissi-Hassani M., et Lebreton P., 1992- Les flavonoïdes du Pin maritime une approche chimiotaxinomique. *Forêt méditerranéenne t. XIII, n° 7, janvier 1992*. France, 6p.
101. 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. Doc. Université D’Orléans. INRA Orléans. 197p.
102. Inal A., Altintas DU., Güvenmez HK., Yilmaz M., et Kendirli SG., 2006- Life-threatening facial edema due to pine caterpillar mimicking an allergic event. *Allergol. Immunopathol.* 34(4), pp : 171-173.
103. Jacquet J.S., 2012- Impacts des défoliations de la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) sur la croissance du pin maritime (*Pinus pinaster*). Thèse. Doc. Université bordeaux. 152p.
104. Jactel H., Nicoll B., Branco M., Gonzalez Olabarria J.R., Grodzki W., Langström B., Moreira F., Netherer S., Orazio C., Piou D., Santos H., Schelhaas M.J., Tojic K., Vodde F., 2009- The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Annals of Forest Science*, 66, 701.
105. Jactel H., Birgersson G., Andersson S., Schlyter F., 2010- Non-host volatiles mediate associational resistance to the pine processionary moth. *Oecologia* (in press).

106. Jactel H, Barbaro L, Battisti A, Bosc A, Branco M, Brockerhoff E, Castagneyrol B, Dulaurent AM, Hódar JA, Jacquet JS, Mateus E, Paiva MR, Roques A, Samalens JC, Santos H, Schlyter F (2015). Insect–tree interactions in *Thaumetopoea pityocampa*. in: “Processionary Moths and Climate Change” (Roques A ed). An Update. Springer-Quae, Dordrecht-Versailles, pp. 265-310.
107. Kadik, 1983- Contribution à l'étude du pin d'alep (*Pinus halepensis* Mill) en algerie. Ecologie, dendrométrie, morphologie. Thèse Doctorat, Univer. Pierre et Marie Curie, Paris, 261p.
108. Kadik B., 1987- Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) en Algérie. Ecologie, Dendrométrie, Morphologie. Office des publications universitaires. Alger. 585 p.
109. Kaitaniemi P., Ruohomaki K., Tammaru T., & Haukioja E., 1999- Induced resistance of host tree foliage during and after a natural insect outbreak. *Journal of Animal Ecology*, 68, 382–389.
110. Kanat M., Hakki A.M., et Sivrikaya F., 2005- Effect of defoliation by *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiff) (Lepidoptera thaumetopoeidae) on annual diamètre increment of pinus brutua in Turkey. *Ann. For. Sci.* (62), pp : 91-94.
111. Kanat M., Mol, T., 2008- The effect of *Calosoma sycophanta* L. (Coleoptera:Carabidae) feeding on the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Den. and Schiff.) (Lepidoptera:Thaumetopoeidae) in the laboratory. *J. Turkish Zool.*, 32, 367-372.
112. Kerdelhué C., Zane L., Simonato M., Salvato P., Rousselet J., Roques A., et Battisti A., 2009- Quaternary history and contemporary patterns in a currently expanding species. *BMC Evolutionary Biology* 9, 220 p.
113. Lamy M., 1990- Contact dermatitis (erucism) produced by processionary caterpillars (Genus *Thaumetopoea*). *J. Appl. Ent.* 110, pp: 425-437
114. Leblond A., Martin J.C., Provendier D., Gutleben C., Robinet C., et Napoleone C., 2010- Inventaire et évaluation des méthodes de lutte contre la processionnaire du pin. Enquête nationale – guide technique. Plante et Cité, 25p.
115. Lebreton S., Strategies de ponte en situations de compétition chez une guepe parasitoïde. Thèse. Doc. 145p.
116. Lewis W.J, Stapel J.O, Cortesero A.M, et Takasu K., 1998- Understanding how parasitoids balance food and host needs: importance to biological control. *Biol. Control* 11, pp : 175–183.
117. Mallmann R.J., 1962- Observation sur les réactions tactiles de la chenille processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. *Insectes sociaux*, 4(9), pp : 335-345.
118. Marçais B., Bouhot-Delduc L., et Le Tacon F., 1999- Effets possibles des changements globaux sur les micro-organismes symbiotique et pathogènes et les insectes ravageurs des forêts. Paris, 23p.
119. Martin J.C., Mazet R., 2001- Winter control of pine processionary caterpillar *Phytoma*, 540, pp : 32-35.
120. Martin J.C., 2005- La processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* (Denis et Schiffermüller). *Biologie et protection des forêts. INRA*.
121. Martin J. C., & Bonneaux X., 2006- *Bacillus thuringiensis* 30 ans de lutte contre les chenilles défoliatrices en forêt. *Phytoma*, 590, 4–7.
122. Martin J.C., 2012- Mise au point de stratégies de piégeage combinées pour la gestion de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa*, appliquées aux Zones Non Agricoles. Rapport intermédiaire – Programme ALTERPRO – INRA et Plante&Cité– 20/01/2012. France, 75p.

123. Martin J.C., 2018- La processionnaire du pin. Les solutions de gestion perspectives de la recherche. Journée technique processionnaire du pin jullouville. 84p.
124. Masutti, L., 1964- Ricerche sui parassiti oofagi della *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Annali del Centro di Economia Montana delle Venezie 4, pp : 205-271.
125. Medhurst J.L., Battaglia M., Cherry M.L., Hunt M.A., White D.A., Beadle C.L., 1999- Allometric relationships for *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden plantations. *Trees*, (14), pp : 91–101
126. Milani N (1990). The temperature of the egg masses of *Thaumetopoea pityocampa* (Dens. & Schiff.) (Lepidoptera, Thaumetopoeidae). *Redia* 73 : 149-161.
127. 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, pp : 65-71.
128. Mirchev P., Schmidt G. H., Tsankov G., & Avci M., 2004- Egg parasitoids of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. and Schiff.) (Lep., Thaumetopoeidae) and their impact in SW Turkey. *Journal of Applied Entomology*, 128, 533–542.
129. Mirchev P, Tsankov G, Douma-Petridou E, Avtzi N (2010). Comparative analysis of participation of egg parasitoids of pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Thaumetopoeidae) in northern and southern mainland Greece. *Silva Balcanica* 11: 73-97.
130. Mirchev, P., Georgiev, G., Boyadzhiev, P., Matova, M. 2012. Impact of entomophages on density of *Thaumetopoea pityocampa* in egg stage near Ivaylovgrad, Bulgaria. *Acta Zool. Bulg., Suppl.* 4. Pp:103-110.
131. Mirchev, P., Dautbasic, M., Mujezinovic, O., Georgiev G., Georgieva M., Boyadzhiev. 2015. Structure of egg batches, Hatching rate and egg parasitoids of pine processionary moth. *Thaumetopoea pityocampa* (Denis and Schiffermuller, 1775) (Lepidoptera: Notodontidae), in Bosnia and Herzegovina. *Acta Zool. Bulgarica*.67 (4). Pp: 579-586.
132. Mirault J., et Regad J., 1992- Le point sur la situation phytosanitaire du pin d'Alep. *Forêt méditerranéenne t. XIII, n° 3, juillet 1992*, pp : 120-121.
133. Moneo L., 2007- La processionnaire et l'Homme. Hospital Carlos III, Madrid, 31p
134. Montoya R., 1995- Implicaciones del cambio climático en el comportamiento de las plagas : coevolución planta-insecto. 24 p.
135. Moore B., et Allard G., 2008- Les impacts du changement climatique sur la santé des forêts. Document de travail sur la santé des forêts et la sécurité biologique. Département des forêts Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. *FAO*, Rome, Italie, pp 7-33.
136. 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.
137. Nykanen H., & Koricheva J., 2004- Damage-induced changes in woody plants and their effects on insect herbivore performance, a meta-analysis. *Oikos*, 104, 247–268.
138. Paiva M.R, Mateus E, Santos MH, Branco M (2011). Pine processionary moth females use semiochemicals for host selection. *IOBC/WPRS Bulletin* 72 : 159-164.
139. Paiva M.R., Mateus E., Branco M., Santos H., Battisti A., Roque A., Brockerhoff E., Jactel H., 2015-). Mechanisms of Host Tree Selection by the Pine processionary Moth. in: "Processionary Moths and Climate Change" (Roques A ed). An Update. Springer-Quae, Dordrecht-Versailles, pp. 15-80.
140. Pauly H., 2006- Processionnaire du pin : rétrogradation dans le sud-ouest, fortes populations en Bretagne et en Corse, latence et début de progradation ailleurs. *La*

- Santé des Forêts (France) en 2005. Min. Agri. Alim. Pêche Rur. (DGFAR, SDFB), Paris, pp : 7-13.*
141. Pauly H., 2010- Processionnaire du pin, hiver 2009-2010 : pullulation dans le sud-ouest. La Santé des Forêts Françaises. Actualités de l'année 2010. *Département de la santé des forêts*. Bordeaux., 8p.
142. Peinturier C., 2014-Les déterminants du coût des catastrophes naturelles : le rôle du changement climatique en France. 36p.
143. Pimentel C.S.M.G., 2004- Pine Processionary Moth (*Thaumetopoea pityocampa*) and Great Tit (*Parus major*) in Portugal: Population Dynamics and Interactions. Thèse Doctorat, Univer. Nova de Lisboa, Portugal, 267p.
144. Pimentel C., Ferreira C., et Nilsson, J.A., 2010- Latitudinal gradients and the shaping of life-history traits in a gregarious caterpillar. *Biol. J. Linnean Soc*, 100(1), pp: 224-236
145. Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, R Core Team., 2017- nlme: linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3: 1-131
146. Quero C., Malo E., Fabrias, G., Camps F., Lucas P., Renou M., & Guerrero A., 1997- Reinvestigation of female sex pheromone of processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*, no evidence for minor components. *Journal of Chemical Ecology*, 23, 713–726.
147. Rachel P.N.W., 2005- Propriétés pharmacochimiques de *Calotropis procera* Ait. (Asclepiadaceae) récolté au Mali : étude préclinique des effets anti-inflammatoires et antimicrobiens des extraits des écorces de racines. Thèse Docteur d'Etat en Pharmacie. 162p.
148. Rahim, N., Chakali, G., Battisti, A. 2016. Eggs mortality in the cedar processionary moth, *Thaumetopoea bonjeani* (Lepidoptera: Notodontidae), in an outbreak area of Algeria. *Biocontrol Science and Technology*, 26, 849-860.
149. Raymond B., Johnston R., LeRoux C.N., Lereclus D., Crickmore., 2010- *Bacillus thuringiensis*: an impotent pathogen?. *Trends in Microbiology* Vol.18 No.5. pp: 189-194. doi: 10.1016/j.tim.2010.02.006.
150. Riou-Nivert P., 2005- Les résineux. Écologie et pathologie. Ed. Pascal Maurin, Tome II, Paris, 290p
151. Rivière J., 2011- Les chenilles processionnaires du pin : évaluation des enjeux de santé animale. *Thèse. Doctorat. Vétérinaire*. 197 p.
152. Robert P.C., 1986- Les relations plantes-insectes phytophages chez les femelles pondueuses : le rôle des stimulus chimiques et physiques. Une mise au point bibliographique. *Agronomie* 6 : 127-142.
153. Robinet C., 2006- Processionnaire du pin et réchauffement climatique : une approche par modélisation mathématique. *La lettre du DSF* 33. pp : 4-5.
154. Robinet C., Baier P., Penner-Storfer J., Schopf A., et Roques A., 2007- Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Notodontidae). France. *Global Ecology and Biogeography*, vol. 16, n° 4, pp: 460-471.
155. Robinet C., Rousselet J., Goussard F., Garcia J., et Roques A., 2012- Impact observé et attendu du changement climatique sur une espèce d'insectes défoliateurs, la chenille processionnaire du pin, en France et en Europe., *conférence internationale. Faire face au changement climatique : la contribution de la science forestière INRA*, France, pp : 132-133.

156. Rohi L., 1993- Bioécologie de deux Hyménoptères parasitoïdes des Noctuidae au Maroc. Essai de lutte biologique par *Trichogramma bourarachae* (Hym., Trichogrammatidae). Univ. Cadi Ayyad-Marrakech, 140 pp.
157. Rousselet J., Robinet C., Sauvard D, Goussard F, Garcia J et Roques A., 2009- Progression de la processionnaire du pin. Santé des forêts - 20 ans d'expérience, un défi pour l'avenir 10 et 11 mars 2009 - *Colloque DSF à Beaune (Côte d'Or)*, 6p.
158. Rousselet J., 2010- La chenille processionnaire du pin. L'arbre en ville : un hôte pour des invités non désirés. Inra Centre d'Orléans. 5p.
159. Rousselet J., 2011- La chenille processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* ravageur forestier à la nuisance urbaine. Centre de recherche d'Orléans. INRA, 2p.
160. Roux D., Catier O., 2007- Botanique, pharmacognosie, phytothérapie. Collection du cahier du préparateur en pharmacie, pp :141-146
161. Sahraoui B (1995). Bilan critique du barrage vert en Algérie [Critical assessment of green dam in Algeria]. *Secheresse* 6 : 247-255.
162. Salman M.H.R., Giomi F., Laparie M., Lehmann P et Battisti A (2018) Prepupal diapause synchronizes adult emergence in the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera: Notodontidae). *Agricultural and Forest Entomology* (2018), DOI: 10.1111/afe.12291
163. Samalen J.C., Rossi J.P, 2011- Does landscape composition alter the spatiotemporal distribution of the pine processionary moth in a pine plantation forest. *Popul Ecol*, 53, pp: 287–296.
164. Samseny A.R.R., 2003- Contribution à l'étude phytochimique d'une plante traditionnellement utilisé comme poison d'épreuve au cabon : le strychnos Icaja Baillon (Mbundu) ; Loganaicee. These. Doc. Pharmacie. 89p.
165. Santos H, Paiva MR, Tavares C, Kerdelhué C, Branco, M (2011). Temperature niche shift observed in a Lepidoptera population under allochronic divergence. *Journal of Evolutionary Biology* 24 : 1897-1905
166. 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.
167. Sengupta S., Reddy P.R., Gyatsho J., et Ravindran R.D., Thiruvengadkrishanan K., Vaidee V., 2010- Risk factors for intraocular penetration of caterpillar hair in *Ophthalmia Nodosa*: a retrospective analysis. *Ind. J. Ophthalmol*, 58(6), pp: 540-543.
168. Sharma B., Viswanath G., Salunke R., Roy P., 2008- Effects of flavonoid-rich extract from seeds of *Eugenia jambolana* (L.) on carbohydrate and lipid metabolism in diabetic mice. *Food Chem.*, 110, pp : 697-70
169. Smits A., & Larsson S., 1999- Effects of previous defoliation on pine looper larval performance. *Agricultural and Forest Entomology*, 1, 19–26.
170. Stastny M, Battisti A, Petrucoo ET, Schlyter F, Larsson S (2006). Host-plant use in the range expansion of the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa*. *Ecological Entomology* 31: 481-490.
171. Stiling P., et Cornelissen T., 2005- What makes a successful biocontrol agent? A metaanalysis of biological control agent performance *Biol. Control* 34, pp : 236–246.
172. Suty L., 2010- La lutte biologique vers de nouveaux équilibres écologiques. Ed. Quae, France, pp : 30-65.
173. Thomas D.W., Shipley B., Blondel J., Perret P., Simon A., Lambrechts M.M., 2007- Common paths link food abundance and ectoparasite loads to physiological performance and recruitment in nestling blue tits. *Funct. Ecol*, 21:947–955.

174. Tibéri, R. 1990. Egg parasitoids of the pine processionary caterpillar, *Thaumetopoea pityocampa* (Den. and Schiff.) (Lep., Thaumetopoeidae) on Italy: distribution and activity in different areas. *J. Appl. Ent.* 110. Pp:14-18.
175. Tiberi R., Niccoli A., Curini M., Epifano F., Marcotullio M. C., & Rosati O., 1999- The role of the monoterpene composition in *Pinus* spp. needles, in host selection by the pine processionary caterpillar, *Thaumetopoea pityocampa*. *Phytoparasitica*, 27, 263–272.
176. Tsankov, G., Breuer, M., Schmidt, G.H., Maslov, A. 1991. Scale shape and colour of egg batches of some *Thaumetopoea pityocampa* (Insecta Lepidoptera., Thaumetopoeidae). *Boll. Zool. Agr. Bachir.* 23(1). Pp: 45-60.
177. Tsankov, G., Schmidt, G.H., Mirchev, P. 1995. Impact of parasitoids in egg-batches of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) in Algeria. *Boll. Zool. agr. Bachic. Ser.II*, 27(1), pp: 53-60.
178. Vega J., Vega J.M., Moneo I., Armentia A., Caballero M.L., et Miranda A., 2004- Occupational immunologic contact urticaria from pine processionary caterpillar (*Thaumetopoea pityocampa*): experience in 30 cases. *Contact Dermat.* 50(2), pp : 60-64.
179. Werno J., et Lamy M., 1990- Pollution atmosphérique d'origine animale : les poils urticants de la chenille processionnaire du pin (*Thaumeropoea pityocampa* Schiif.) (Insectes, Lépidoptères). *C.R. Acad. Sci. Paris, tome 310, série III*, pp : 325-331.
180. Werno J., Lesthelle S., Doerman F., et Vincendeau P., 2002- Envenimations par les lépidoptères. *Rev. Fr. Lab.* (342), pp : 35-39.
181. Who., 1999- Microbial pest control agent : *Bacillus thuringiensis*. Environmental Health Criteria 217. World Health Organization Publication : Genève, 125p.
182. Zamoum M., 1998 – Données sur la bioécologie, les facteurs de mortalité et la dynamique des populations de *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiffermüller. (Lep., Thaumetopoeidae) dans les pineraies subsahariennes de la région de Djelfa (Algérie). *Thèse de Doctorat, Université des Sciences de Rennes I*, France, 247 p.
183. Zamoum M., et Démolin G., Martin J. C., Bensidi A., 2006- Aspects éco-éthologiques de populations de la processionnaire du pin traitées avec *Bacillus thuringiensis* var. *Kurstaki*. 10p.
184. Zamoum M, Martin JC, 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.
185. Zhang QH, Schlyter F, Battisti A, Birgersson G, Anderson P (2003). Electrophysiological responses of *Thaumetopoea pityocampa* females to host volatiles: implications for host selection of active and inactive terpenes. *Journal of Pest Science* 76 : 103-107.

توسّع جاذوب الصنوبر و طفيلياتها في غابات الصنوبر بمنطقة الجلفة

الملخص. بينت دراسة إستراتيجية و ديناميكية جاذوب الصنوبر في السد الأخضر وجود إنقائية و إختيار مواقع وضع البيض على إبر الصنوبر حيث أن إناث جاذوب الصنوبر يفضلن الأبر الطويلة و الأجزاء الأكثر عرضة للشمس لوضع البيض، تُعتبر المناطق المشجرة البيئة الملائمة لنشاط هاته الحشرة، حيث أنها تُميز بسهولة النوع المضيف عن طريق إشارات شمسية أين تزيد صعوبة التّحديد في المناطق مختلطة الأنواع. إن التّجانس البيئي للمناطق الغابية الكثيفة قد يأتّر كثيرا في سرعة توسّع هاته الآفة التي بدورها أصبحت نموذجًا هامًا في التّغير المناخي. الخصائص الفيزيو كيميائية للنبات المضيفة تُدخل بشكل كبير في إختيار إناث جاذوب الصنوبر. في المناطق شبه الجافة، العوامل المناخية لعبت دورًا إيجابيًا في سرعة توسّع جاذوب الصنوبر. موقع المناطق الطبيعية و المشجرة بالقرب من بعضهم البعض سهّل على الحشرة الهجرة من منطقة إلى أخرى بحثًا عن العوائل الأفضل لها. في ما يخص طفيليات هاته الحشرة لاحظنا نقص في الخدود الجغرافية لمكان تواجدها مما يدل على تطوّر التّوسّع مع الحشرة المضيفة تحت تأثير التّغير المناخي الحالي الذي مازال نوعا ما مُعقدًا. إن إستراتيجية وضع البيض و بناء الأعشاش مازال مُعقدًا و تحت تأثير التّغيرات المناخية.

الكلمات الرئيسية : الصنوبر الحلبي، جاذوب الصنوبر، المناطق شبه الجافة، التغير المناخي، إستراتيجية الهجوم.

Expansion de la processionnaire du pin et de ses parasites embryonnaires dans les pinèdes de la région de Djelfa

Résumé. L'étude de la stratégie d'attaque et la dynamique des populations de la processionnaire du pin dans le barrage vert montre qu'il existe une sélectivité et choix des sites du pontes par les femelles sur les aiguilles du pin, elles préfèrent les parties des aiguilles longues les plus exposés au soleil pour pondre leurs œufs. Les jeunes reboisements du pin sont considérés le biotope le plus favorable pour cet defoliateur, Les femelles de la processionnaire du pin repèrent les reboisements purs du pin d'Alep facilement que les pinèdes naturelles mixtes par des signaux olfactifs qui rendent plus difficile le repérage de l'essence hôte dans les biotopes naturels mixtes, cette homogénéité du milieu et la densité de pin influent largement sur la vitesse de la progression de la processionnaire du pin qui devenu un model biologique du changement climatique. Les propriétés physico-chimiques et les caractéristiques du milieu forestier rentrent dans le choix de l'émission des œufs par les femelles. Les conditions environnementales en zones semi-arides, facilitent l'extension et l'expansion de la processionnaire du pin dans son aire de répartition. Les plantations effectuées à proximité des biotopes naturels sont devenues des réservoirs qui alimentent au cours du temps les peuplements reboisés du barrage-vert. La pression des ennemis naturels est moins forte aux limites de l'aire de répartition de leur hôte. L'évolution de la relation entre la processionnaire du pin et ses parasitoïdes oophages dans le contexte de l'expansion de l'aire de répartition de l'hôte en relation avec le changement climatique reste très complexe. La stratégie d'évolution spatio-temporelle de la processionnaire du pin reste très complexe et sous la dépendance des variables environnementales.

Mots clés : Pin d'Alep, Processionnaire du pin, semi-aride, Changement climatique, stratégie d'attaque

Expansion of the pine processionary moth and its embryonic parasitoids in the Aleppo pine forests of Djelfa

Abstract. The study of the attack strategy and population dynamics of the processionary moth in the green dam "le barrage vert" showed that the females moth choose and select the long needles that well exposed to the sun to assure the success of their offspring. The artificial stands offer the favorable conditions for the processionary moth, in where they identify pure stands as easily as mixed stands using olfactory signals that make it more difficult to locate host species in the mixed stands. The homogeneity and the density of stand likely affect the speed expansion of processionary moth that considered as biological model of climate change. The physico-chemical properties of the host plant are probably entering in the choice of females moths as well as the abiotic factors of the forest ecosystem. In the semi-arid area, the climatic conditions facilities the extension of the processionary moth. The location the planted sites near than native sites facilities the exchange and migration of processionary population from stand to another. The pressure of parasitoids is less strong in the limits of their host range, particularly in the green dam, the evolution of the relationship between the pine processionary and its oophagous parasitoids in the context of the expansion responded to climate change remains very complex. The strategy of oviposition and the construction of nests remain very complex and dependent on environmental variables.

Key words: Aleppo pine, Processionary moth, semi-arid, Climate change, Strategy of attack.