

STRATÉGIES DE CHOIX DE L'EMPLACEMENT DES NIDS D'HIVER DE THAUMETOPOEA PITYOCAMPA (DENIS & SCHIFFERMÜLLER, 1775) AU NIVEAU DE TROIS PINÈDES DANS LA RÉGION DE BORDJ BOU ARRERIDJ (ALGÉRIE)

ZIOUCHE Sihem^{1*}, BAALI Faiza¹, MOUTASSEM Dahou¹ et DJAZOULI Zahr-Eddine²

1. Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi- Laboratoire de Caractérisation et Valorisation des Ressources Naturelles -Bordj Bou Arreridj- Algérie.

2. Université Blida 1- Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie- Laboratoire de Biotechnologie des Produits Végétales, B.P. 270, route de Soumaa Blida, Algérie.

Reçu le 19/10/2017, Révisé le 08/12/2017, Accepté le 31/12/2017

Résumé

Description du sujet : La chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) est le principal ravageur défoliateur qui endommage gravement les forêts de pin d'Alep des régions du bassin méditerranéen. En Algérie, cet insecte ravageur est présent dans l'ensemble des forêts résineuses.

Objectifs : Evaluation de certains paramètres abiotiques des forêts sur la fréquence et l'intensité de l'attaque de la chenille processionnaire *T. pityocampa*.

Méthodes : La variabilité de l'altitude, l'orientation cardinale des nids d'hiver, la hauteur et la composition phytochimique des arbres du pin d'Alep ont été étudiées.

Résultats : Le nombre de nids d'hiver semble ne pas avoir été affecté par l'effet de l'altitude et la hauteur des arbres. Les chenilles installent leurs nids d'hiver sur les rameaux à orientation Sud et Ouest, sur les arbres situés à une altitude comprise entre 698 à 928 m, au-delà de cette altitude les nids sont déposés sur les orientations Est et Nord. La teneur en polyphénols chez les arbres attaqués et non attaqués a révélé une différence hautement à très hautement significative. Alors que la teneur en flavonoïde des arbres sains et attaqués montre une différence non significative.

Conclusion : *T. pityocampa* s'attaquent aux arbres du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) quelque soit la région et l'altitude. Les préférences d'installation des nids d'hiver sont dans la direction cardinale Est-Sud. Les polyphénols sont abondants chez les arbres sains plus que les arbres attaqués.

Mots clés : altitude ; défoliateur; dynamique spatiale; hauteur d'arbre ; orientation cardinal ; qualité phytochimique ; *Pinus halepensis* ; Processionnaire du pin.

STRATEGIES FOR CHOOSING LOCATION OF WINTER NESTS OF THAUMETOPOEA PITYOCAMPA (DENIS & SCHIFFERMÜLLER, 1775) IN THREE PINE FORESTS OF BORDJ BOU ARRERIDJ REGION (ALGERIA)

Abstract

Description of the subject: The pine processionary caterpillar (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) Is the main defoliating pest that severely damages the pine forests of Aleppo in the Mediterranean basin. In Algeria, this insect pest is present in all coniferous forests.

Objective: Evaluation of certain abiotic parameters of forests on the frequency and intensity of attack by the *T. pityocampa*

Methods: the variability of the altitude, the cardinal orientation of winter nests, the height and the phytochemicals composition of the Aleppo pine trees are studied.

Results: The number of winter nests appears not to have been affected by the effect of altitude and height of trees. The caterpillars set up its winter nests in the south and west cardinal direction at an altitude of 698 to 928 m and above this altitude the position of the nests changes towards the east and north side. The polyphenols content in the attacked and non-attacked trees of *P. halepensis* revealed a highly significant difference. The flavonoids contents of healthy and attacked *P. halepensis* showed a non-significant difference.

Conclusion: *T. pityocampa* attack the trees of *P. halepensis* whatever the region and altitude. Installation preferences for winter nests are in the East-South cardinal direction. Polyphenols are abundant in healthy trees more than the trees attacked.

Keywords: altitude; cardinal orientation; defoliator; height of shaft; phytochemicals quality; Pine processionary; *Pinus halepensis*.

* Auteur correspondant: ZIOUCHE Sihem, Email: sihem_ziouche@yahoo.fr

INTRODUCTION

En région méditerranéenne, le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) recouvre 3.5 millions d'hectares et présente une répartition géographique principalement centrée en Méditerranée occidentale (Algérie, Tunisie, Espagne, Italie) [1]. En Algérie, le pin d'Alep occupent plus de 881.000 hectares [2]. Cette espèce qui est présente dans tous les étages bioclimatiques, depuis le littoral jusqu'à l'Atlas saharien, trouve son optimum de croissance essentiellement en zone semi-aride. Sa grande plasticité et son tempérament robuste ont fait d'elle une essence pionnière des grands reboisements [3]. En Algérie, depuis l'indépendance, l'accroissement des reboisements en pin d'Alep, *Pinus halepensis* L., a entraîné une prolifération de la chenille processionnaire du pin, mettant en danger les jeunes reboisements. En effet, la monoculture exclusive à base du pin d'Alep, a engendré une explosion démographique des populations de cette chenille par rapport à d'autres insectes ravageurs [4]. La chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffmüller, 1775) est un des plus grands défoliateur des forêts résineux dans le sud de l'Europe et le Nord de l'Afrique, en termes de répartition temporelle et géographique ainsi que l'impact socioéconomique [5 ; 6]. Les larves se nourrissent des aiguilles de pin pendant l'automne et l'hiver. Cela diminue considérablement la croissance des arbres à court terme, même à faibles niveau de défoliation [7]. Cependant, les arbres semblent pouvoir se restituer à long-terme si la défoliation n'est pas fréquente [8]. On rencontre ce ravageur dans tous les pays de la méditerranée occidentale [9] et se répand actuellement dans les latitudes supérieures probablement en réponse au changement climatique avec des températures hivernales croissantes [10; 11]. Les chenilles sont capables de s'adapter afin de compenser d'éventuelles variations climatiques, comme l'illustre la construction et l'orientation du nid d'hiver, permettant d'allier effet de masse (atténuation de fortes variations de température par regroupement de nombreux individus) et insolation maximale [12]. Des mesures de surveillance et de lutte des ravageurs sont donc nécessaires régulièrement, afin d'assurer l'évolution de la détection et l'atténuation des

risques potentiels pour les forêts et la santé publique [13; 14].

L'exploration, dans ce cas, de la variabilité de l'altitude, l'orientation cardinal des nids d'hiver, la hauteur et la composition phytochimique du pin d'Alep vis-à-vis des attaques de la chenille processionnaire du pin est une démarche logique qui peut être révélatrice et prometteuse. Les objectifs de ce travail sont donc d'estimer si certains paramètres abiotiques des forêts ont un effet sur la fréquence et l'intensité de l'attaque de la chenille processionnaire *T. pityocampa*. La question est de savoir si la physiologie et la qualité phytochimique du pin d'Alep, *Pinus halepensis* Mill. peuvent influencer le positionnement des nids d'hiver.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Présentation de la zone d'étude

La forêt de Bordj Bou Arreridj dont les coordonnées géographiques sont de latitude 36.0667 et longitude 4.76667; 36° 4' 0" Nord, 4° 46' 0" Est, occupe une superficie de 80 799 ha, située à 200 km à l'Est d'Alger. Le climat pourrait être considéré comme faisant partie de l'étage bioclimatique semi-aride. La moyenne annuelle de la gamme d'amplitude thermique est de 21,3 °C. La moyenne des précipitations est inférieure à 400 mm/an. La principale essence qui compose le fond forestier est le Pin d'Alep, dont les grandes forêts se concentrent dans la partie Nord et Nord-ouest de la wilaya, ceinturant ainsi la chaîne montagneuse des Bibans et les monts de Beni-Yadel, et le Chêne vert avec des superficies respectives de 64 904 et 17 019 ha [15].

Lors de la prospection de la zone d'étude, nous avons retenu trois sites ; Mansoura (S1), Djehaifa (S2) et Ras El Oued (S3), localisés à des altitudes respectives de 698 m ; 928 m et 1077 m (fig.1), présentant de forte progression de la processionnaire du pin. Ces sites présentent les critères essentiels répondant aux objectifs de notre investigation qui consiste à évaluer et étudier la manière dont les chenilles de la processionnaire du pin construisent et choisissent l'orientation des nids d'hiver en fonction des paramètres stationnels (exposition, altitude et hauteur de l'arbre) et de la composition phytochimique de la plante hôte.



Figure 1: Localisation de la zone d'étude sur la carte de la wilaya de Bordj Bou Arreridj (S1: Site de Mansoura; S2: Site de Djehaifa; S3: Site de Ras El Oued)

2. Méthodes d'étude

2.1. Échantillonnage

Les observations et les comptages des nids d'hiver, la mesure de la hauteur des arbres, la prise de l'orientation cardinale des nids sur chaque arbre et la collecte des aiguilles de pin pour les dosages phytochimiques ont été effectués dans chaque site. Le type d'échantillonnage utilisé dans ce travail est l'échantillonnage systématique se basant sur deux transects diagonales pour chaque site. Le nombre total des arbres sélectionnés est de trente (30) arbres par site.

2.2. Mesures réalisées et méthodes d'analyses

2.2.1. Hauteur des arbres

Des mesures de la hauteur individuelle des arbres ont été effectuées dans chaque site pour les 30 arbres sélectionnés. La méthode recommandée par Rondeux [16] a été adoptée pour ces mesures en utilisant une perche de longueur connue (2 à 3 m) et placée verticalement contre l'arbre à mesurer. L'utilisation d'une perche de 3 à 5 m est préconisée pour une précision maximale.

2.2.2. Nombre et localisation des nids par arbre

Le nombre de nids de la chenille processionnaire est compté systématiquement sur les trente (30) arbres sélectionnés dans les trois parcelles, tout en prenant en considération le positionnement des nids par rapport à la direction cardinale.

2.2.3. Dosage et quantification des polyphénols et des flavonoïdes

Afin de mettre en évidence la présence ou l'absence de certains composés appartenant aux familles chimiques des métabolites secondaires, nous avons réalisé des analyses phytochimiques. Pour la réalisation de ces analyses nous avons procédé par la préparation du matériel végétal qui été séché à l'air libre, à l'abri de lumière et d'humidité et à la température ambiante du laboratoire. Devenus secs, les échantillons sont conservés dans des sacs en papier au laboratoire jusqu'au jour du dosage.

Les polyphénols sont extraits par macération, selon le protocole décrit par Romani *et al.* [17]. Le dosage des polyphénols totaux a été effectué selon la méthode de Folin-Ciocalteu (FC) [18]. Les résultats sont exprimés en milligramme équivalent acide gallique par gramme d'extrait (mg GAE/g).

La préparation d'extraits des flavonoïdes a été réalisée selon la méthode de Tereschuk *et al.* [19]. Le dosage de flavonoïdes a été réalisé selon la méthode colorimétrique décrite par Dehpeur *et al.* [20]. Les résultats sont exprimés en milligramme équivalent catéchine par gramme d'extrait (mg CEQ/g).

3. Traitement statistique des données

Les résultats sont soumis à une analyse de la variance (ANOVA pour *ANalysis Of VAriance*), à un facteur de variation, avec le test de Tukey au seuil de 5% ($p < 0.05$) pour identifier les groupes homogènes. Aussi, nous avons fait appel à l'analyse en

composantes principales (ACP). Le principe de cette analyse est de représenter un phénomène multidimensionnel par un graphique à deux ou plusieurs dimensions. Les tests statistiques ont été traités par le logiciel PAST version 3.1 [21]. Le seuil de 5% a été retenu pour tous les tests [22].

RÉSULTATS

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

Les résultats du dénombrement des nids d'hiver, de la hauteur des arbres, la hauteur des nids par rapport à la hauteur de l'arbre, et l'emplacement des nids selon les points cardinaux sont illustrés dans le tableau 1. Le résultat du comptage des nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin effectué dans les trois sites d'étude, montre que les valeurs moyennes du nombre de nids enregistré dans le site de Djehaifa, Ras El Oued et Mansoura sont presque similaires avec des moyennes respectives de $1,7 \pm 0,59$; $1,6 \pm 0,27$ et $1,5 \pm 0,23$ nids /arbre.

Les données recueillies sur la hauteur des arbres, montrent que les arbres des sites de Mansoura et de Djehaifa présentent la même hauteur (2,54 m) par rapport à celle du site de Ras El Oued (2 m). Le nombre des nids au niveau des arbres annonce une similarité en termes de charge, avec une préférence en vers les points cardinaux Sud et Est.

2. Influence des sites sur la disponibilité des nids d'hiver

L'évaluation de la disponibilité des nids d'hiver dans les sites étudiés révèle que les trois parcelles s'ajustent en termes des taux de présence des nids. Les sites de Ras El Oued et de Djehaifa signalent des taux comparables de présence des nids d'hiver sur les arbres de pin d'Alep avec 84,44 et 84,18% respectivement. Dans le site de Mansoura, le taux de la disponibilité des nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin ne se détache pas trop des taux enregistrés dans les autres sites (75,32%) (Fig. 2a). Le graphique en Box-Plot indique par référence au test ANOVA ($p > 5\%$) l'indifférence de la charge des nids aux niveaux des stations d'étude. Cette similarité est confirmée par les valeurs rapprochées des médianes (Q_3) (Fig. 2b).

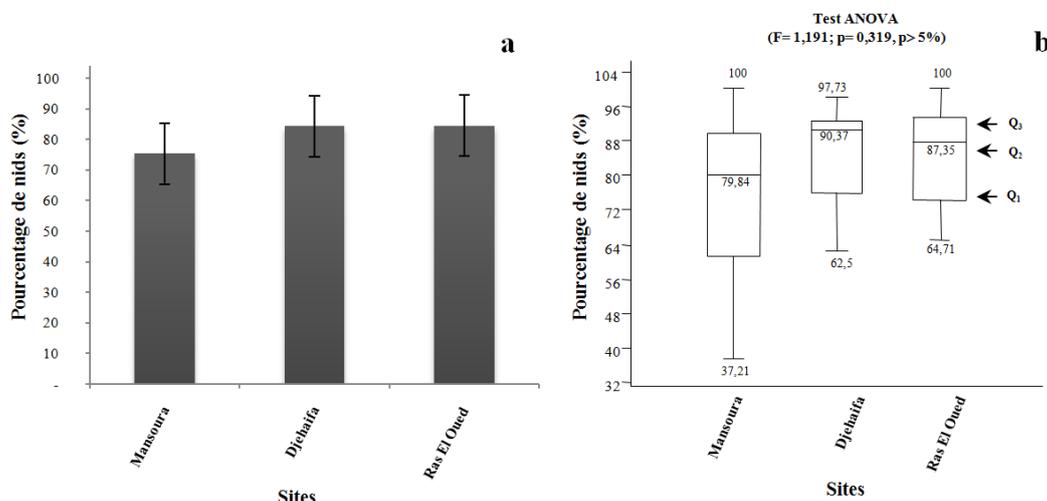


Figure 2. Nombre de nids de la chenille processionnaire chez *P. halepensis* dans les trois sites étudiés. (a): Disponibilité des nids d'hiver en pourcentage, (b) : Disponibilité des nids d'hiver par référence aux médianes.

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

Le graphe de la figure 3a présente le nombre de nids d'hiver de la chenille processionnaire par arbre dans les trois sites étudiés par rapport à leur emplacement. Le nombre de nids d'hiver semble ne pas avoir été affecté par l'effet de

l'altitude (Fig. 3a). Cette similitude de l'effet altitude sur le nombre de nids d'hiver est confirmée par le test d'ANOVA One Way, qui signale la présence d'une différence non significative ($F=0,208$; $p=0,814$, $p > 5\%$) (Fig.3 b).

Tableau 1 : Valeurs moyennes de la hauteur des arbres, le nombre de nids d'hiver, position des nids par rapport à la hauteur de l'arbre et l'orientation cardinale des nids.

Localité	Altitude (m)	Hauteur de l'arbre (m)	Hauteur de nids/ hauteur de l'arbre (m)	Nombre de nids et orientation				Moyenne de la hauteur	Nombre de nids total/site
				Nord	Sud	Est	Ouest		
Ras El Oued	1077	2±0,22	1,1±0,14	-	-	1	-	2	15
		2±0,35	1,7±0,21	-	-	1	-		
		1,65±0,35	1,35±0,32	-	1	-	-		
		1,65±0,57	1,65±0,42	-	1	-	-		
		2,3±0,08	2,15±0,56	1	-	-	-		
		1,8±0,23	1,8±0,28	-	-	1	-		
		1,7±0,17	1,6±0,11	-	-	1	-		
		2,1±0,26	1,65±0,1	-	-	1	-		
		2,1±0,52	1,75±0,23	-	-	1	-		
		1,85±0,14	1,6±0,54	-	1	1	-		
		1,85±0,19	1,5±0,32	-	-	1	-		
		1,7±0,56	1,1±0,14	-	-	1	-		
		2,7±0,38	2,5±0,34	-	-	1	-		
		2,3±0,42	1,5±0,15	1	-	-	-		
		2,3±0,33	1,9±0,25	-	-	1	-		
Mansoura	698	2,15±0,19	0,8±0,36	-	1	-	-	2,54	16
		1,95±0,28	1,4±0,18	-	1	-	-		
		1,95±0,56	1,6±0,37	-	-	1	-		
		2,33±0,38	1,23±0,46	-	1	-	-		
		2,33±0,36	1,59±0,61	-	1	-	-		
		3±0,40	1,9±0,22	-	-	1	-		
		3±0,17	1,9±0,21	-	1	-	-		
		3±0,22	1,7±0,42	-	-	1	-		
		2,9±0,23	2,4±0,35	-	1	-	-		
		2,6±0,11	2,55±0,13	1	-	-	-		
		2,6±0,64	2±0,22	-	1	-	-		
		2,95±0,31	2,7±0,35	-	-	1	-		
		3,23±0,25	2,14±0,56	-	-	1	-		
		2,1±0,44	2,1±0,27	1	-	-	-		
		2,1±0,41	1,7±0,18	-	1	-	-		
2,45±0,28	2,4±0,38	1	-	-	-				
Djehaifa	928	2±0,09	1,8±0,46	-	-	1	-	2,54	17
		2,2±0,26	2±0,34	-	-	1	-		
		2,2±0,21	2,15±0,17	-	-	-	1		
		2,9±0,52	2,2±0,25	1	-	-	-		
		2,9±0,27	2,4±0,31	-	1	-	-		
		1,65±0,33	1,6±0,42	-	-	1	-		
		2±0,29	1,85±0,33	-	1	-	-		
		2±0,11	1±0,19	-	1	-	-		
		2±0,18	1,5±0,25	-	-	1	-		
		3±0,22	1,8±0,31	-	1	-	-		
		3±0,24	1,8±0,44	-	1	-	-		
		3±0,23	2,3±0,48	-	1	-	-		
		2,7±0,42	2,5±0,46	-	1	-	-		
		2,7±0,46	2,4±0,40	-	1	-	-		
		3±0,29	1,65±0,16	-	-	1	-		
3±0,22	2,65±0,19	-	1	-	-				
3±0,25	2,5±0,11	-	1	-	-				
Total				6	20	21	1		48

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

Le graphe de la figure 3a présente le nombre de nids d'hiver de la chenille processionnaire par arbre dans les trois sites étudiés par rapport à leur emplacement. Le nombre de nids d'hiver semble ne pas avoir été

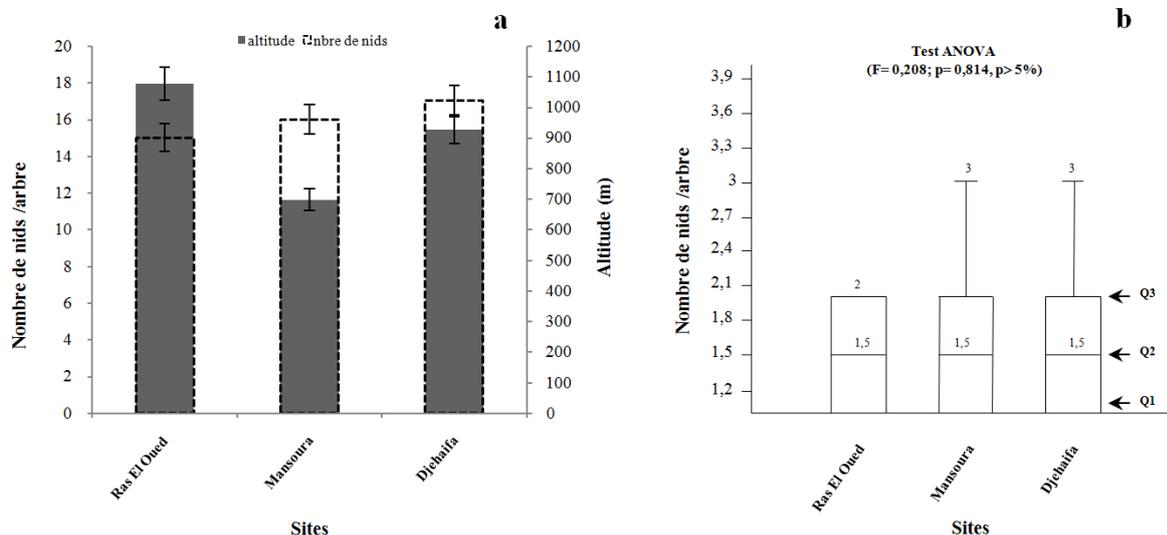


Figure 3. Nombre de nids par arbre de la chenille processionnaire chez *P. halepensis* par rapport à l'altitude

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

5. Tendance de l'abondance et le positionnement selon les directions cardinales des nids d'hiver

Les données de l'abondance et de l'orientation des nids d'hiver de *T. pityocampa* ont été soumises à une ACP (Analyse en Composantes Principales). L'analyse est satisfaisante pour l'ensemble des paramètres étudiés dans la mesure où plus de 80% de la variance est exprimée sur les deux premiers axes (Fig. 4).

La projection des variables relatives à l'abondance des nids d'hiver dans chaque site étudié à travers l'axe 1 (86,81%), montre que les arbres du pin d'Alep présentent le même niveau d'infestation par les nids d'hiver de la chenille de *T. pityocampa* dans les différentes régions étudiées. En se référant aux coefficients de corrélation enregistrée, cette similitude est confirmée (Fig.4 Axe 1). La projection estime que les chenilles de *T. pityocampa* s'attaquent aux essences du pin d'Alep *P. halepensis* quel que soit la région et l'altitude, car ces nids d'hiver sont présent dans les trois sites étudiés avec leur différence altitudinale.

affecté par l'effet de l'altitude (Fig. 3a). Cette similitude de l'effet altitude sur le nombre de nids d'hiver est confirmée par le test d'ANOVA One Way, qui signale la présence d'une différence non significative ($F=0,208$; $p=0,814$, $p>5\%$) (Fig.3 b).

En revanche, la projection des abondances et des orientations cardinales sur l'axe 2 (12,87%) démontre que le site de Ras El Oued est caractérisé par un positionnement des nids d'hiver aux points cardinaux Est et Nord. Les deux autres sites à savoir Mansoura et Djehaifa sont caractérisés par un positionnement des nids aux points cardinaux Sud et Ouest des nids d'hiver. La corrélation négative enregistrée confirme cette discrimination de l'effet positionnement (Fig. 4 Axe 2). La projection estime que les chenilles de *T. pityocampa* installent ses nids d'hiver dans la direction cardinale Sud et Ouest à une altitude de 698 à 928 m et au-delà de cette altitude le positionnement des nids change vers le côté Est et Nord comme c'est le cas du site de Ras El Oued (1077m).

6. Qualité phytochimiques des aiguilles du pin d'Alep et son incidence sur le nombre de nids d'hiver

Les résultats graphiques de la qualité phytochimique en polyphénols et flavonoïdes des aiguilles de *P. halepensis* des trois sites étudiés sous l'influence des attaques de les chenilles de *T. pityocampa* sont reportés sur la figure 5.

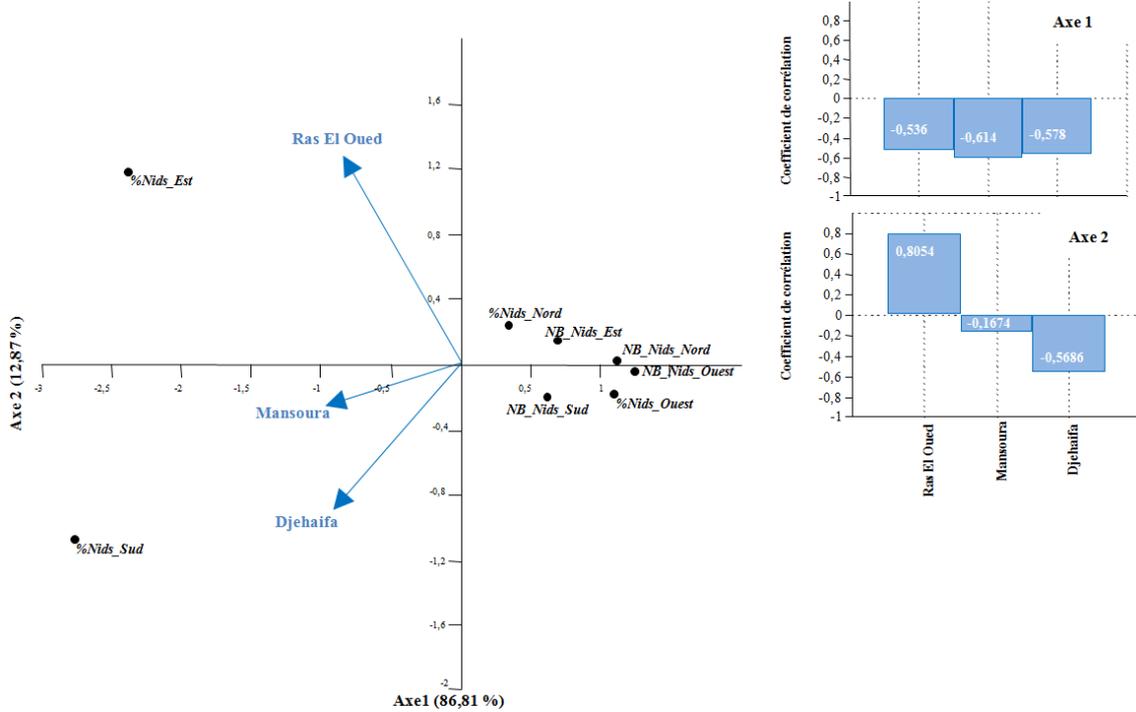


Figure 4. Projection des abondances des nids d'hiver selon les directions cardinales sur les deux axes de l'ACP.

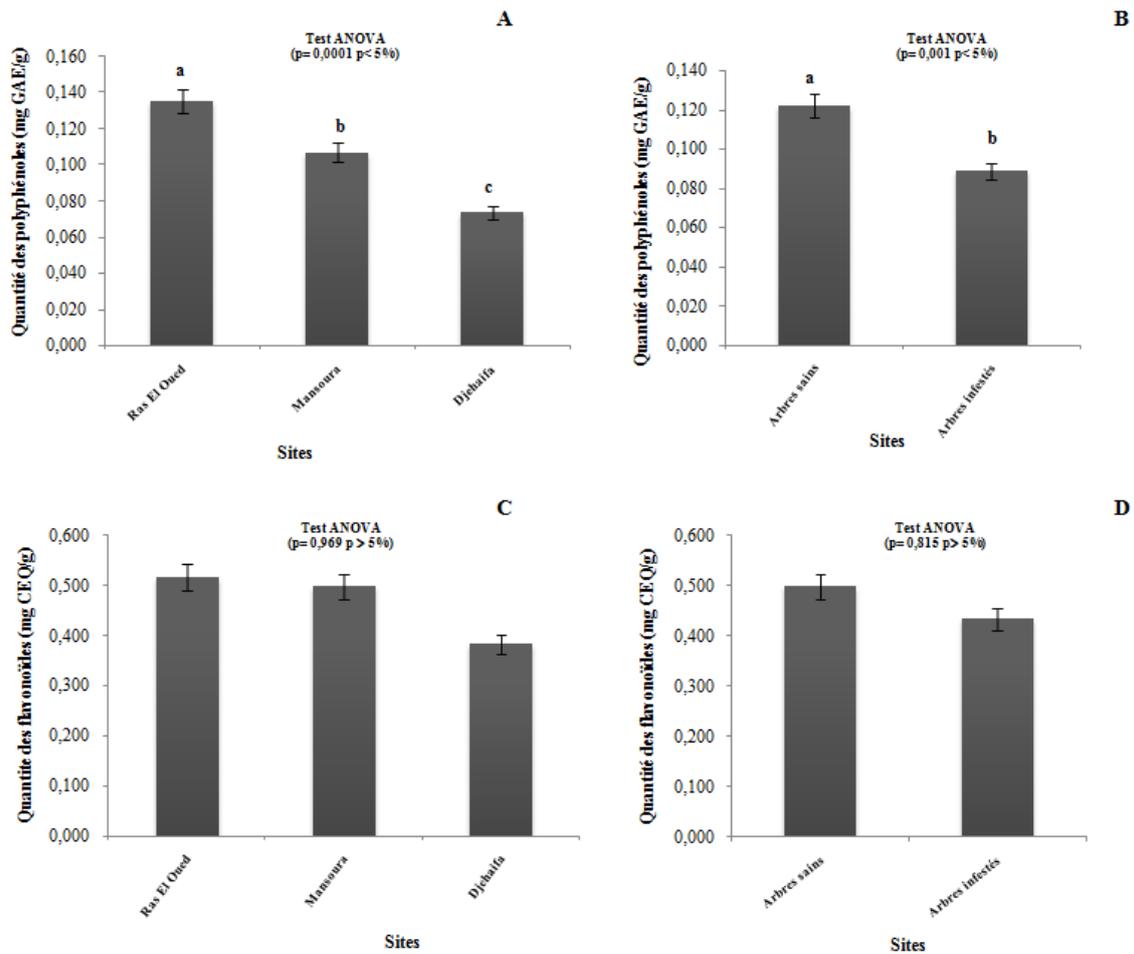


Figure 5. Variation des concentrations des polyphénols et des flavonoïdes des essences sains et infestés de *P. halepensis* dans les trois sites étudiés.

(A) : Quantité des polyphénols des arbres du pin d'Alep des trois sites étudiés, (B) : Quantité des polyphénols des arbres sains et infestés du pin d'Alep, (C) : Quantité des flavonoïdes des arbres du pin d'Alep des trois sites étudiés, (D) : Quantité des flavonoïdes des arbres sains et infestés du pin d'Alep.

Les taux des polyphénols enregistrés chez les arbres des sites d'études révèlent une différence très hautement significative ($p=0,0001$; $p < 1\%$). De plus, les arbres sains (non attaqués) accumulent significativement les polyphénols par rapport aux arbres infestés ($p=0,001$, $p < 1\%$) (Fig.5 A et B). Alors que les teneurs en flavonoïdes ne varient pas significativement chez les arbres sains et infestés des trois sites ($p = 0,969$; $p > 5\%$) (Fig.5 C). et ($p=0,815$, $p > 5\%$) (Fig.5 D).

Par ailleurs, le test de Tukey, montre l'existence d'une gradation négative en termes d'accumulation des polyphénols évoluant dans le sens Ras El Oued < Mansoura < Djehaifa désignant des groupes homogènes individualisés (a, b, c) (Fig.5 A).

En revanche, la même gradation est signalée entre arbres sains et arbres infestés avec des taux conséquent en polyphénols chez les arbres sains (groupe homogène a) par opposition aux arbres infestés (groupe homogène a) (Fig.5 B).

Le tableau 2 illustre le degré d'associabilité entre la qualité phytochimique (teneurs en polyphénols et flavonoïdes) des aiguilles des arbres du pin d'Alep *P. halepensis* et le nombre de nids d'hiver de *T. pityocampa* traduit par la corrélation de Pearson. Les valeurs du coefficient de corrélation de Pearson montrent que les teneurs en polyphénols influencent négativement l'abondance des nids d'hiver au niveau des sites de Ras El Oued et Mansoura. Cependant, les quantités de flavonoïdes conditionnent l'installation des nids au niveau des mêmes sites.

Tableau 2 : Relation entre la qualité phytochimique du pin d'Alep *P. halepensis* et le nombre de nids d'hiver de *T. pityocampa* des trois sites étudiés

	Ras El Oued		Mansoura		Djehaifa	
	Nombre de Nids		Nombre de Nids		Nombre de Nids	
	r de Pearson	<i>p</i>	r de Pearson	<i>p</i>	r de Pearson	<i>P</i>
Quantité des Polyphénols	-0,7011	0,0505	-0,8192	0,0389	0,4001	0,0293
Quantité des Flavonoïdes	0,9851	0,0110	0,9823	0,0120	-0,2191	0,0110

DISCUSSION

L'estimation de la taille d'une population de ravageurs est d'une grande importance. La croissance d'une population donnée peut être liée à une variété de problèmes biologiques tels que l'adaptation écologique, la constitution génétique, évolution de la sélection naturelle...etc. Les stades tels que les pupes, les œufs ou larves sont généralement utilisés pour surveiller les fluctuations de la densité des insectes à long terme [23]. Trouver de bonnes substitutions de la densité de la population qui sont faciles à mesurer est une étape clé dans les programmes de lutte contre les ravageurs forestiers. Différentes études ont démontré une forte corrélation entre la densité de population au début du cycle nuisible et la défoliation [24, 25, 26, 27 et 28]. De tel relations permettent d'anticiper les dégâts causés aux arbres et sont donc cruciaux pour guider la gestion des ravageurs forestiers.

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

Cependant, pour répondre à ces questions, nous avons développé une approche méthodologique commune aux deux systèmes hôtes-ravageur étudiés, basée sur l'estimation de quelques facteurs abiotique et biotique de la plante hôte *Pinus halepensis* Mill. et sur la caractérisation du choix du positionnement des nids d'hiver comme stratégie d'exploitation de l'hôte par ce défoliateur *Thaumetopoea pityocampa* Schiff.

1. Effet des facteurs hauteur et altitude des arbres sur l'abondance des nids d'hiver

Des études menées par Demolin [29] ont montré qu'au niveau du même peuplement de pin, la taille des arbres joue un rôle prépondérant dans l'attraction de l'insecte lors de la ponte. Khoudja [30] a trouvé que la fréquence et l'intensité d'attaque sont étroitement liées à la hauteur des arbres de pin d'Alep. Le choix d'un profil d'arbres bien particulier par les femelles pondueuses se dirigeant en vol vers les arbres se découpant en silhouette sur fond clair [31, 32] et montrent ainsi une attraction très nette vers les arbres isolés ou de crêtes. L'arrêt de la femelle gravide et féconde effectue un choix sélectif à l'intérieur du peuplement et ce choix ne pourra avoir lieu que si elle rencontre un pin, seul végétal offrant le support recherché : diamètre des aiguilles, une structure rugueuse permettant l'insertion optimale des griffes de l'insecte [29].

Le choix du positionnement des nids d'hiver par femelles de la chenille processionnaire du pin, ne semble pas être affecté par la taille (la hauteur) des arbres infestés du pin d'Alep, car selon nos résultats, les arbres se trouvant dans les sites étudiés et qui présentent une hauteur moyenne de 2 à 2.54 m ont enregistré un nombre de nids presque similaires avec respectivement une moyenne de $1,7 \pm 0,59$; $1,6 \pm 0,27$ et $1,5 \pm 0,23$ nids/arbre. Contrairement à ce qu'a été avancée par Sghaier *et al.* [33] qui ont montré qu'en tenant compte de la hauteur des arbres et la variabilité de la provenance (origine) du point de vue intensité d'infestation (nombre de nids) permet de constater que la taille des arbres joue un rôle prépondérant dans l'attaque par la chenille processionnaire du pin. Egalement, nos résultats ont révélé une ressemblance dans la disponibilité des nids d'hiver par rapport à l'altitude des trois sites considérés, cette similitude paraît ne pas être conditionnée par l'effet site et altitude (Ras El Oued 84,44% et de Djehaifa 84,18 % et Mansoura 75,32%). Nos résultats sont analogues à ceux de Battisti *et al.* [34] qui ont montré que la distribution de *T. pityocampa* dans les Alpes l'italien a avancé d'une altitude de 1150 m en 1975 à 1380 m en 2004, soit l'équivalent de 70,1 m par décennie. Ainsi, *T. pityocampa* entre dans de nouvelles zones bioclimatiques et bioécologiques où il pourrait affecter la faune résidente par le biais,

de nouvelles interactions compétitives pour le pin ressources, effets indirects sur la qualité de l'hôte, effets indirects en cascade parasitoïdes et transmission de virus / maladies. De tels effets sont peu connus chez les insectes en expansion et sont peu documentés en tant qu'espèces envahissantes [35].

Du fait que les pineraies étudiées attireraient de la même manière ou intensité les chenilles de l'espèce *Thaumetopoea* cela pourrait être probablement expliqué par le fait que les trois sites présentent les mêmes conditions environnementales car les trois sites sont classées dans le même étage le bioclimatique qui est le semi-aride. Actuellement, la chenille processionnaire du pin se rencontre dans tous les pays de la méditerranée occidentale et se répand actuellement dans les latitudes supérieures probablement en réponse au changement climatique avec des températures hivernales croissantes [10, 11, 36]. C'est pourquoi certaines zones géographiques sont plus favorables que d'autres au développement des chenilles processionnaires du pin. Les facteurs climatiques, ainsi que la quantité et la qualité des ressources alimentaires (qui conditionnent notamment la fécondité des femelles) participent ainsi aux importantes variations de niveaux de populations [37]. Selon certains travaux de recherches, plus l'été sera doux (altitude élevée ou latitude nordique par exemple) et plus les adultes pourront émerger précocement [13, 36 et 37]. Plusieurs études ont montré l'impact du réchauffement climatique sur le déplacement des limites d'aires de répartition des espèces [38, 39] et plus particulièrement des lépidoptères [40, 41].

2. Tendance de l'abondance et le positionnement des nids d'hiver selon les directions cardinal

Les données de l'abondance et le positionnement des nids d'hiver de *T. pityocampa* en rapport avec les directions cardinal, montrent que les arbres du pin d'Alep présentent le même niveau d'infestation dans les différentes régions étudiées. La projection des variables relatives à l'abondance des nids d'hiver estime que les chenilles de *T. pityocampa* installent ses nids d'hiver dans la direction cardinal Sud et Ouest à une altitude de 698 à 928 m et au-delà de cette altitude le positionnement des nids change vers le côté Est et Nord comme c'est le cas du site de Ras El Oued (1077m).

Nos résultats, cependant, ont révélé une relation entre la densité de la population et le choix de l'orientation cardinale et que les orientations Sud et ouest sont les plus recherchées par la chenille processionnaire du pin. Nous estimons, que les stratégies adoptées par les chenilles de *T. pityocampa* pour le choix du positionnement des nids hiver sur la plante hôte sont insuffisamment étudiés. Néanmoins, il est généralement établi que le comportement de ponte et du choix de l'hôte peut permettre d'identifier le type de dynamique des populations des insectes herbivores. Un comportement sélectif permet aux femelles de contrôler le nombre d'œufs pondus en fonction de l'état de la plante hôte et de la présence d'autres individus afin que les ressources ne soient pas surexploitées. D'un autre côté, une absence de sélectivité ne permet pas une connaissance rapide de l'interaction entre une ressource alimentaire détériorée et la natalité et peut traduire une dynamique active des populations [42]. Les chenilles processionnaires du pin sont capables de s'adapter afin de compenser d'éventuelles variations climatiques, comme l'illustre la construction et l'orientation du nid d'hiver, permettant d'allier effet de masse (atténuation de fortes variations de température par regroupement de nombreux individus) et insolation maximale [13]. La zone de distribution potentielle de *T. pityocampa* est délimitée par plusieurs seuils de températures hivernales [10, 11, 43]. Dans l'ensemble, les faibles corrélations peuvent être attribuées principalement à des facteurs climatiques, facteurs déterminant la survie des larves après l'échantillonnage pendant l'hiver [29, 11, 43, 44 et 06]. Battisti *et al.* [11] et Robinet *et al.* [45] ont trouvés que les populations de cet insecte d'hiver d'origine méditerranéenne se développent vers des latitudes et des altitudes plus Europe du Sud et de l'Ouest.

3. Qualité phytochimiques des aiguilles du pin d'Alep et son incidence sur le nombre de nids d'hiver

Dans cette expérimentation, nous avons tenté de mettre en évidence le possible recoupement entre la composition phytochimique des aiguilles du pin d'Alep et la présence de la processionnaire. Les résultats ont indiqué que les pineraies étudiées attireraient de la même façon les individus de l'espèce *Thaumetopoea*.

Ainsi, la phytophagie serait largement influencé par la chimie et la physiologie de la plante hôte [46]. La qualité nutritionnelle est un facteur clé de la croissance des stades immatures des insectes [47, 48]. Egalement, la biologie de l'insecte, le type de substrat consommé et l'intensité du stress hydrique sont des facteurs clés qui expliquent la réponse différentielle des insectes phytophages forestiers à la fois à la modification de l'état de leur hôte et au climat [37, 38].

La défoliation par un herbivore peut engendrer une réaction de défense de la part de la plante attaquée [49,50]. Une défoliation n'engendre pas qu'une modification morphologique de l'arbre, mais également une modification physique et physiologique, c'est la réponse induite physiologique comme réponse de défense de la part de l'arbre [49, 51]. Cette réaction peut se traduire par une diminution de la qualité de la nourriture pour le défoliateur [52]. La défoliation d'hiver par *T. pityocampa* est connue pour affecter directement la qualité de feuillage juvénile qui doit être produit au printemps suivant [53]. Cependant, les effets sur les différentes cohortes d'aiguilles mûres ne sont pas bien documentés pour les pins sylvestres. Cette modification des qualités nutritives du feuillage est appelée réponse induite et a été donnée plusieurs fois comme explication à l'arrêt des phases éruptives des insectes [53, 54]. 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 [54]. Chez le pin sylvestre, des modifications physico-chimiques des aiguilles qui altèrent leur qualité pour les herbivores ont été rapportées suite à une défoliation [55, 56, 52 et 57].

Chez le pin, il a été montré que la défoliation par des herbivores provoquait une augmentation du niveau d'azote et une diminution du taux de fibres dans les jeunes aiguilles. Ces modifications sont connues pour améliorer la qualité nutritive des aiguilles, or elles ont un impact négatif sur les chenilles d'Isabelle de France [58]. En ce qui concerne les pins, plusieurs études ont montré une influence retardée de la défoliation sur le contenu chimique des aiguilles. Le niveau d'azote était significativement plus élevé dans les aiguilles de pins précédemment défolié par *T. pityocampa* [53] ou d'autre défoliateur [51, 49].

Dans le cas de notre étude, la réponse des polyphénols et flavonoïdes au comportement alimentaire peut être induite par une telle relation. Hódar et al. [54] ont également montré une parallèle connexion entre un niveau de fibre inférieur dans les aiguilles de pins défoliées par *T. pityocampa* et les composés phénoliques, ces derniers étant également connu pour être des inhibiteurs de digestion [59]. Ces données pourraient suggérer que le feuillage des pins défoliés est de meilleure qualité pour l'alimentation larvaire [60, 61, 62]. Hódar et al. [54] ont également remarqué que les terpènes les plus abondants du feuillage de pin sylvestre dans les montagnes de la Sierra Nevada avaient des concentrations plus faibles dans les arbres précédemment défoliés par *T. pityocampa*. Au contraire, β -pinène a augmenté dans les pins défoliés l'année précédente mais pas dans les 2 ans avant où ont été confronté à deux défoliations consécutives. Ils ont conclu que les terpènes pouvaient être plus constitutifs qu'inductibles dans le pin sylvestre. Dans le pin ponderosa (*Pinus ponderosa*), Roitto et al. [63] et Wagner et Evans [64] ont également remarqué que le nombre de composés phénoliques a rapidement doublé dans le feuillage mature des semis, seulement 8 semaines après une défoliation manuelle. En revanche, Watt et al. [65] à remarquer que la teneur en azote et tannin des aiguilles mûres dans le pin tordu (*Pinus contorta*) en Ecosse n'a pas été affecté de manière significative par une défoliation grave au cours de l'automne précédent par la chenille, *Panolis flammea* (Schiffermüller, 1776) (Lepidoptera: Noctuidae).

De nombreuses études ont montré des résultats contradictoires sur l'influence du milieu abiotique sur les traits foliaires et les conséquences sur les communautés d'insectes herbivores associées. En conditions non limitantes en énergie lumineuse, les feuilles présentent une résistance plus forte aux herbivores grâce à l'augmentation de la quantité de tannins, entraînant une appétence plus faible due essentiellement à une diminution de la surface spécifique foliaire, ou une diminution de la qualité des tissus liée aux quantités d'eau et d'azote contenus dans les feuilles. L'architecture du plant ou des feuilles influence également les dégâts d'herbivorie subis par la plante [66] En particulier,

certaines femelles d'insectes (Lépidoptères, Hyménoptères) choisissent une plante hôte au feuillage plus dense pour l'oviposition [67], ou une architecture des feuilles plus propices à la formation de structure de protection des larves contre leurs prédateurs [68, 69, 70, 71 et 72].

CONCLUSION

L'approche méthodologique engagée dans un souci de gestion et de prévention des risques, liés aux attaques de la chenille processionnaire du pin *T. pityocampa* par l'étude du choix du positionnement des nids d'hiver et son interaction avec la qualité phytochimique du support nourricier. Les résultats informent que les facteurs biotiques sont en étroite interaction avec les facteurs abiotiques et impact significativement la quantité et la qualité des ressources et des sites de reproduction des ravageurs. Il semble que la stratégie de gestion des ravageurs devrait être fondée sur le risque prévision à travers une compréhension plus holistique sur les changements et les changements écologiques qui en résultent.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Quézel, P., et Médail, F. (2003).** Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Elsevier Collection Environnement, Paris, 573 p.
- [2] **Anonyme, (2016).** DFG Direction générale des forêts. Service statistique.
- [3] **Mezali, M. (2003)** : Rapport sur le secteur forestier en Algérie. 3ème session du forum des Nations Unis sur les forêts, 9 p.
- [4] **Kadik B. (1987):** Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) en Algérie. Ecologie, dendrométrie, Morphologie. O.P.U. Alger : 50-145 p.
- [5] **Robinet, C. (2006).** *Modélisation mathématique des phénomènes d'invasion en écologie: exemple de la chenille processionnaire du pin*. Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, France, 188p.
- [6] **Hódar, J.A., Zamora, R., Cayuela, L., (2012).** Climatic change and the incidence of a forest pest in Mediterranean ecosystems: can the North Atlantic Oscillation be used as a predictor? *Clim. Change* 113 (3–4): 699–711.

- [7] **Jacquet JS, Orazio C, Jactel H. (2012)** Defoliation by processionary moth significantly reduces tree growth: a quantitative review. *Annals of Forest Science* 69(8): 857-866
- [8] **Jacquet JS, Bosc A, O'Grady AP, Jactel H. (2013)** Pine growth response to processionary moth defoliation across a 40-year chronosequence. *Forest Ecology and Management* 293: 29-38
- [9] **Linares, J.C., Senhadji, K., Herrero, A., Hódar, J.A., (2014).** Growth patterns at the southern range edge of Scots pine: disentangling the effects of drought and defoliation by the pine processionary caterpillar. *For. Ecol. Manage.* 315 : 129-137.
- [10] **Huchon H. et Demolin G. (1971) :** La bioécologie de la processionnaire du pin dispersion potentielle dispersion actuelle. F; F; XXII. Spécial la lutte biologique en forêt : 220-234 p
- [11] **Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., & Larsson, S. (2005)** Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15: 2084-2096.
- [12] **Robinet C., Rousselet J., Goussard F & Roques A., (2010):** *Modelling the range expansion of an urticating moth with global warming: a case study from France.* In: Settele J, ed. Atlas of Biodiversity Risks - From Europe to the Globe, From Stories to Maps. Pensoft, Sofia, 82-83.
- [13] **Hoch, G., Toffolo, E.P., Netherer, S., Battisti, A., & Schopf, A. (2009)** Survival at low temperature of larvae of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* from an area of range expansion. *Agricultural and Forest Entomology*, 11: 313-320.
- [14] **Jactel H, Menassieu P, Vetillard F, Barthelemy B, Piou D, Ferot B, Rousselet J, Goussard F, Branco M, Battisti A. (2006)** Population monitoring of the pine processionary moth (Lepidoptera : Thaumetopoeidae) with pheromone-baited traps. *Forest Ecology and Management* 235: 96-106
- [15] **Cayuela, H., M. Cheylan, and P. Joly. (2011).** The best of a harsh lot in a specialized species: breeding habitat use by the yellow-bellied toad (*Bombina variegata*) on rocky riverbanks. *Amphibia-Reptilia* 32:533-539
- [16] **Rondeux, J. (1993).** *La mesure des arbres et des peuplements forestiers.* Presses agronomiques, Gembloux, Belgique. 521 p.
- [17] **Romani A., Pinelli P., Cantini C., Cimato A and Heimler D. (2006).** Characterization of Violetto di Toscana, a typical Italian variety of artichoke (*Cynara scolymus* L.). *J. Food Chem.* 95: 221-225.
- [18] **Boizot N. et Charpentier J-P. (2006)** Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. *Cah. Tech. INRA.* pp. 79-82.
- [19] **Tereschuk ML, Baigorí MD, Figueroa LIC de, Abdala LR (2004)** Flavonoids from Argentine Tagetes (Asteraceae) with antimicrobial activity. Public Health and Microbiology: Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology. *Humana Press, Totowa, NJ* 268: 317-330
- [20] **Dehpour A. A., Ibrahimzadeh M. A., Seyed Fazel N et. Seyed Mohammad N. (2009).** Antioxydant activity of the methanol extract of *Ferula assafoetida* and its essential oil composition. *Grasas Y Aceites.* 60: 405-412.
- [21] **Hammer O., Harper D.A.T., & Rayan P. D., (2001):** PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Pelaeontologia Electronica* (1): 9p.
- [22] **Frison L., Pocock S.J., (1992).** Repeated measures in clinical trials: analysis using mean summary statistics and its implication for design. *Stat Med* 11 : 1685-1704.
- [23] **Wainhouse, D., (2005).** *Ecological Methods in Forest Pest Management.* Oxford University Press, Oxford, UK, 288 pp.
- [24] **Gansner, D. A., O. W. Herrick & M. Ticehurst. (1985).** A method for predicting gypsy moth defoliation from egg mass counts. *North. J. Appl. For.* 2: 78-79.
- [25] **Lysyk, T.J., (1990).** Relationships between spruce budworm (Lepidoptera: Tortricidae) egg mass density and resultant defoliation of balsam fir and white spruce. *Can. Entomol.* 122: 253-262.

- [26] Williams, D. W., R. W. Fuester, W. W. Metterhouse, R. J. Balaam, R. H. Bullock & R. J. Chianese. (1991). Oak defoliation and population density relationships for the gypsy moth. *J. Econ. Entomo.* 84: 1508-1514.
- [27] Carroll, A.L., Quiring, D.T., (1993). Influence of feeding by *Zeiraphera canadensis* (Lepidoptera: Tortricidae) on growth of white spruce: larval density–damage and damage–shoot production. *J. Appl. Ecol.* 30: 629–639.
- [28] Parsons, K., Quiring, D., Piene, H., Farrell, J., (2003). Temporal patterns of balsam fir sawfly defoliation and growth loss in young balsam fir. *For. Ecol. Manage.* 184 : 33–46.
- [29] Démolin, G. (1969) Comportement des adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff.: dispersion spatiale, importance écologique. *Annales des Sciences Forestières*, 26 : 81-102.
- [30] Khouja M.L. (1997) - *Variabilité géographique du Pin d'Alep en Tunisie: perspectives d'amélioration de la productivité et de la qualité physique du bois*. Université Catholique de Louvain-la-Neuve (Belgique), Thèse de doctorat, 181 p.
- [31] Zamoum M. (1998). *Données sur la bioécologie, les facteurs de mortalité et la dynamique des populations de Thaumetopoea pityocampa Denis et Schifferrmüller. (Lep., Thaumetopoeidae) dans les pineraies subsahariennes de la région de Djelfa (Algérie)*. Thèse de Doctorat, Univ. des Sciences de Rennes I, France, 247 pp.
- [32] Zovi D., Petruco Toffolo E., De Gol D., Schlyter F. & Battisti A. (2005). Tree apparency and host location by *Thaumetopoea pityocampa* on *Pinus nigra*. Comm. Meeting Promoth, France, p. 23. In: UE RTD Project – Quality of Life and Management of Living Resources, Global change and pine processionary moth: a new challenge for integrated pest management, Promoth, QLK5-CT-2002-00852, Scientific programme and abstracts, Multifunctional management of forests, Belgodere, Calvi, Corsica, France.
- [33] Sghaier T., Khoudj M.L. et Ben Jamaa M.H., (1999) : *Annales de l'INRGEF* 3 :21-31.
- [34] Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E. & Larsson, S. (2006) A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12: 662–671.
- [35] Kenis M, Auger-Rozenberg M-A, Roques A, Timms L, Pe´re´ C, Cock MJW, Settele J, Augustin S & Lopez-Vaamonde C., (2009) Ecological effects of invasive alien insects. *Biological Invasions* 11: 21–45.
- [36] Robinet C., Imbert C.-E., Rousset J., Sauvard D., Garcia J., Goussard F., Roques A., (2012) - Human-mediated longdistance jumps of the pine processionary moth in Europe. *Biological invasions*, 14: 1557-1569
- [37] Koricheva, J., Larsson, S., and Haukioja, E. (1998). Insect performance on experimentally stressed woody plants: a meta-analysis. In *Annual Review of Entomology* 43: 195-216.
- [38] Jactel, H., Petit, J., Desprez-Loustau, M.-L., Delzon, S., Piou, D., Battisti, A., and Koricheva, J. (2011). Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. In *Global Change Biology*.18: 267–276.
- [39] Hickling R, Roy DB, Hill JK, Fox R, Thomas CD. (2006). The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding pole wards. *Global Change Biology* 12: 450–455.
- [40] Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C., & Pounds, J.A. (2003) Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421: 57-60.
- [41] Parmesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu, C., Hill, J.K., Thomas, C.D., Descimon, H. et al. (1999). Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 399: 579–583.
- [42] Tammaru T., Esperk T., Castellanos I. (2002). No evidence for costs of being large in females of *Orgyia* spp. (Lepidoptera, Lymantriidae): larger is always better. *Oecologia* 133:430–8.
- [43] 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.

- [44] Pimentel, C., Calvao, T., & Ayres, M.P. (2011) Impact of climatic variation on populations of pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* in a core area of its distribution. *Agricultural and Forest Entomology*, 13:273-281.
- [45] Robinet, C., Imbert, C.-E., Rousselet, J., Sauvard, D., Garcia, J., Goussard, F., & Roques, A. (2011) Human-mediated long-distance jumps of the pine processionary moth in Europe. *Biological Invasions*, 1-13.
- [46] Karban R, Myers JH. (1989) Induced plant responses to herbivory. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 20 :331–348.
- [47] Scriber, J. M. and F. Slansky, Jr., 1981. The nutritional ecology of immature insects, *Annu. Rev. Entomol.* 26:183–211.
- [48] Amalraj, D.; N. Sivagnaname & P. Das. (2005). Effect of food on immature development, consumption rate, and relative growth rate of *Toxorhynchites splendens* (Diptera: Culicidae), a predator of container breeding mosquitoes. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz* 100 (8): 893-902
- [49] Haukioja, E. (1990) Induction of Defenses in Trees. *Annual Review of Entomology*, 36: 25-42.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] Smits, A. & Larsson, S. (1999) Effects of previous defoliation on pine looper larval performance. *Agricultural and Forest Entomology*, 1: 19-26.
- [53] Battisti, A. (1988) Host–plant relationships and population dynamics of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Denis and Schiffermüller). *Journal of Applied Entomology-Zeitschrift Fur Angewandte Entomologie*, 105: 393-402.
- [54] Hodar J.A., Zamora R. (2004): Herbivory and climatic warming: a Mediterranean outbreaking caterpillar attacks a relict, boreal pine species. *Biodivers. Conserv.* 13: 493–500.
- [55] Honkanen, T., Haukioja, E., & Kitunen, V. (1999) Responses of *Pinus sylvestris* branches to simulated herbivory are modified by tree sink/source dynamics and by external resources. *Functional Ecology*, 13: 126-140.
- [56] Poykko, H., Rautio, P., Hyvarinen, M., Tuomi, J., Markkola, A., Kuikka, K., & Roitto, M. (2005) Differential performance of two geometrids on previously defoliated Scots pine. *Annales Zoologici Fennici*, 42: 497-503.
- [57] Smits, A., Larsson, S., & Hopkins, R. (2001) Reduced realised fecundity in the pine looper *Bupalus piniarius* caused by host plant defoliation. *Ecological Entomology*, 26 : 417- 424.
- [58] Imbert C.E. (2012). *Expansion d'un ravageur forestier sous l'effet du rechauffement climatique : la processionnaire du pin affecte-t-elle la biodiversite entomologique dans les zones nouvellement colonisees ?* These de doctorat. Univ Orleans 192 p.
- [59] Waterman, P.G. and S. Mole. (1994). *Analysis of Phenolic Plant Metabolites*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 238 p
- [60] Mattson W.J. (1980) Herbivory in relation to plant nitrogen content. *Oecologia*, 81: 186-191
- [61] McMillin, J.D., Hengxiao, G., Wagner, M.R., Long, X.S., (1996). Spatial distribution patterns of pine sawflies (Hymenoptera: Diprionidae) in Arizona, US and Sichuan, PR of China. *For. Ecol. Manage.* 86 (1–3): 151–161.
- [62] Hódar J. A., Zamora R., Castro J., (2002). Host utilization by moth and larval survival of pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* in relation to food quality in three *Pinus* species. *Ecological Entomology*, 27: 292-301
- [63] Roitto, M., A.M. Markkola, R. Julkunen-Tiitto, T. Sarjala, P. Rautio, K. Kuikka and J. Tuomi. (2003). Defoliation-induced responses in peroxidases, phenolics and polyamines in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles. *J. Chem. Ecol.* 29:1877–1890.

- [64] **Wagner, M. R. and P. D. Evans. (1985).** Defoliation increases nutritional quality and allelochemicals of pine seedlings. *Oecologia* 67: 235–237.
- [65] **Watt, A. D., Newton, A. C., and Cornelius, J. P. (1991).** *Resistance in mahoganies to Hypsipyla species – a basis for integrated pest management.* pp. 89-95 in *Hypsipyla Shoot Borers in Meliaceae.* R. B. Floyd and C. Hauxwell, (eds.). Symposium Proceedings, 20-23 August 1996, Kandy, Sri Lanka. Australian Centre for International Agricultural Research Proceedings No. 97, Canberra, Australia. 189 pp.
- [66] **Hanley ME, Lamont BB, Fairbanks MM, Rafferty CM (2007)** Plant structural traits and their role in anti-herbivore defence. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics* 8:157-178
- [67] **Alonso C, Herrera CM (1996)** Variation in herbivory within and among plants of *Daphne laureola* (Thymelaeaceae): Correlation with plant size and architecture. *Journal of Ecology* 84:495-502
- [68] **Marquis RJ, Lill JT, Piccinni A (2002)** Effect of plant architecture on colonization and damage by leafyiting caterpillars of *Quercus alba*. *Oikos* 99:531-537
- [69] **Zammoum M. Martin J.C. et Bensidi A. (2015)** Fecundity of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera: Notodontidae) at the southern edge of its distribution range. *Ann. Pro Exp.* 13: 351-460
- [70] **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 caterpillar, *Thaumetopoea pityocampa*. *Phytoparasitica* 27 (4): 263–272.
- [71] **Hillbur Y., Andersson S., Battisti A., Birgersson G., Cappucci M., Faccoli M., Ostrand F. & Schyter F. (2005).** *Host volatile release from Pinus spp. and female and male reponse in pine processionary moth Thaumetopoea pityocampa: oviposition or habitat cues?* Comm. Meeting Promoth, France, p. 20. In: UE RTD Project – Quality of Life and Management of Living Resources, Global change and pine processionary moth: a new challenge for integrated pest management, Promoth, QLK5-CT-2002-00852, Scientific programme and abstracts, Multifunctional management of forests, Belgod`ere, Calvi, Corsica, France.
- [72] **Hulme, P.E. (1998).** Post-dispersal seed predation: consequences for plant demography and evolution. In *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 1: 32-46.