

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL-HARRACH-ALGER-

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة-الحراش-الجزائر-

## *Thèse*

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

Option : Biologie et Ecologie en Zoologie Agro-Sylvo Pastoral

## *Thème*

**Bioécologie de la processionnaire du cèdre *Thaumetopoea bonjeani* Powell (Lepidoptera, Notodontidae) dans le Djurdjura**

Présentée par : RAHIM Nouredine

### Jury :

|                          |                  |  |
|--------------------------|------------------|--|
| Président :              | Mr. DOUMANDJI S. | Professeur à l'E.N.S.A d'El-Harrach            |
| Directeur de thèse :     | Mr. CHAKALI G.   | Professeur à l'E.N.S.A d'El-Harrach            |
| Co- Directeur de thèse : | Mr. BATTISTI A.  | Professeur à l'Université Padova (Italie)      |
| Examineurs :             | Mr. MOULAI R.    | Professeur à l'université de Bejaia            |
|                          | Mr. HAMMACHE M.  | Maitre de Conférences à l'E.N.S.A d'El-Harrach |

Soutenu le .././2016

## REMERCIEMENTS

---

Ce travail n'aurait jamais pu être possible sans l'aide scientifique, matérielle et psychologique fournie par de nombreuses personnes. C'est à l'ensemble de toutes ces contributions que je dois la finalisation de ce travail.

J'exprime ma gratitude et mes remerciements à Monsieur G. Chakali, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie pour avoir accepté de diriger les travaux de ma recherche et pour la confiance qu'il m'a témoigné en m'accueillant au sein de son équipe, ainsi que son soutien continu, tant au plan humain que professionnel. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour ses orientations, suggestions et ses conseils le long de ce travail. Mes sincères remerciements vont à Monsieur A. Battisti, Professeur à l'Université de Padova, d'avoir accepté de coencadrer mon travail. Toute ma reconnaissance pour sa participation active à la réalisation de ce travail. Son aide a été très fructueuse pour ma formation.

Que Monsieur S. Doumandji, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie soit remercié pour l'honneur de présider le jury et pour son soutien et ses encouragements tout le long de la préparation de ma thèse.

Mes remerciements et toute ma gratitude à Mr R. Moulai., professeur à l'Université de Bejaia et Monsieur M. Hammache., Maître de conférences à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie qui ont accepté de participer à ce jury et d'examiner cette thèse.

J'exprime également ma reconnaissance et mes remerciements à Dr C. Kerdelhué et Dr. J.P. Roussi, chercheurs de CBGP (Centre de Biologie et Gestion des Populations) de Montpellier qui ont largement participé à mon encadrement. Qu'ils trouvent l'expression de toute ma considération. Toute ma gratitude et ma reconnaissance à L. Sauné, Technicienne au CBGP de Montpellier pour son aide et sa contribution à l'élaboration de la partie génétique.

Ce travail a trouvé un soutien particulier des services forestiers. Mes sincères remerciements à M. Y. Meribay, Directeur du Parc National de Djurdjura de m'avoir facilité la réalisation du travail de terrain et pour ses encouragements. Que Messieurs A. Mahdi et Y. Mahri trouvent l'expression de mes remerciements et toute ma reconnaissance pour l'aide au terrain. Toute ma reconnaissance et mon profond respect vont également à Monsieur O. Briki, responsable de la protection des forêts et à tous les forestiers de Batna qui ont contribué à la réalisation de ce travail. De même il m'est agréable de remercier Monsieur Haouari, responsable du Parc National de Theniet El-Had pour son accueil et son aide fructueuse

A ces remerciements, je rends un grand hommage à Monsieur M. Ghelem, technicien au laboratoire d'entomologie pour son aide au terrain et pour ses encouragements et ses orientations à la réalisation de ce travail.

Une pensée particulière pour mes parents, mes frères et mes sœurs pour leur soutien, leur encouragement constant, j'aimerais leur rendre hommage à travers ce travail.

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

# SOMMAIRE

|  |    |
|--|----|
| Liste des tableaux   |    |
| Liste des figures  |    |
| <b>Introduction</b> .....  | 2  |
| <b>PREMIER CHAPITRE : DONNÉES SUR LA PROCESSIONNAIRE DU CEDRE, THAUMETOPOEA BONJEANI POWELL ET SON HOTE CEDRUS ATLANTICA MAN</b> | 6  |
| 1. La processionnaire du Cèdre, <i>Thaumetopoea bonjeani</i> .....   | 6  |
| 1.1. Biosystématique du genre <i>Thaumetopoea</i> .....  | 6  |
| 1.2. Cycle biologique et caractères généraux de <i>Thaumetopoea bonjeani</i> .....   | 9  |
| 1.3. Impact économique, environnemental et sanitaire.....  | 11 |
| 2. Le cèdre de l'Atlas <i>Cedrus atlantica</i> Manetti.....  | 13 |
| 2.1. Position taxonomique.....   | 13 |
| 2.2. Aire naturelle du cèdre de l'Atlas.....   | 13 |
| 2.3. Le cèdre de l'Atlas et son extension.....   | 14 |
| 2.4. Ecologie du cèdre de l'Atlas.....   | 14 |
| 2.4.1. Répartition en altitude.....  | 14 |
| 2.4.2. Exigences climatiques.....  | 15 |
| 2.4.3. Sol.....  | 16 |
| 2.5. Importance économique du Cèdre.....   | 16 |
| <b>DEUXIEME CHAPITRE : PRESENTATION DU PARC NATIONAL DU DJURDJURA, SITE ENVIRONNEMENTAL DE L'ETUDE</b> .....                     | 19 |
| 1. Situation géographique.....   | 19 |
| 1.1. Le relief.....  | 19 |
| 1.2. Structure géologique.....   | 20 |
| 1.3. Hydrographie .....  | 21 |
| 1.4. Conditions climatiques.....   | 21 |
| 1.5. Diversité biologique.....   | 21 |
| 1.5.1. Flore.....  | 21 |
| 1.5.2. Faune.....  | 22 |
| 2. Choix des stations d'étude.....   | 22 |
| 2.1 Présentation des sites d'études.....   | 23 |
| 2.1.1. Cédraie naturelle de Tala-Guilef .....  | 23 |
| 2.1.2. Cédraie artificielle de Halouane.....   | 24 |
| <b>TROISIEME CHAPITRE : ETUDE DES ECOPHASES DE DEVELOPPEMENT DE T. BONJEANI</b> .....  | 27 |

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction.....   | 27 |
| 2. Matériels et méthodes.....  | 27 |
| 2.1. Etude de la phase hypogée et de l’envol des adultes .....   | 27 |
| 2.2. Etude des pontes.....   | 28 |
| 2.2.1. Echantillonnage des pontes .....  | 28 |
| 2.2.2. Mensurations des pontes .....   | 28 |
| 2.2.3. Biométrie des écailles maternelles.....   | 28 |
| 2.2.4. Evaluation du nombre d’œufs par ponte .....   | 28 |
| 2.3. Chronologie des éclosions .....   | 29 |
| 2.4. Phénologie larvaire et processions de nymphose.....   | 29 |
| 2.5. Mensuration des stades de développement de <i>T. bonjeani</i> .....                                     | 29 |
| 2.6. Méthodes d’analyse statistique.....   | 29 |
| 2.6.1. Analyse descriptive.....  | 29 |
| 2.6.2. Distribution de fréquence.....  | 30 |
| 2.6.3. Analyse de la variance (One-Way ANOVA).....   | 30 |
| 2.6.4. Régression linéaire.....  | 30 |
| 3. Résultats.....  | 31 |
| 3.1. Durée de stade nymphal (phase hypogée).....   | 31 |
| 3.2. Chronologie des émergences des papillons.....   | 31 |
| 3.2.1. Cédraie de Tala-Guilef .....  | 31 |
| 3.2.2. Cédraie de Halouane.....  | 32 |
| 3.3. Horaires des émergences des adultes.....  | 33 |
| 3.4. Les séquences horaires du comportement des adultes.....   | 35 |
| 3.5. Longévité des adultes.....  | 36 |
| 3.6. Le sex-ratio.....   | 36 |
| 3.7. Importance des pontes de <i>T. bonjeani</i> .....   | 36 |
| 3.7.1. Biométrie des pontes.....   | 36 |
| 3.7.2. Biométrie des écailles protectrices.....  | 38 |
| 3.7.3. Evaluation du nombre d’œufs par ponte.....  | 39 |
| 3.7.4. Relation entre la longueur des pontes, le diamètre de leurs rameaux supports et le nombre d’œufs..... | 43 |
| 3.8. Chronologie des éclosions.....  | 43 |
| 3.9. Phénologie larvaire et processions de nymphose.....   | 43 |
| 3.10. Caractéristiques biométriques des stades larvaires.....  | 47 |
| 3.11. Biométrie et poids des nymphes.....  | 48 |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.12. Biométrie des adultes.....  | 49        |
| 4. Discussion.....  | 50        |
| <b>QUATRIEME CHAPITRE : FACTEURS DE REGULATION DES POPULATIONS DE <i>T. BONJEANI</i>.....</b>   | <b>55</b> |
| 1. Introduction.....  | 55        |
| 2. Méthodologie adoptée.....  | 55        |
| 2.1. Facteurs de mortalité des œufs.....  | 55        |
| 2.2. Facteurs de mortalité des populations de <i>T. bonjeani</i> au stade larvaire et nymphal.....  | 57        |
| 2.3. Analyses statistiques .....  | 57        |
| 3. Résultats.....   | 57        |
| 3.1. Impact des parasitoïdes et des prédateurs oophage.....   | 57        |
| 3.2. Richesse spécifique des différentes espèces d'ennemis oophage.....   | 59        |
| 3.3. Abondance des parasitoïdes oophages.....   | 62        |
| 3.4. Dynamique des émergences de parasitoïde <i>O. pityocampae</i> .....  | 63        |
| 3.4.1. Emergence des adultes d' <i>O. pityocampae</i> de la génération automnale.....   | 64        |
| 3.4.2. Importance des émergences des adultes d' <i>O. pityocampae</i> de la deuxième génération.....  | 66        |
| 3.5. Choix des sites d'oviposition d' <i>O. pityocampae</i> .....   | 68        |
| 3.6. Parasitoïdes et entomopathogènes du stade nymphal .....  | 69        |
| 3.6.1. Cas de la cédraie de Tala-Guilef.....  | 74        |
| 3.6.2. Cas de la cédraie reboisée du site de Halouane.....  | 73        |
| 3.7. Prédateurs des stades larvaires et du stade nymphal.....   | 74        |
| 4. Discussion.....  | 76        |
| <b>CINQUIEME CHAPITRE : HISTOIRES DE <i>T. BONJEANI</i> ET SON HOTE LE CEDRE DE L'ATLAS : APPROCHES COMBINEES DE PHYLOGEOGRAPHIE ET DE MODELISATION D'AIRE DE DISTRIBUTION.....</b> | <b>81</b> |
| 1. Introduction.....  | 81        |
| 2. Matériels et méthodes.....   | 85        |
| 2.1. Étude phylogéographique par le marqueur mitochondrial cytochrome oxydase I.....  | 85        |
| 2.1.1. Echantillonnage des populations de <i>T. bonjeani</i> .....  | 85        |
| 2.1.2. Extraction de l'ADN, amplification et séquençage.....  | 86        |
| 2.1.3. Analyses des données.....  | 87        |
| 2.1.3.1. Alignement des séquences et distribution des haplotypes.....   | 87        |
| 2.1.3.2. Paramètres génétiques et structuration des populations.....  | 88        |
| 2.1.3.3. Histoire démographique.....  | 88        |

|   |            |
|---|------------|
| 2.2. Prédiction des aires de répartition actuelle, passée et future de <i>T. bonjeani</i> et son hôte <i>C. atlantica</i> .....   | 89         |
| 3. Resultats.....   | 92         |
| 3.1. Étude phylogéographique.....   | 92         |
| 3.1.1. Alignement des séquences et distribution des haplotypes.....   | 92         |
| 3.1.2. Paramètres génétiques et structuration des populations.....  | 93         |
| 3.1.3. Histoire démographique.....  | 95         |
| 3.2. Modélisation des aires de répartition actuelle, passée et future de <i>T. bonjeani</i> et son hôte <i>C. atlantica</i> ..... | 95         |
| 3.2.1. Le cas de <i>Thaumatopoea bonjeani</i> .....   | 95         |
| 3.2.2. Le cas de <i>Cedrus atlantica</i> .....  | 101        |
| 4. Discussion.....  | 105        |
| <b>Conclusions générales.....</b>   | <b>110</b> |
| <b>Références bibliographiques.....</b>   | <b>114</b> |
| <b>Article.....</b>   | <b>133</b> |
| <b>Résumés.....</b>   | <b>146</b> |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 1</b> : Caractéristiques des sites prospectés .....   | 25 |
| <b>Tableau 2</b> : Durée du stade nymphal de <i>T. bonjeani</i> .....  | 31 |
| <b>Tableau 3</b> : Caractéristiques des différentes séquences comportementales des papillons mâles et femelles au laboratoire.....                             | 35 |
| <b>Tableau 4</b> : Longévité des adultes de <i>T. bonjeani</i> .....   | 36 |
| <b>Tableau 5</b> : Sex-ratio de <i>T. bonjeani</i> .....   | 36 |
| <b>Tableau 6</b> : Analyse biométrique des pontes de <i>T. bonjeani</i> .....  | 37 |
| <b>Tableau 7</b> : Mensurations des écailles de <i>T. bonjeani</i> .....   | 39 |
| <b>Tableau 8</b> : Nombre moyen et extrême d'œufs par ponte .....  | 39 |
| <b>Tableau 9</b> : Chronologie des éclosions des œufs de <i>T. bonjeani</i> .....  | 42 |
| <b>Tableau 10</b> : Synthèse des données biométriques des stades larvaires de <i>T. bonjeani</i> en provenance de la cédraie de Tala-Guilef.....               | 47 |
| <b>Tableau 11</b> : Synthèse des données biométriques des stades larvaires de <i>T. bonjeani</i> en provenance de la cédraie de Halouane.....                  | 47 |
| <b>Tableau 12</b> : Taille et poids des chrysalides mâles et femelles de <i>T. bonjeani</i> en provenance de la cédraie de Tala-Guilef.....                    | 48 |
| <b>Tableau 13</b> : Taille et poids des chrysalides mâles et femelles de <i>T. bonjeani</i> en provenance de la cédraie de Halouane.....                       | 48 |
| <b>Tableau 14</b> : Longueurs et envergures des adultes mâles et femelles de <i>T. bonjeani</i> en provenance de la cédraie de Tala-Guilef.....                | 49 |
| <b>Tableau 15</b> : Longueurs et envergures des adultes mâles et femelles de <i>T. bonjeani</i> en provenance de la cédraie de Halouane.....                   | 49 |
| <b>Tableau 16</b> : Analyse descriptive des catégories des œufs.....   | 58 |
| <b>Tableau 17</b> : Nombre moyen de parasitoïdes par ponte et leur abondance relative.....   | 62 |
| <b>Tableau 18</b> : Résultats des émergences des adultes d' <i>O. pityocampe</i> .....   | 63 |
| <b>Tableau 19</b> : Choix du site d'oviposition d' <i>O. pityocampae</i> dans les différentes parties de pontes.....   | 69 |
| <b>Tableau 20</b> : Facteurs de régulation sur la population nymphale de <i>T. bonjeani</i> en provenance de site d'Ikharathan.....                            | 70 |
| <b>Tableau 21</b> : Incidence des facteurs de régulation sur la population nymphale de <i>T. bonjeani</i> en provenance de site Tala-Omadagh.....              | 71 |
| <b>Tableau 22</b> : Incidence des facteurs de régulation sur la population nymphale de <i>T. bonjeani</i> en provenance de site Tizi-Tumlilt.....              | 71 |
| <b>Tableau 23</b> : Incidence des facteurs de régulation sur la population nymphale de <i>T. bonjeani</i> en provenance de la station de Halouane.....         | 72 |
| <b>Tableau 24</b> : Caractéristiques des sites échantillonnés et nombre d'individus analysés.....  | 86 |
| <b>Tableau 25</b> : Variables bioclimatiques utilisées pour la modélisation de la niche climatique de <i>T. bonjeani</i> et son hôte <i>C. atlantica</i> ..... | 92 |
| <b>Tableau 26</b> : Liste des haplotypes retrouvés pour chaque population étudiée et paramètres génétiques correspondant.....                                  | 95 |
| <b>Tableau 27</b> : Distances génétiques entre paires d'haplotypes.....  | 96 |
| <b>Tableau 28</b> : Analyse moléculaire de variance (AMOVA) des populations de <i>T. bonjeani</i> .....  | 97 |
| <b>Tableau 29</b> : Calculs des <i>Fst</i> par paires de populations .....   | 97 |
| <b>Tableau 30</b> : Valeurs du <i>D</i> de Tajima et du <i>Fs</i> de Fu pour les différentes populations de <i>T. bonjeani</i> .....                           | 98 |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1</b> : Comparaison des différentes espèces adultes du genre <i>Thaumetopoea</i> .....  | 8  |
| <b>Figure 2</b> : Adultes mâles de <i>T. bonjeani</i> .....   | 10 |
| <b>Figure 3</b> : Adultes femelles de <i>T. bonjeani</i> .....  | 10 |
| <b>Figure 4</b> : Impact des défoliations causées par <i>T. bonjeani</i> dans la cédraie de Tala-Guilef.....  | 11 |
| <b>Figure 5</b> : Défoliation complète d'un sujet du cèdre à Tala-Guilef.....   | 12 |
| <b>Figure 6</b> : Troubles cutanés après contact avec les chenilles de <i>T. bonjeani</i> .....   | 12 |
| <b>Figure 7</b> : Répartition actuelle du cèdre de l'Atlas.....   | 14 |
| <b>Figure 8</b> : Position du Parc National du Djurdjura.....   | 19 |
| <b>Figure 9</b> : Situation géographique des deux cédraies d'étude.....   | 22 |
| <b>Figure 10</b> : Vue de la cédraie naturelle de Tala-Guilef.....  | 23 |
| <b>Figure 11</b> : Les stations de la région de Tala-Guilef.....  | 24 |
| <b>Figure 12</b> : Vue de la cédraie de reboisement de Halouane.....  | 24 |
| <b>Figure 13</b> : Courbe cumulative des émergences des papillons mâles issues de chenilles en provenance de la cédraie de Tala-Guilef.....   | 32 |
| <b>Figure 14</b> : Courbe cumulative des émergences des papillons femelles issues de chenilles en provenance de la cédraie de Tala-Guilef.....  | 32 |
| <b>Figure 15</b> : Courbe cumulative des émergences des papillons mâles issues de chenilles en provenance de la cédraie de Halouane.....  | 33 |
| <b>Figure 16</b> : Courbe cumulative des émergences des papillons femelles issues de chenilles en provenance de la cédraie de Halouane.....   | 33 |
| <b>Figure 17</b> : Horaires des émergences des adultes mâles et femelles de <i>T. bonjeani</i> .....  | 34 |
| <b>Figure 18</b> : Femelle en position d'appel.....   | 34 |
| <b>Figure 19</b> : Accouplement de <i>T. bonjeani</i> .....   | 34 |
| <b>Figure 20</b> : Séquences de la formation du système alaire chez <i>T. bonjeani</i> .....  | 35 |
| <b>Figure 21</b> : Ponte de <i>T. bonjeani</i> .....  | 37 |
| <b>Figure 22</b> : Œufs de <i>T. bonjeani</i> .....   | 38 |
| <b>Figure 23</b> : Distribution des pontes de <i>T. bonjeani</i> en fonction des diamètres des rameaux porteurs   | 38 |
| <b>Figure 24</b> : Analyse fréquentielle des effectifs des œufs.....  | 40 |
| <b>Figure 25</b> : Relation entre le nombre d'œufs et la longueur des pontes.....   | 41 |
| <b>Figure 26</b> : Relation entre le nombre d'œufs et le diamètre des rameaux supports des pontes.....  | 41 |
| <b>Figure 27</b> : Abondance relative des différents stades larvaires de <i>T. bonjeani</i> évoluant à Tala-Guilef.....   | 43 |
| <b>Figure 28</b> : Abondance relative des différents stades larvaires de <i>T. bonjeani</i> évoluant à Halouane   | 44 |
| <b>Figure 29</b> : Les différents stades larvaires de <i>T. bonjeani</i> .....  | 45 |
| <b>Figure 30</b> : Chenilles en processions de nymphoses et chrysalides de <i>T. bonjeani</i> .....   | 46 |
| <b>Figure 31</b> : Chrysalides mâle et femelle de <i>T. bonjeani</i> .....  | 49 |
| <b>Figure 32</b> : Parasitoïdes oophages de <i>T. bonjeani</i> .....  | 60 |
| <b>Figure 33</b> : Prédateurs oophages de <i>T. bonjeani</i> .....  | 61 |
| <b>Figure 34</b> : Ponte de <i>T. bonjeani</i> détruite par les Tettigoniidae.....  | 61 |
| <b>Figure 35</b> : Emergences des adultes d' <i>O. pityocampae</i> de la génération automnale à partir des pontes de <i>T. bonjeani</i> en provenance de la station d'Ikharathan.....         | 64 |
| <b>Figure 36</b> : Emergences des adultes d' <i>O. pityocampae</i> de la génération automnale à partir des pontes de <i>T. bonjeani</i> en provenance de la station Tala-Omadagh.....         | 64 |
| <b>Figure 37</b> : Emergences des adultes d' <i>O. pityocampae</i> de la génération automnale à partir des pontes de <i>T. bonjeani</i> de la station de Tizi-Tumlilt.....                    | 65 |
| <b>Figure 38</b> : Emergences des adultes d' <i>O. pityocampae</i> de la génération automnale à partir des pontes de <i>T. bonjeani</i> en provenance de la station de Halouane.....          | 65 |
| <b>Figure 39</b> : Emergences des adultes d' <i>O. pityocampae</i> de la génération printano-estivale à partir des pontes de <i>T. bonjeani</i> en provenance de la station d'Ikharathan..... | 66 |
| <b>Figure 40</b> : Emergences des adultes d' <i>O. pityocampae</i> de la génération printano-estivale à partir des pontes de <i>T. bonjeani</i> de la station Tala-Omadagh.....               | 67 |



|  |     |
|--|-----|
| <b>Figure 41</b> : Emergences des adultes d' <i>O. pityocampae</i> de la génération printano-estivale à partir des pontes de <i>T. bonjeani</i> de la station de Tizi-Tumlilt.....     | 67  |
| <b>Figure 42</b> : Emergences des adultes d' <i>O. pityocampae</i> de la génération printano-estivale à partir des pontes de <i>T. bonjeani</i> en provenance de site de Halouane..... | 68  |
| <b>Figure 43</b> : Tachinaires parasitoïdes des stades larvaires et du stade nymphal de <i>T. bonjeani</i> .....   | 69  |
| <b>Figures 44</b> : Les œufs des Tachinaires sur le tégument de la chenille de <i>T. bonjeani</i> .....  | 70  |
| <b>Figure 45</b> : Chenilles et nymphes infectées par <i>B. bassiana</i> .....   | 70  |
| Figure 46 : Adulte d' <i>Heterospilus</i> sp.....  | 73  |
| <b>Figure 47</b> : Les Coléoptères prédateurs des stades larvaires et du stade nymphal de <i>T. bonjeani</i> .....   | 75  |
| <b>Figure 48</b> : Punaises prédatrices stades larvaires de <i>T. bonjeani</i> .....   | 76  |
| <b>Figure 49</b> : Cocon de <i>Meteorus</i> sp.....  | 76  |
| <b>Figure 50</b> : Carte de répartition des cédraies en Algérie, réalisée par le programme QGIS et à partir des images satellitaires récentes (Google Earth).....                      | 86  |
| <b>Figure 51</b> : Carte de répartition des haplotypes de <i>T. bonjeani</i> en Algérie.....   | 93  |
| <b>Figure 52</b> : Aire de distribution potentielle actuelle de <i>C. atlantica</i> .....  | 99  |
| <b>Figure 53</b> : Aire de distribution géographique passée (durant le maximum glaciaire « -21000 ans ») de <i>C. atlantica</i> .....  | 100 |
| <b>Figure 54</b> : Aire de distribution de <i>C. atlantica</i> (marron) en 2050 suivant le scénario de changement climatique RCP4.5 (BCC_CSM1.1).....                                  | 100 |
| <b>Figure 55</b> : Aire de distribution de <i>C. atlantica</i> (marron) en 2070 suivant le scénario de changement climatique RCP4.5 (BCC_CSM1.1).....                                  | 101 |
| <b>Figure 56</b> : Aire de distribution potentielle actuelle de <i>T. bonjeani</i> .....   | 103 |
| <b>Figure 57</b> : Aire de distribution géographique passée (durant le maximum glaciaire « -21 000 ans ») de <i>T. bonjeani</i> .....  | 103 |
| <b>Figure 58</b> : Aire de distribution de <i>T. bonjeani</i> (marron) en 2050 suivant le scénario de changement climatique RCP4.5.....  | 104 |
| <b>Figure 59</b> : Aire de distribution de <i>T. bonjeani</i> (marron) en 2070 suivant le scénario de changement climatique RCP4.5 (BCC_CSM1.1).....                                   | 104 |

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus Atlantica* Manetti) est une essence endémique de l'Algérie et du Maroc qui a toujours suscité un intérêt important en raison de ses nombreuses qualités forestières comme sa faculté d'adaptation à des conditions difficiles (tolérance face aux stress climatiques), sa productivité, un port remarquable et esthétique en forêts de plaisance (Lanier, 1976 ; Toth, 1980 ; M'hirit, 1982 ; Bariteau et Ferrandes, 1992). Le cèdre est, depuis les temps les plus anciens, un symbole de prospérité et de puissance. L'arbre a toujours été exploité en raison de la bonne qualité de son bois, de son odeur agréable, de la pureté de sa résine et de la productivité de ses peuplements (M'hirit et Benzyane, 2006).

Les forêts de cèdre font partie des écosystèmes méditerranéens qui jouent un rôle fondamental notamment dans l'équilibre des régions montagneuses de l'Afrique du Nord. En Algérie, les cédraies suscitent un intérêt exceptionnel qui s'oriente vers la sauvegarde et l'extension. La nécessité de protéger le cèdre est toujours placée en amont des programmes forestiers. C'est ainsi que la majorité des cédraies se trouvent dans des parcs nationaux.

Malgré les facultés adaptatives qui caractérisent les arbres de cèdre (Toth, 1990), cette essence est confrontée à de nombreux problèmes sanitaires. Actuellement le changement climatique constitue un autre facteur de fragilisation des systèmes naturels méditerranéens. Les premiers signes de l'impact de ce changement sont déjà ressentis au niveau de la structure et le fonctionnement des écosystèmes (McCarty, 2001 ; Walther *et al.*, 2002 ; Parmesan, 2006).

Une grande variété d'agresseurs particulièrement les insectes influencent la dynamique de l'écosystème forestier dans sa globalité. La fréquence des infestations périodiques des insectes tend à évoluer sous l'effet des activités anthropiques et des changements climatiques, qui rendent les écosystèmes fragiles aux attaques, particulièrement des défoliateurs et des xylophages qui restent les plus redoutables bioagresseurs de la forêt (Chakali, 2005 ; Bertheau *et al.*, 2009 ). Les observations récentes tendent à montrer que les populations d'insectes forestiers méditerranéens commencent déjà à répondre aux changements climatiques (Parmesan *et al.*, 1999 ; Hellmann *et al.*, 2008; Moore et Allard, 2008 ; Poyry *et al.*, 2009 ). A titre d'exemple, l'accroissement des températures hivernales

a permis à la processionnaire du pin d'étendre son aire de répartition vers le nord à la vitesse de 5,6 kilomètres par an ces dix dernières années (Robinet *et al.*, 2007) et en altitude de 70 mètres par décennies entre 1975 et 2004 (Battisti *et al.*, 2005). Les changements progressifs des caractéristiques du milieu forestier, modifiant le couvert végétal, la structure des peuplements, la morphologie du terrain et les dimensions des arbres, peuvent augmenter à chaque instant la susceptibilité d'un peuplement vis-à-vis des attaques des ravageurs (Berryman, 1976). Les retombées économiques des dégâts sont très importantes. La diversité et l'abondance de certaines espèces entraînent généralement le dépérissement des peuplements forestiers. Ces insectes interviennent, soit comme agresseurs primaires, soit comme agresseurs secondaires, aggravant ainsi l'état de peuplements déjà à capacités de réaction amoindries (Khai Tran *et al.*, 2007 ; Hebertson et Jenkins, 2008).

Plus spécifiquement, les insectes défoliateurs, qu'ils soient permanents ou cycliques, peuvent impacter de manière conséquente et significative la productivité des forêts. Leur effet sur la croissance et la production des essences forestières ont été soulignés par divers auteurs notamment (Du Merle, 1988 ; Arnaldo *et al.*, 2010 ; Avcı et Carus, 2005 ; Jacquet *et al.*, 2013 ; Linares *et al.*, 2014). Le cèdre de l'Atlas comme chaque essence a son cortège d'insectes défoliateurs dont certains lui sont strictement liés (El Yousfi, 1994 ; Frérot et Demolin, 1994 ; Mouna, 2012). D'autres espèces peuvent lui provenir d'arbres ou végétaux présents dans son biotope (Mouna, 2012).

Les espèces de processionnaires appartenant à l'ordre des Lépidoptères provoquent les dégâts les plus spectaculaires parmi tous ceux qui vivent au dépend de son feuillage (Démolin, 1988 ; Mouna, 2012 ; Sebti, 2015). En Algérie deux espèces de processionnaires s'attaquent au cèdre de l'Atlas, la processionnaire du pin *Thaumetopaea pityocampa* (Denis & Schiffermuller) (Lep., Notodontidae) qui s'attaque pratiquement à toutes les espèces des genres *Pinus* et la processionnaire du cèdre *Thaumetopoea bonjeani* (Powell) qui vit exclusivement sur le cèdre de l'Atlas. Leur effet sur la croissance et la production des arbres hôtes ont été soulignés par de nombreux auteurs (Gachi *et al.*, 2005 ; Sbabdji *et al.*, 2009 ; Sbabdji et Kadik, 2011 ; Jacquet *et al.*, 2012). El Yousfi (1994) note que les pertes de production occasionnées par les défeuillaisons de *T. bonjeani* seraient du même ordre que ceux de *T. pityocampa* ou voir même plus importantes. Les défeuillaisons provoquées après débourrement, engendrent un choc physiologique plus significatif. Les parties défeuillées, se régénèrent lentement en émettant des aiguilles de tailles réduites.

Bien souvent les attaques de la processionnaire du cèdre dépassent le seuil de tolérance et provoquent la mort des arbres, cas observés au niveau la cédraie de Belezma (Batna), Chélia (Khenchela) et dans la cédraie de Tala-Guilef (Tizi-Oujazou) (Démolin, 1988 ; Rahim *et al.*, 2015).

Depuis 2008 le service forestier du Parc National du Djurdjura a pris conscience des premiers foyers de pullulation de *T. bonjeani* dans les peuplements forestiers de Tala-Guilef dont l'intensité de l'attaque a été surprenante. Actuellement l'ampleur des dégâts a été ressentie et une extension de l'insecte commence à se généraliser sur l'ensemble de peuplement naturel de la région. Des défoliations atteignant parfois la totalité d'un peuplement en phase de gradation.

Dans son aire de répartition, *T. bonjeani* a fait l'objet de très peu d'investigations de recherches (Démolin, 1988 ; El Yousfi, 1989). Les données relatives à son écologie et sa biologie sont restées fragmentaires et lacunaires. L'importance économique considérable des défoliations provoquées par *T. bonjeani* dans la cédraie de Parc National du Djurdjura et le manque de données sur ce ravageur nous ont incités à opter pour le choix du sujet.

Le premier objectif de l'étude est de tirer des renseignements biologiques et écologiques relatives à la processionnaire du cèdre dans son biotope naturel au Djurdjura. Le second objectif vise à l'obtention d'une vision spatiale de la génétique des populations de l'espèce à l'échelle de l'aire de pullulation en Algérie. Nous présentons une première étude génétique des populations de *T. bonjeani*. Cette analyse expose des informations relatives à la variabilité génétique de l'ADNmt chez l'espèce, ainsi que des données sur sa structure génétique géographique et son histoire démographique.

La présente étude s'articule en 5 chapitres, le premier et le second sont consacrés à la présentation d'une synthèse de données sur la processionnaire du cèdre, de l'essence hôte et de la zone d'étude. Le troisième chapitre est axé sur l'étude la chronologie et l'importance des principales écophases de *T. bonjeani*. Le quatrième volet porte sur l'identification des principaux facteurs de régulation des populations de l'insecte aux stades ; embryonnaire, larvaire et nymphal, avec une étude plus complète du parasitoïde actif, *Ooencyrtus pityocampae*. Le dernier chapitre porte sur l'histoire évolutive de *T. bonjeani* en associant deux approches complémentaires modernes, la phylogéographie et la modélisation d'aires de distribution.

**PREMIER CHAPITRE : DONNEES SUR LA  
PROCESSIONNAIRE DU CEDRE, *THAUMETOPOEA  
BONJEANI* POWELL ET SON HOTE, *CEDRUS  
ATLANTICA* MANETTI**

# PREMIER CHAPITRE

## DONNEES SUR LA PROCESSIONNAIRE DU CEDRE, *THAUMETOPOEA BONJEANI* POWELL ET SON HOTE, *CEDRUS ATLANTICA* MANETTI

---

### 1. La processionnaire du cèdre, *Thaumetopoea bonjeani*

#### 1.1. Biosystématique du genre *Thaumetopoea*

*Thaumetopoea* est l'unique genre de la famille de Notodontidae qui regroupe une diversité de 11 espèces de processionnaires vivant dans la région méditerranéenne, exception faite pour les deux espèces *T. processionea* Linneo et *T. pinivora* Treitschke, respectivement spécifiques des genres *Quercus* et *Pinus*, qui évoluent plus au nord et au centre de l'Europe (Battisti *et al.*, 2015).

En fonction de leur cycle de développement, Démolin *et al.* (1994) distinguent parmi les espèces infondées aux résineux, les « processionnaires d'été », qui présentent un développement larvaire allant du début du printemps au début de l'été, et les « processionnaires d'hiver », qui ont un développement larvaire allant de la fin de l'été à la fin du printemps. Le premier groupe est représenté par les espèces ; *T. bonjeani*, *T. ispartaensis* (Doganlar & Avci), *T. processionea*, *T. Libanotica* (Kiriakoff & Talhouf), *T. solitaria* (Freyer) et *T. pinivora*, et le second par *T. pityocampa* (Denis & Schiffermuller) et *T. wilkinsoni* (Tams).

Selon Démolin (1988), il est fort probable que les espèces appartenant aux deux groupes aient une même origine. Ceci se justifie par le fait qu'elles se complètent biologiquement pour couvrir de très grandes surfaces des aires septentrionales et méridionales de plusieurs essences forestières appartenant aux genres *Pinus* et *Cedrus*. De plus, il apparaît qu'il existe de très grandes similitudes dans le comportement de la morphologie des adultes et des chenilles, particulièrement dans leur système de défense. Les deux groupes se seraient séparés il y a fort longtemps par la mise en jeu, ou la suppression, d'une diapause au stade œuf (Démolin, 1988).

Les espèces de processionnaires ont dans leur grande majorité, la particularité d'avoir un comportement grégaire durant toute leur vie larvaire et nymphale ce qui leur confère une place chez les insectes subsociaux, car elles se caractérisent par une intercommunication

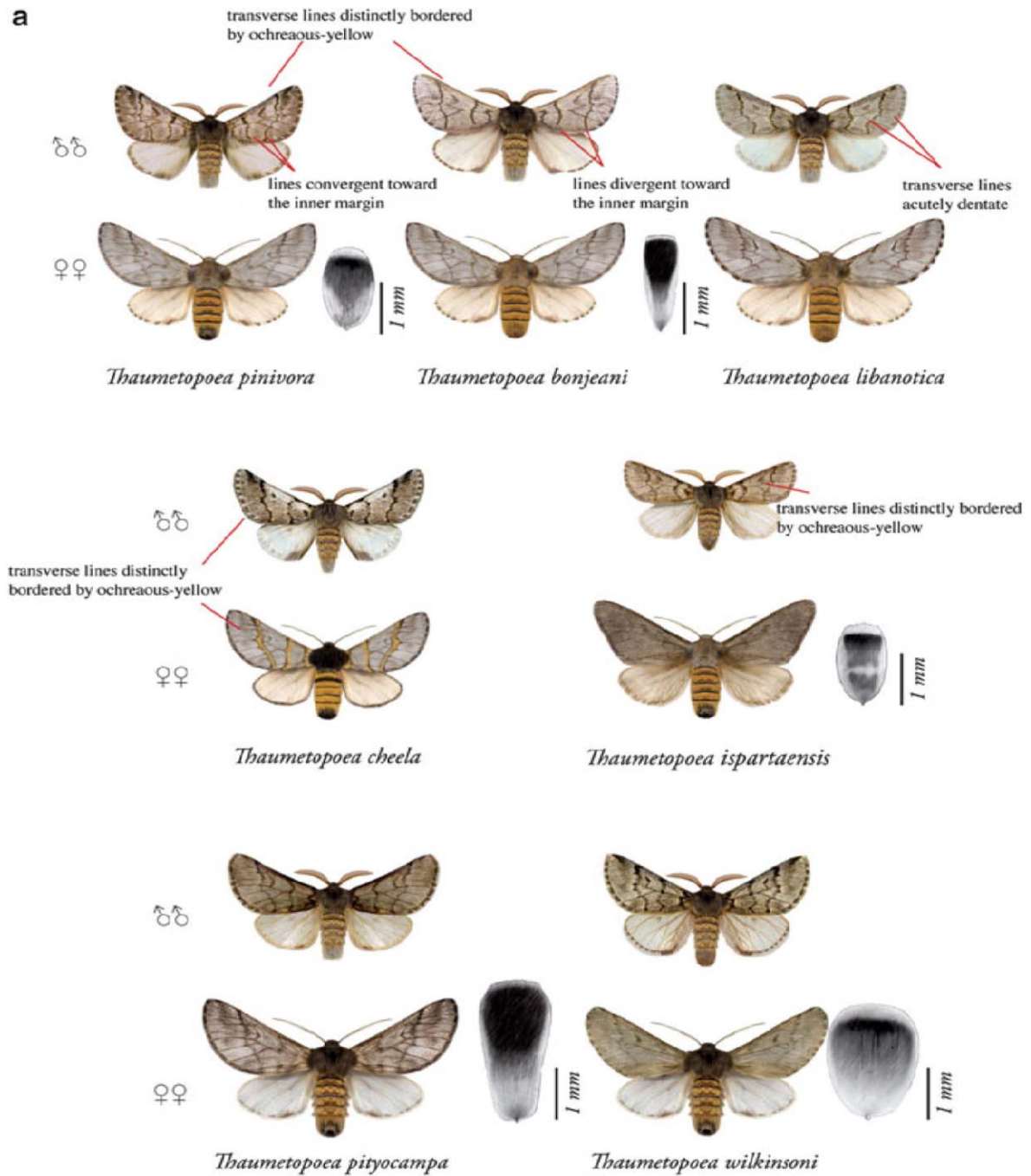
tactile, la construction d'un habitat commun, des déplacements collectifs (les processions alimentaires et de nymphose) et un emplacement de nymphose commun. Ces similitudes ont permis de supposer qu'il existe un lien phylogéographique entre les différentes espèces méditerranéennes. L'étude conduite sur la phylogéographie par Kerdelhué *et al.* (2009) a montré que généralement, la spécialisation par plante hôte est le moteur principal de la différenciation des populations phytophages. Les individus se reproduisent très souvent avec leurs congénères ayant les mêmes préférences d'hôtes. Ceci conduit à des formations de races d'hôtes spécialisées au sein des populations polyphages.

L'espèce, *T. bonjeani* a été décrite pour la première fois sous le nom de *Cnethocampa fbonjeani* à partir d'insectes originaires du Maroc (Powell, 1922). Elle a par la suite été reclassée dans le genre *Thaumetopoea* par Agenjo (1941) lors de la révision des Thaumetopoeidae. Son appartenance à ce genre fut ensuite conservée par Kiriakoff (Kiriakoff, 1970 in Démolin, 1988).

Au Maroc, sa présence est notée dans la cédraie du Rif, Taza et Moyen Atlas (El Yousfi, 1994). En Algérie, l'insecte a été découvert en 1982 dans la cédraie du Belezma, actuellement sa présence est confirmée à la suite à nos investigations dans les cédraies des Aurès (Ouled Yacoub, Chélia, Sgag, Ichemoul, Belezma), du Djurdjura (Tala-Guilef, Tikjda, Halouane), de Babors, de Chréa et de l'Ouarsenis (Theniet El Had).

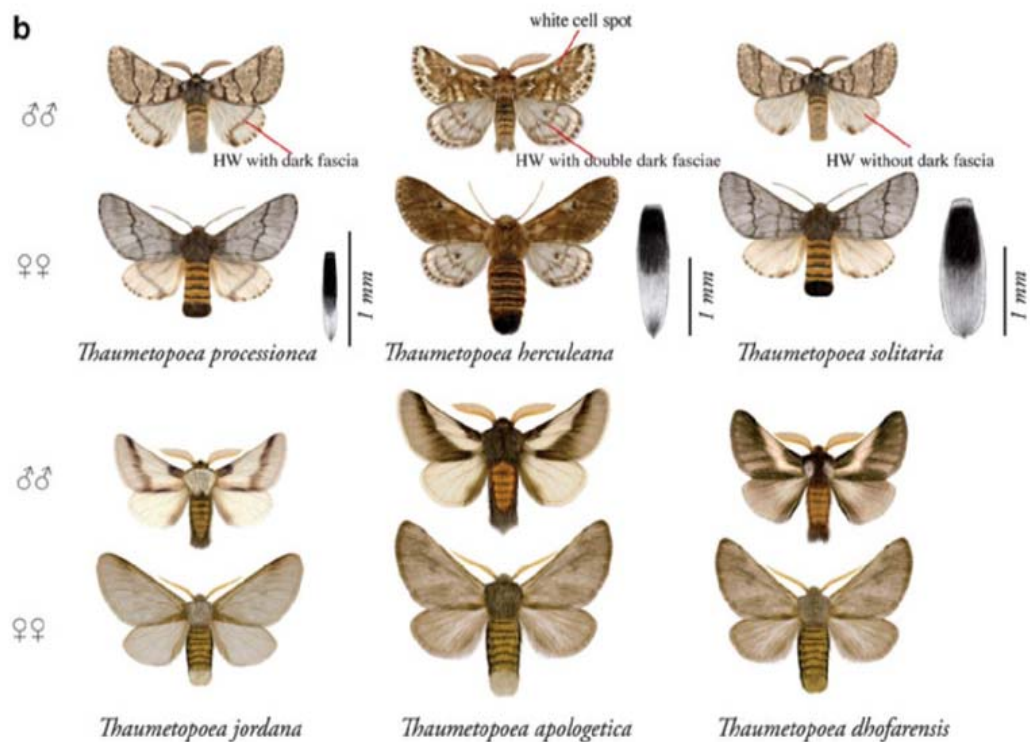
Les adultes des différentes espèces de processionnaires sont illustrés dans les figures 1a et 1b.





(Battisti *et al.*, 2015)

**Figure 1a** : Comparaison des différentes espèces adultes du genre *Thaumetopoea*, indiquant les traits morphologiques et les détails des écailles pour les espèces : *Thaumetopoea pinivora* (♂-♀), *T. bonjeani* (♂-♀), *T. libanotica* (♂-♀), *T. cheela* (♂-♀), *T. ispartaensis* (♂-♀), *T. pityocampa* (♂-♀), *T. wilkinsoni* (♂-♀).



(Battisti *et al.*, 2015)

**Figure 1b** : Comparaison des différentes espèces adultes du genre *Thaumetopoea*, indiquant les traits morphologiques et les détails des écailles pour les espèces : *Thaumetopoea processionea* (♂-♀), *T. herculeana* (♂-♀), *T. solitaria* (♂-♀), *T. jordana* (♂-♀), *T. apologetica* (♂-♀), *T. dhofarensis* (♂-♀).

## 1.2. Cycle biologique et caractères généraux de *T. bonjeani*

*T. bonjeani* est une espèce univoltine à comportement grégaire. Ce dernier est marqué dès le début du cycle par le dépôt des œufs, qui sont regroupés en manchons couverts d'écailles, et par une synchronisation de l'éclosion des chenilles (en période printanière), qui offre l'opportunité d'un premier regroupement (Rahim *et al.*, 2015). Au cours de la vie larvaire, la cohésion du groupe est assurée d'une part par des excréments soyeux qui peuvent être observés sur la ponte juste après l'éclosion des chenilles, sur les rameaux lors des prises alimentaires et à la surface du sol après les enfouissements, et d'autre part, par une intercommunication tactile qui intervient au moment des repos au cours des déplacements en procession (Démolin, 1988). La vie grégaire des chenilles qui se manifestent dès l'éclosion jusqu'à la nymphose constitue un atout fondamental pour la survie de l'espèce.

La processionnaire du cèdre accompli son cycle en 5 stades larvaires. Son développement printano-estival lui permet de ne pas tisser de nid comme c'est le cas chez les espèces *T. pityocampa* et *T. wilkinsoni* qui évoluent en hiver. Les colonies vivent groupées en pelotes (Questienne et Miermont, 1978). Vers la fin de la première semaine du mois d'août, les papillons émergent (Rahim *et al.*, 2015) (Fig. 2 et 3). Les pontes sont déposées en ooplaques sous les rameaux de cèdre. Les rameaux choisis par la femelle sont flexibles pendant vers le bas de l'arbre, les écailles se trouvent orientées vers le sol, ce qui assure la protection de la ponte par un ruissellement vers le bas des eaux de pluie (El Yousfi, 1989). Les larves durant leur cycle évolutif subissent quatre mues successives. Les chenilles de *T. bonjeani* se distinguent aisément de *T. pityocampa* par la coloration jaunâtre des chenilles et par la faible activité de tissage des larves (Questienne et Miermont, 1978). A la fin du mois de juin, les chenilles du dernier stade quittent les arbres en procession pour s'enfouir à quelques centimètres dans un sol favorable (Questienne et Miermont, 1978). Chaque chenille tisse un cocon dans lequel elle se transforme en chrysalide. La morphogenèse imaginaire, a ensuite lieu. Toutes les chrysalides ne deviennent pas adultes la même année. Certaines d'entre elles restent en diapause et n'émergeront qu'une ou plusieurs années plus tard (Gachi, 1994).



**Figure 2 :** Adultes mâles de *T. bonjeani* (Originale)



**Figure 3 :** Adultes femelles de *T. bonjeani* (Originale)

### 1.3. Impact économique, environnemental et sanitaire

En phase de gradation, *T. bonjeani* présente une menace inquiétante pour le cèdre de l'Atlas. A titre d'exemple en 1982, une importante infestation de la cédraie de Belezma a été notée, où près de 500 hectares de cèdre ont été défoliés, donnant aux peuplements un aspect calcinés (Gachi *et al.*, 1986). Les populations de *T. bonjeani* de la cédraie de Chélia (Khenchela) ont été toujours maintenues à un niveau bas. Les attaques observées durant l'année 2006 seraient dues à la régression de l'espèce voisine *T. pityocampa* par les campagnes de lutte biologique à base de la bactérie *Bacillus thuringiensis* (Briki, com., pers.). Au Djurdjura de fortes infestations ont été notées par les services forestiers durant les années 2008 à 2010, les dégâts ont concerné une aire de 100 hectares de cèdre. Des prospections conduites au cours de la période estivale de l'année 2013 dans les zones défoliées ont montré des cas de sujets en dépérissements. La défoliation d'un arbre par la processionnaire du cèdre provoque une perte de croissance, tant en circonférence qu'en hauteur. Il a été montré un déficit de biomasse de près de 34% chez des arbres modérément défoliés (Gachi *et al.*, 2005). Les défoliations sont parfois conséquentes (Fig. 4 et 5).



(Mahri)

**Figure 4 :** Impact des défoliations causées par *T. bonjeani* dans la cédraie de Tala-Guillef (Djurdjura)



(Originale)

**Figure 5 :** Défoliation complète d'un sujet du cèdre à Tala-Guilef

De plus, les chenilles de processionnaire sont armées de poils urticants potentiellement dangereux pour l'homme (Fig. 6) et les animaux et une exposition se traduit souvent par une réaction allergique de type urtication mais pouvant parfois conduire à un choc anaphylactique (Battisti *et al.*, 2011; Vega *et al.*, 2015). Chez les animaux, l'ingestion de poils urticants lors des processions de nymphoses est le risque principal notamment chez le bétail. Ceci peut provoquer des nécroses de la langue et des atteintes du système respiratoire (Bruchim *et al.*, 2005; Moneo *et al.*, 2015). La ressemblance des symptômes avec des maladies contagieuses du type fièvre aphteuse peut être extrêmement grave pour les éleveurs. Enfin, la processionnaire du cèdre va aussi avoir un impact écologique. Les fortes défoliations provoquées par les chenilles affectent la régénération naturelle des forêts de cèdre (Krouchi, 2010).



(Originale)

**Figure 6 :** Troubles cutanés après contact avec les chenilles de *T. bonjeani*

## **2. Le cèdre de l'Atlas *Cedrus atlantica* Manetti**

### **2.1. Position taxonomique**

Le cèdre de l'Atlas a pour noms berbères Inguel ou Avaoual et pour noms arabes, Elarz ou Elmedad. Cette dernière appellation arabe viendrait du fait que les branches de l'espèce ploient sous le poids de la neige au lieu de se casser.

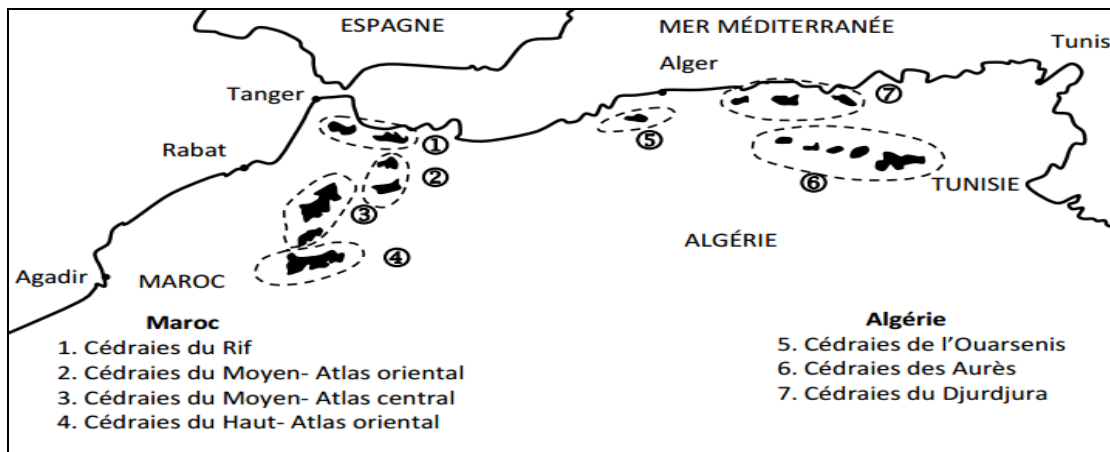
Le cèdre de l'Atlas appartient à l'embranchement des Spermaphytes et au sous-embranchement des Gymnospermes. Il fait partie de la classe des vectrices, de l'ordre des coniférales, de la famille des Pinacées et de la sous famille des Abiétées (M'herit et Benzyane, 2006).

### **2.2. Aire naturelle du cèdre de l'Atlas**

L'aire naturelle du cèdre de l'Atlas est très disjointe. Il occupe les montagnes de l'Afrique du Nord et plus précisément celles du Maroc et de l'Algérie (Boudy, 1950 ; M'herit, 1982 ; Panetsos *et al.*, 1992) (Fig. 7).

Le Maroc détient la plus grande surface occupée par le cèdre, sa superficie est estimée à 130000 ha. La cédraie marocaine se localise dans deux régions bien distinctes : le Rif avec une superficie de 16000 ha, le moyen Atlas et le grand Atlas avec 116000 ha (Toth, 1990). En Algérie, l'aire du cèdre est très morcelée ; ce morcellement s'explique par les grands changements climatiques survenus durant le quaternaire récent (Demarteaue *et al.*, 2007). Les peuplements les plus importants se rencontrent dans les Aurès, mais d'autres cédraies colonisent les massifs montagneux de l'Ouarsenis, de l'Atlas Blideen, des Babors et du Hodna (Abdessemed, 1981 ; Derridj, 1990 ; Benabid, 1993 ; M'herit, 1994).

Boudy (1955), notent que les cédraies de l'Algérie couvrent 45000 ha, représentant 1,3% de la superficie forestière du pays. Actuellement les surfaces forestières du cèdre ont régressé à 30000 hectares selon le dernier rapport de la Direction Générale des Forêts. Ces peuplements se trouvent dans deux régions écologiques différentes; les populations de cèdre de l'Atlas tellien (conditions mésophiles) et les populations de l'Atlas saharien (conditions relativement xérophiles) (Nejahi, 1988). Les cédraies de l'Atlas tellien se rencontrent dans le massif de l'Ouarsenis, dans l'Atlas Blideen, au Djurdjura dans les Babors. Dans l'Atlas saharien, elles sont localisées principalement dans les massifs de Belezma et des Aurès ainsi que dans les monts du Hodna (Bentouati et Oudjehih, 1999).



M'HIRIT (1994)

**Figure 7 :** Répartition actuelle du cèdre de l'Atlas

### 2.3. Le cèdre de l'Atlas et son extension

Le cèdre de l'Atlas a été introduit hors de son aire naturelle dans divers pays: En France, il a été introduit avec succès dans le Mont Ventoux où il prospère favorablement et se régénère facilement (Toth, 1980). Après le succès de cette introduction, l'espèce est abondamment utilisée dans les reboisements en zone méditerranéenne française dans l'étage du chêne pubescent (Toth, 1980 ; Ferrandès, 1986).

Des études sur l'adaptation, la croissance, et la productivité de l'espèce, ont été engagées dans le cadre du programme d'amélioration des cèdres en France (Bariteau et Ferrandès, 1990). Des introductions de cette espèce dans d'autres pays comme l'Italie où selon Morandini et Mercurio (1990), des recherches ont été réalisées sur la régénération, la croissance, la production, l'effet de l'intensité des éclaircies, etc. et dans d'autres pays (Russie, Crimée, Caucase, Etats-unis selon M'hirit, 1982). La région française demeure le pays où le cèdre occupe de vastes étendus.

### 2.4. Ecologie du cèdre de l'Atlas

#### 2.4.1. Répartition en altitude

Le *Cedrus atlantica*, se localise essentiellement dans l'étage montagnard méditerranéen (Quezel, 1976 et 1980; M'hirit, 1982).

Emberger (1938) signale la variabilité des limites inférieures du cèdre en étroite dépendance avec l'humidité.

Au Maroc, la limite inférieure du cèdre est de 1500 à 1600 m et sa limite supérieure va jusqu'à 2600 à 2800 m. Après 2800 m, où il est dominé par le Genévrier thurifère (Boudy, 1952). Selon M'hirit (1982), cette limite supérieure est de 2600 m à partir de laquelle, le cèdre se trouve sous forme d'individus isolés.

En Algérie, le cèdre occupe le sommet des montagnes (Derridj, 1990):

- Sur le versant Nord de l'Atlas Tellien, il commence à apparaître entre 1300 et 1400 m d'altitude (Emberger, 1938), quelques pieds isolés peuvent toutefois descendre dans les ravins jusqu'à 950 m d'altitude (Maire, 1926).

- Sur le versant sud de l'Atlas Tellien et dans l'Aurès, il n'apparaît principalement qu'à partir de 1400-1500 m d'altitude et il monte jusqu'à 2200 m, c'est à dire jusqu'aux plus hautes altitudes de l'Algérie (Emberger, 1938).

Au Djurdjura, le cèdre se localise à 1400 m sur le versant Nord et à 1600 m sur le versant sud (Derridj, 1990).

#### **2.4.2. Exigences climatiques**

- Le cèdre croit sous des températures moyennes annuelles comprises entre 8 et 14° C (Boudy, 1950 et Pujos, 1964 in Derridj, 1990; Toth, 1980). Les valeurs estimées par Derridj (1990) sur l'ensemble des cédraies algériennes s'encartent dans cet intervalle.

- Le cèdre résiste à des températures de -25°C en atmosphère sèche (Gausson, 1967), il vit dans ses pays d'origine avec des extrêmes absolus de - 25°C et + 35°C (Putod, 1979).

- Le cèdre reçoit dans ses pays d'origine des pluies annuelles comprises entre 450 et 1500 mm (Putod, 1979). A l'échelle des cédraies algériennes, en se basant sur la méthode d'extrapolation, Derridj (1990) a estimé des tranches de pluies annuelles bien supérieures :

- Aurès et Hodna : 720 à 770 mm / an ;

- Djurdjura méridional, Ouarsenis, Chrèa et Meurdja: 1126 à 1420 mm / an ;

- Babors et Djurdjura septentrional : 1600 à 2100 mm / an. Toutefois, la répartition des pluies est irrégulière, de sorte que la saison la plus arrosée est l'hiver, et la plus sèche est l'été, comme le note Quezel (1976) pour les forêts de cèdre du pourtour méditerranéen qui subissent un climat caractérisé par une sécheresse estivale de 1 à 3 mois.



Le cèdre de l'Atlas s'accommode de climats très différents: montagnes littorales humides (Rif Marocain); montagnes continentales sèches (Aurès), et montagnes continentales humides (Moyen Atlas Marocain) (Boudy, 1952), mais son optimum est le climat méditerranéen humide et froid (Boudy, 1952; Quezel, 1976).

En Algérie, les cédraies de l'Atlas Saharien (Hodna, Aurès), s'inscrivent dans l'étage bioclimatique sub-humide froid à très froid, alors que les cédraies de l'Atlas Tellien s'inscrivent dans l'étage humide voire per-humide frais et froid. Ces dernières bénéficient d'un climat plus humide et plus doux que celui des cédraies méridionales en raison de leur proximité de la mer (Le Houerou *et al.*, 1977 ; Abdessemed, 1984 in Meddour, 1994 ; M'hirit, 1982).

### **2.4.3. Sol**

Le cèdre n'a pas d'exigences particulières pour le sol, mais ne croit pas dans les sols tourbeux ou humides (Gausson, 1967). Il redoute les sols mal drainés, asphyxiants, mouilleux, et la texture argileuse lui est défavorable (Toth, 1970). Sa croissance est sensiblement meilleure lorsque les fissures de la roche mère sont abondantes et profondes (Putod, 1979).

Le cèdre de l'Atlas couvre un éventail varié de sols. Il peut s'accommoder même de sols peu évolués qu'il continue à améliorer (Putod, 1979). Sous le cèdre de l'Atlas, l'humus est de bonne qualité (Putod, 1979).

## **2.5. Importance économique du Cèdre**

Comme l'ont souligné divers auteurs, cette essence totalise un grand nombre de qualités correspondant aux exigences particulières de la zone circumméditerranéenne. Le cèdre est une essence capable de remplir plusieurs rôles socioéconomiques (Toth, 1990). Il forme depuis son existence une source vitale des populations du fait de ses qualités remarquables: sa longévité, sa résistance à la compression et sa bonne production de bois (Benhalima, 2004). Le bois de cèdre est tendre, odorant, mi-lourd, brun rosé, se conserve bien en grumes et est facile à scier. Ces caractères supérieurs lui assurent toutes sorte d'utilisation à savoir construction des chalets de montagne, menuiserie, charpente, poteaux, placage intérieur, meubles rustiques. Les produits d'éclaircies peuvent être utilisés en papeterie (M'hirit, 2006). Le cèdre convient très bien à la distillation en

donnant une huile essentielle employée en pharmacie et parfumerie. Elle est antiseptique aux vertus cicatrisantes, décongestionnant les voies respiratoires, tonifiant le cuir chevelu, résorbant la cellulite et répulsive pour les mites et les moustiques.

Le cèdre bénéficie d'une grande facilité de régénération naturelle dans les étages de chêne vert en Afrique du Nord et de chêne pubescent en France, assurant ainsi la pérennité des peuplements et permettant des reboisements économiques par point d'appui (M'hirit, 2006). Il joue un rôle important dans la protection des peuplements contre l'incendie grâce à son feuillage peu inflammable (Aussenac *et al.*, 1981). Il maintient également l'équilibre biologique en protégeant et en améliorant le sol (Toth, 1980). Ces qualités d'adaptations à priori aux conditions climatiques et édaphiques de la zone méditerranéenne justifient son choix dans les reboisements (Toth, 1980; Bariteau et Ferrandès, 1992).

**DEUXIEMME CHAPITRE : PRESENTATION DU  
PARC NATIONAL DU DJURDJURA, SITE  
ENVIRONNEMENTAL DE L'ETUDE**



Ce massif d'orientation subit des influences maritimes du Nord et les influences continentales du Sud. Ses reliefs sont parsemés de falaises surplombées de dômes témoignent des brutalités de l'érosion. La déclivité dépasse souvent les 50 %, permettant des éboulements fréquents en hiver rendent l'accès difficile.

Le Djurdjura échelonne des crêtes rocheuses dépassant les 2000 m d'altitude, relief majeur de tout le tell algéro-tunisien, doté au surplus d'une nette individualité, il représente à ce double titre, incontestable une entête géographique (Dubuis et Faurel, 1949).

Les lignes de crêtes de (Haizer, Tala-guilef et Tazrout -Tamellalt) partagent le paysage en deux vallées:

- La vallée des Beni-Mendes qui présente en son amont une dissymétrie des versants : le versant à exposition Sud, formé par la ligne de crête de Tazrout-Tamellalt est plus développé que celui de la ligne de crête de Tala-guilef en exposition Nord. Le premier est rectiligne, tandis que le second est convexoconcave. La pente va en diminuant de l'amont de la vallée de (45%) vers l'aval où elle peut atteindre à (20%).

- La vallée de l'Acif Achemlili où la dissymétrie des versants est très accentuée : le versant Nord est formé par la grande corniche du Djebel Haizer, la pente est supérieure à 45%. Le versant opposé part de la ligne de crête de Tala-guilef.

## **1.2. Structure géologique**

Très complexe sur le plan géologique, le massif du Djurdjura est constitué de terrains sédimentaires fortement plissés et fracturés. Une partie des terrains s'est formée dans le courant de l'ère primaire, mais la plupart appartiennent aux ères secondaire et tertiaire (Flandrin, 1947).

Les étapes géologiques du Djurdjura d'après la carte de Flandrin (1952) se résument comme suit :

- Quaternaire : Eboulis et cailloutis.
- Eo-Oligo- miocène : massif à nummulites marno-calcaires.
- Crétacé : Marnes en plaquettes en silice.
- Jurassique supérieur : calcaire et dolomies massifs.
- Trias : grés rouge, calcaires vermiculaires et dolomies.

### **1.3. Hydrographie**

Le Djurdjura par sa position altitudinale, ses précipitations importantes et ses sommets enneigés pendant plusieurs mois de l'année, est considéré comme un important château d'eau de qualité. A cet effet, le Djurdjura est caractérisé par un chevelu hydrographique très dense, il est formé par une multitude de cours d'eau allant des simples ruisseaux aux grands Oueds coulant dans toutes les directions. Le nombre de sources recensées est de 332 avec des débits allant de 0,01 à 424 l/s (cas de la source Tinzert), la majorité de celles-ci ont été captées avant même la création de l'aire protégée.

### **1.4. Conditions climatiques**

La synthèse des travaux présentés par Martinat (1987), montre que les facteurs climatiques peuvent induire des perturbations dans le comportement social et alimentaire, dans la croissance et la dispersion des populations d'insectes et du végétal hôte.

Le Djurdjura est l'une des régions les plus arrosées de l'Algérie, avec une pluviométrie annuelle variant de 1200 à 1500 mm. Les précipitations ont lieu principalement sous forme de pluie et de neige. Les mois les plus froids sont décembre, janvier et février. Les températures minimales absolues sont inférieures à zéro de novembre à avril. Les températures maximales moyennes ne dépassent pas 24°C. Les chutes de neige ont lieu à partir du mois de novembre et persistent, selon les années, jusqu'au mois de mai et quelquefois jusqu'à juin. Au Djurdjura, s'échelonnent les bioclimats subhumide, humide à hiver froid, frais et tempéré avec une saison sèche de 1 à 3 mois.

### **1.5. Diversité biologique**

#### **1.5.1. Flore**

En complément aux études anciennes de Lapie (1909) et de Quezel (1957), d'autres travaux relativement plus récents ont été consacrés à la végétation du Djurdjura (Krouchi, 2010 ; Medour, 2010).

La flore du Djurdjura est représentée par 1242 espèces végétales identifiées et regroupées en 84 familles dont :

- 1100 espèces de spermaphytes (d'après Quezel et Santa (1962).) dont 111 espèces médicinales 140 espèces sont rares ou menacées, 35 espèces sont endémiques.
- 90 espèces de champignons.
- 52 espèces de lichens.

Quatre stations d'espèces végétales sont déterminées, il s'agit de :

- Station à *Laurus nobilis* (laurier noble) de Tala Guilef.
- Station à *Acer* (érables de montpellier et napolitain) aux Ait Ouabane ;
- Station à *Pinus nigra mauritanica* (pin noir) à Tikjda ;
- Station à *Juniperus sabina* (genévrier sabine) à l'Akouker et Issig issig.

### 1.5.2. Faune

Les éléments de connaissance actuellement disponibles, selon le plan de gestion, 2012, relèvent l'existence de près de 398 espèces animales dont 30 espèces de mammifères, 121 espèces d'oiseaux, 17 espèces de reptiles, 05 espèces d'amphibiens, 04 espèces de myriapodes, 03 espèces de mollusques, et enfin 218 espèces d'insectes. Vu sa richesse floristique, s'en doute divers groupes et espèces d'invertébrées restent à explorer et à répertorier.

## 2. Choix des stations d'étude

Suite au début de la dernière gradation de *Thaumetopoea bonjeani* apparue depuis l'année 2012 dans le massif forestier du Djurdjura, une large prospection a été conduite afin de localiser les foyers du défoliateur dans le but de tirer des informations écologiques et biologiques sur l'insecte dans son biotope. Le choix a porté sur une cédraie naturelle de Tala-Guilef qui connaît actuellement une forte pullulation de l'insecte et la cédraie artificielle de Halouane qui se caractérise par un niveau de population de *T. bonjeani* relativement bas. La localisation des deux cédraies d'étude est illustrée par la figure 9.



Figure 9 : Situation géographique des deux cédraies d'étude (Photos google earth)

## 2.1. Présentation des sites d'études

### 2.1.1. Cédraie naturelle de Tala-Guilef

La cédraie de Tala-Guilef (Fig. 10) est située au niveau de la partie nord occidentale du Parc National du Djurdjura. Cette cédraie est distante de la mer d'environ 47 km à vol d'oiseau. La région forestière est délimitée au Nord, par la ligne de crête de Tazrout Tamellalt (1822 m), au Sud par le massif de Haizer dont le point culminant est appelé dent du lion situé à 2123 m, à l'Ouest par le village des Ait-Ali, et à l'Est, par une ligne de crête qui débute au Tachgagalt (2147 m) en passant par le pic long (2120 m), le col blanc (1814 m), et le pic des cèdres (1882 m).

Dans la cédraie prospectée, trois cédraies d'une vingtaine d'hectares ont été retenues selon un plan altitudinal (de 1400 m à 1900 m) (Fig. 11) :

- La station d'Ikharadhéne
- La station de Tala-Omadagh
- La station de Tizi-Tumlilt



*(Originale)*

**Figure 10** : Vue de la cédraie naturelle de Tala-Guilef





**Figure 11** : Les stations de la région de Tala-Guilef (Photos google earth)

### 2.1.2. Cédraie artificielle de Halouane

Ce reboisement de cèdre de l'Atlas, situé à l'extrême partie Ouest du Parc, couvre une superficie d'environ 80 hectares et repose sur des altitudes comprises entre 1127 m et 1219 m (Fig. 12). La cédraie est distante de la mer d'environ 55 km à vol d'oiseau. Cette forêt est délimitée au Nord, par la commune de Bounouh, au Sud par la commune d'Ait-Laâziz et de Taghzout, à l'Est par le massif de Haizer et à l'Ouest par la commune de Frikat. Les plantations du cèdre ont été réalisées en l'année 1987.



*(Originale)*

**Figure 12** : Vue de la cédraie de reboisement de Halouane

Les caractéristiques relatives aux quatre stations sont regroupées dans le tableau 1.

**Tableau 1** : Caractéristiques des sites prospectés

| <b>Sites</b>        | <b>Latitudes</b> | <b>Longitudes</b> | <b>Altitudes (m)</b> |
|---------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| <b>Ikharadhéne</b>  | 36°28'36 N       | 3°59'38 E         | 1400-1500            |
| <b>Tala-Omadagh</b> | 36°28'22 N       | 4°00'25 E         | 1547-1650            |
| <b>Tizi-Tumlilt</b> | 36°28'25 N       | 4°01'27 E         | 1700-1835            |
| <b>Halouane</b>     | 36°27'12 N       | 3°56'37 E         | 1179-1200            |

**TROISIEME CHAPITRE : ETUDE DES ECOPHASES  
DE DEVELOPPEMENT DE *T. BONJEANI***

## TROISIEME CHAPITRE

### ETUDE DES ECOPHASES DE DEVELOPPEMENT DE *T. BONJEANI*

---

#### 1. Introduction

Chez la processionnaire du cèdre *T. bonjeani*, la ponte constitue la phase que l'on rencontre le plus longtemps sur le terrain. L'évolution larvaire s'effectue en cinq stades larvaires. Cette phase larvaire constitue la phase la plus nuisible qui affecte la croissance radiale des arbres attaqués et provoque des allergies pour la santé humaine principalement pour le personnel travaillant dans les domaines de la foresterie et de l'horticulture. La connaissance de la chronologie des émergences des papillons, les rythmes de développement larvaire et la structure des populations est fondamentale pour assurer la qualité des interventions de lutte. Dans ce volet d'étude, nous avons suivi la chronologie d'évolution des différents stades de développement de *T. bonjeani* dans les deux biotopes naturel et artificiel choisis. De même nous avons procédé à la biométrie des stades de développement pour caractériser les différences écophase de l'espèce.

#### 2. Matériels et méthodes

##### 2.1. Etude de la phase hypogée et de l'envol des adultes

Afin de déterminer la durée de la phase hypogée, correspond à l'intervalle de temps entre la formation des nymphes et l'émergence des adultes de l'insecte et tirer des informations sur la chronologie des émergences des adultes, des chenilles du cinquième stade larvaire en procession de nymphose issus des quatre parcelles d'étude ont été collectées entre la mi-juin et mi-juillet des années 2013, 2014 et 2015. Les chenilles âgées collectées ont été placées par lot (22 au total) de 100 individus sur une couche épaisse de sciure dans des boîtes transparentes en plastique de dimensions (26,5 x 13,5 x 7,5 cm) pour faciliter le passage des chenilles du dernier stade à l'état nymphal. L'ouverture des boîtes est recouverte par un tissu fin pour permettre une aération et contrôler l'émergence des papillons. Les boîtes ainsi préparées sont numérotées et entreposées dans les conditions naturelles du biotope de l'insecte pour tirer des résultats plus fiables.

Au début du mois d'août, les lots de chrysalides ont été transférés au laboratoire. Le matériel biologique est contrôlé quotidiennement et les émergences sont notées au cours du temps. Ces observations nous ont permis de noter :

- La durée du stage nymphal
- Les fréquences journalières d'émergences des adultes mâles et femelles.
- Les rythmes horaires d'émergence des émergences des adultes mâles et femelles.
- Le comportement des adultes : formation des ails, appel sexuel et accouplement.
- Calcul de sex-ratio.

## **2.2. Etude des pontes**

### **2.2.1. Echantillonnage des pontes**

Des lots de pontes de *T. bonjeani* ont été collectés d'une manière aléatoire à la hauteur d'homme en septembre 2013 et 2014. Au total 400 pontes ont été récoltées dans les quatre stations retenues (50 pontes par parcelle/an).

### **2.2.2. Mensurations des pontes**

Les pontes collectées ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse électronique. Les mensurations biométriques ont concerné les longueurs des pontes et les diamètres des rameaux porteurs pour tirer des informations sur les corrélations et la stratégie de choix des femelles pour l'émission de leurs œufs.

### **2.2.3. Biométrie des écailles maternelles**

Les mesures des longueurs et des largeurs des écailles protectrices ont été réalisées à l'aide d'un stéréoscope à camera intégrée (Motic image 1.3). Au total 50 écailles par lot ont été examinées.

### **2.2.4. Evaluation du nombre d'œufs par ponte**

Après avoir nettoyé les pontes des écailles protectrices, les œufs déposés en ligne sont marqués aux feutres de différentes couleurs afin de constituer un repère visuel et la facilité de comptage des œufs.

### **2.3. Chronologie des éclosions**

Pour déterminer les dates des éclosions des chenilles de *T. bonjeani*, des effectifs de 30 pontes par station et par cycle (2013/2014 et 2014/2015) ont été collectées peu de temps avant la période des éclosions des chenilles, vers le mi-mars pour les deux populations. Après la collecte, les pontes ont été conservées individuellement dans des tubes à essai en verre, bouchés par du coton pour permettre une aération. Les tubes sont numérotés et mis en observation dans la station forestière située à l'intérieure des peuplements prospectés pour avoir des résultats fiables dans leur biotope.

### **2.4. Phénologie larvaire et processions de nymphose**

Les renseignements sur l'évolution des stades de développement larvaire et de la distribution temporelle des départs en processions de nymphose de *T. bonjeani* ont été obtenus à partir des prospections et des observations effectuées au terrain par l'examen direct des échantillons prélevés entre les mois d'avril et de septembre durant les deux cycles (2013/2014 et 2014/2015), où en moyenne six sorties par mois sont réalisées. Pour chaque prospection effectuée, les effectifs des chenilles récoltées sont classés par stade larvaire pour déduire les variations phénologiques de l'insecte.

### **2.5. Mensuration des stades de développement de *T. bonjeani***

Les mensurations des longueurs et de largeurs maximales des capsules céphaliques des différents stades larvaires ont été effectuées à l'aide d'un pied à coulisse électronique. Les larves de premier stade ont été récupérées juste après leur éclosion et mesurées à l'aide d'un stéréoscope à camera intégrée. De même, des mensurations des longueurs et des envergures ont concerné une population de 100 adultes mâles et femelles.

### **2.6. Méthodes d'analyse statistique**

L'objectif principal étant l'étude des caractéristiques populationnelles de *T. bonjeani* par des analyses simples à l'aide des logiciels Excel et Statistica 10.

#### **2.6.1. 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 (Fredon *et al.*,

2009). Cette analyse a concerné le calcul des moyennes, des écarts types, et de coefficient de variation.

### **2.6.2. Distribution de fréquence**

L'analyse fréquentielle est la méthode pratique pour décrire une population ou un échantillon dans le but de caractériser 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 analyser. Les données sont classées, puis regroupées dans un nombre limité de classes. Il s'agit donc d'une distribution qui montre la probabilité d'apparition de toutes les valeurs d'une variable théorique. La forme de cette distribution doit répondre à une loi normale. Cette analyse a concerné les distributions des classes de pontes, des mensurations des adultes, des larves et des nymphes.

### **2.6.3. Analyse de la variance (One Way ANOVA)**

L'objectif de ce traitement est de tester la signification 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. Cette analyse a été appliquée sur les données relatives aux mensurations des pontes, des écailles, des nymphes, des tailles des adultes et de la fertilité des femelles.

### **2.6.4. Régression linéaire**

C'est une méthode statistique très utilisée et 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, 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. Les probabilités sont calculées pour tirer le degré de signification. Le recours à cette méthode nous a permis d'établir la relation entre la taille des pontes, le nombre d'œufs et les diamètres des rameaux porteurs des pontes.

### 3. Résultats

#### 3.1. Durée de stade nymphal

Les résultats des durées du stade nymphal sont présentés dans le tableau 2.

**Tableau 2** : Durée du stade nymphal de *T. bonjeani*

| Stations                  | Années | Dates des enfouissements | Dates des émergences des adultes (début-fin) | Durée de la nymphose (Min-Max) |
|---------------------------|--------|--------------------------|--|--------------------------------|
| Ikharathan (Tal-Guilef)   | 2013   | 13 juin et 7 juillet     | 11 août – 10 septembre                       | 54 – 78 jours                  |
|                           | 2014   | 7 juin et 5 juillet      | 7 août – 9 septembre                         | 53 – 81 jours                  |
|                           | 2015   | 9 juin et 10 juillet     | 9 août – 6 septembre                         | 56 – 84 jours                  |
| Tala-Omadagh (Tal-Guilef) | 2013   | 19 juin et 14 juillet    | 17 août – 8 septembre                        | 51 – 72 jours                  |
|                           | 2014   | 18 juin et 15 juillet    | 09 août – 3 septembre                        | 45 – 69 jours                  |
|                           | 2015   | 22 juin et 19 juillet    | 11 août – 5 septembre                        | 47 – 65 jours                  |
| Tizi-Tumlilt (Tal-Guilef) | 2013   | 29 juin et 17 juillet    | 15 août – 13 septembre                       | 49 – 69 jours                  |
|                           | 2014   | 26 juin et 15 juillet    | 9 août – 5 septembre                         | 47 – 61 jours                  |
|                           | 2015   | 29 juin et 16 juillet    | 13 août – 9 septembre                        | 51 – 64 jours                  |
| Halouane                  | 2014   | 13 juin                  | 13 août – 7 septembre                        | 62 – 87 jours                  |
|                           | 2015   | 8 juin                   | 15 août – 10 septembre                       | 69 – 95 jours                  |

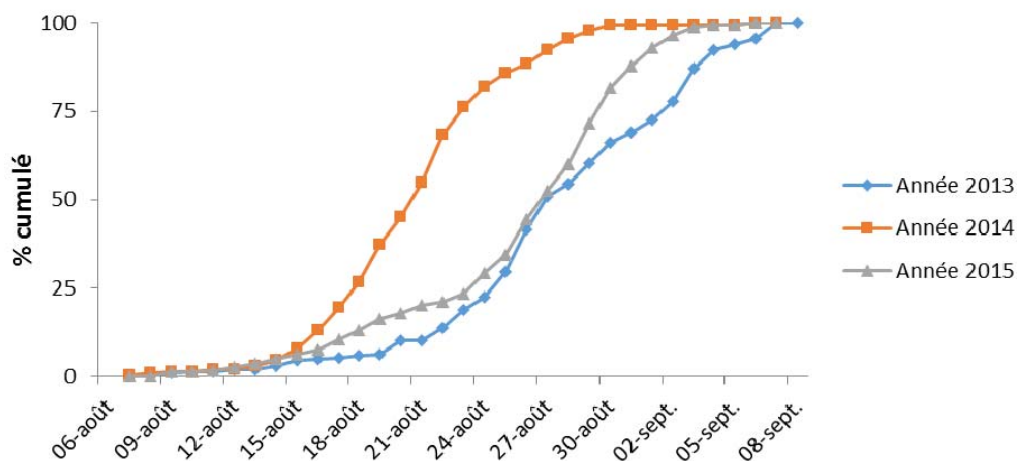
La durée de la phase hypogée de *T. bonjeani* allant de 47 à 84 jours pour les populations d'altitude de Tala-Guilef et de 62 à 95 jours pour la cédraie de basse altitude de Halouane.

#### 3.2. Chronologie des émergences des papillons

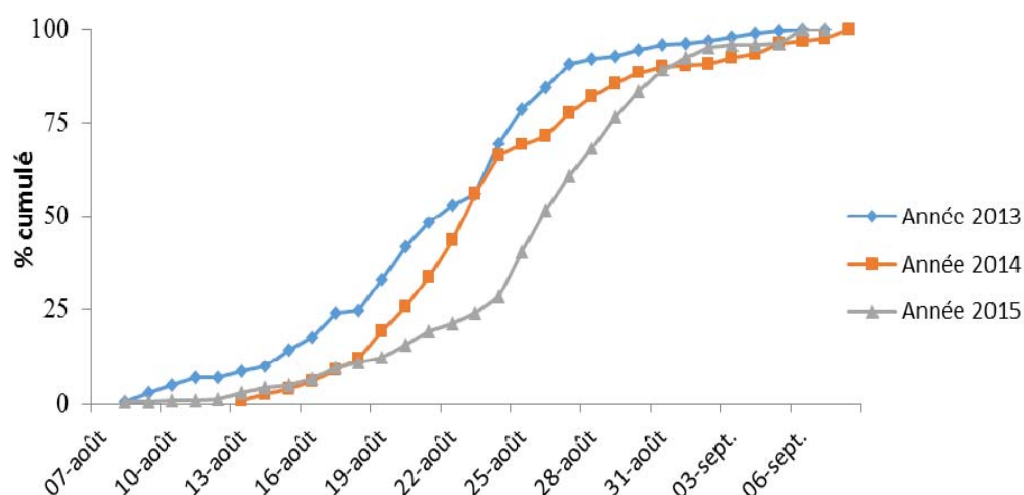
##### 3.2.1. Cédraie de Tala-Guilef

Les résultats des vols des adultes mâles et femelles de *T. bonjeani* dans la cédraie naturelle de Tala-Guilef au cours des années 2013 à 2015, sont exposés par les figures 13 et 14. Les résultats pluriannuels des vols des papillons montrent que la période total de vol pour les deux sexes se situe entre 7 août et 8 septembre. La variation interannuelle des émergences est très faible. Le vol principal qui correspond à 50 % des émergences (mâles et femelles) a été noté durant la dernière décade de mois d'août pour toutes les années d'observations.





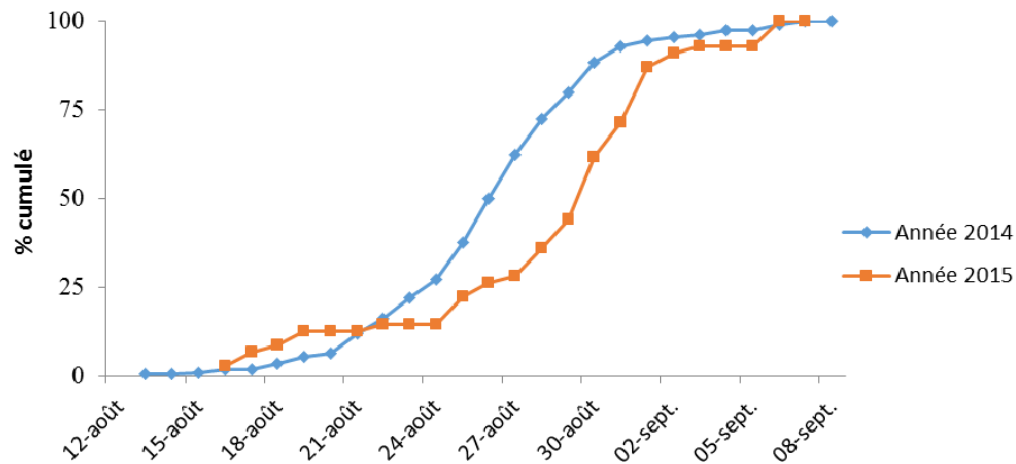
**Figure 13 :** Courbe cumulative des émergences des papillons mâles issues de chenilles en provenance de la cédraie de Tala-Guilef



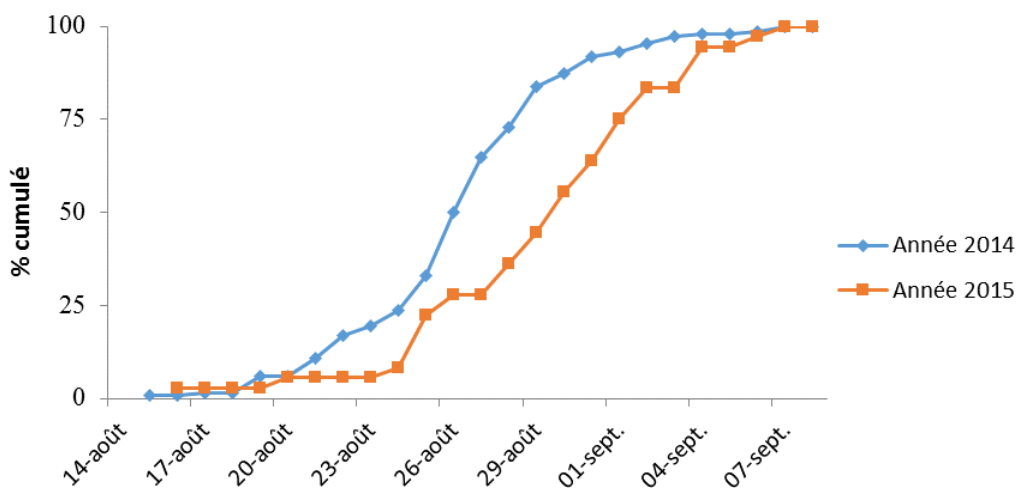
**Figure 14 :** Courbe cumulative des émergences des papillons femelles issues de chenilles en provenance de la cédraie de Tala-Guilef

### 3.2.2. Cédraie de Halouane

Les résultats des vols des adultes mâles et femelles de *T. bonjeani* dans la cédraie artificielle de Halouane, sont exprimés par les figures 15 et 16. Les résultats des vols des papillons montrent que la période total de vol, ainsi que le vol principal sont comparables à ceux enregistrées dans la cédraie de Tala-Guilef.



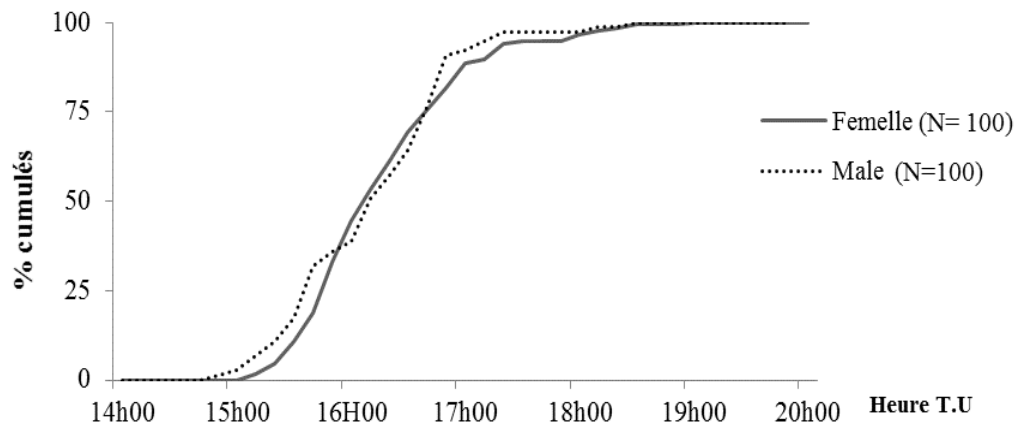
**Figure 15 :** Courbe cumulative des émergences des papillons mâles issues de chenilles en provenance de la cédraie de Halouane



**Figure 16 :** Courbe cumulative des émergences des papillons femelles issues de chenilles en provenance de la cédraie de Halouane

### 3.3. Horaires des émergences des adultes

Sur la base des observations conduites sur la population de *T. bonjeani*, la fréquence journalière des émergences des adultes s'effectue entre 15h00' et 20h30' (heure locale) avec un maximum des émergences entre 16 et 17h (Fig. 17). Les émergences des mâles précèdent celle des femelles d'une vingtaine de minutes. Les accouplements et la ponte ont été notés la nuit même des émergences des femelles (Fig. 18 et 19).



**Figure 17 :** Horaires des émergences des adultes mâles et femelles de *T. bonjeani*



*(Originale)*

**Figure 18 :** Femelle en position d'appel



*(Originale)*

**Figure 19 :** Accouplement de *T. bonjeani*

### 3.4. Les séquences horaires du comportement des adultes

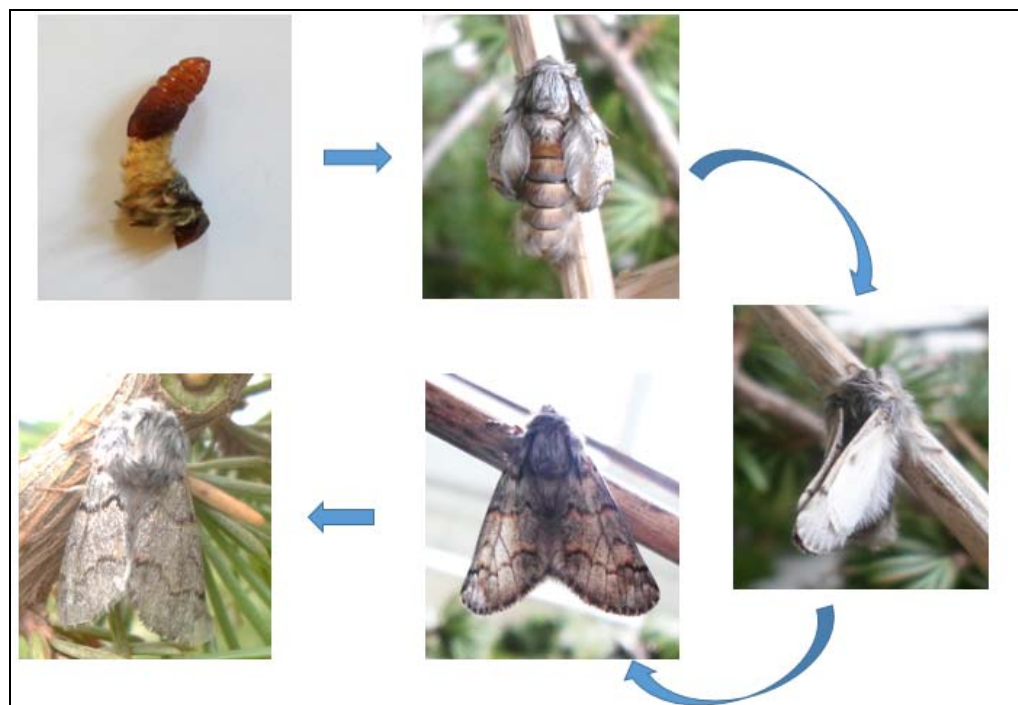
Les résultats des différentes caractéristiques comportementales des papillons de *T. bonjeani* sont présentés dans le tableau 3.

**Tableau 3 :** Caractéristiques des différentes séquences comportementales des papillons mâles et femelles au laboratoire.

Déploiement des ailes : 1. Dépliage des ailes  
2. Dépliage des ailes en position verticale  
3. Position de repos

|                         | Durée formation alaire (en mn) |          |          |          |          |          | Accouplement |
|-------------------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
|                         | Mâles                          |          |          | Femelles |          |          | Heure        |
|                         | 1                              | 2        | 3        | 1        | 2        | 3        |              |
| <b>Moyenne</b>          | 9,7±3,8                        | 12,1±5,2 | 20,0±8,4 | 8,5±3,9  | 11,6±3,6 | 14,7±3,4 | -            |
| <b>Valeurs extrêmes</b> | 5-15                           | 4-22     | 5-36     | 5-15     | 7-19     | 10-20    | 19h27-05h45  |

Le déploiement des ailes commence après quelques minutes des émergences (Fig. 20). La durée des séquences comportementales relatives à la formation des ailes se rapproche entre les papillons mâles et femelles.



(Originale)

**Figure 20 :** Séquences de la formation du système alaire chez *T. bonjeani*

### 3.5. Longévité des adultes

Les résultats obtenus au cours de trois cycles de développement sont regroupés dans le tableau 4.

**Tableau 4 :** Longévité des adultes de *T. bonjeani*

| Adultes mâles<br>(N=50)   |                  | Adultes femelles<br>(N=50) |                  |
|---------------------------|------------------|----------------------------|------------------|
| Durée moyenne<br>en jours | Valeurs Extrêmes | Durée moyenne<br>en jours  | Valeurs Extrêmes |
| 3,7 ± 0,7                 | 2 - 5            | 1,8 ± 0,4                  | 1 - 2            |

La longévité des adultes est limitée à 2 jours en moyenne pour les femelles et de 4 jours pour les mâles. Il est fort probable qu'un mâle pourrait accoupler plusieurs femelles.

### 3.6. Le sex-ratio

Les résultats obtenus au cours de trois cycles de développement sont regroupés dans le tableau 5. Il est à rappeler que le calcul de sex-ratio est obtenu par la relation nombre de mâles sur le nombre de femelles.

**Tableau 5 :** Sex-ratio de *T. bonjeani*

| Années | Sex-ratio   |          |
|--------|-------------|----------|
|        | Tala-Guilef | Halouane |
| 2013   | 1,4         | -        |
| 2014   | 1,3         | 1,2      |
| 2015   | 1,1         | 1,1      |

Les valeurs des sex-ratios calculées varient de 1,1 et 1,4 en faveur des mâles.

### 3.7. Importance des pontes de *T. bonjeani*

#### 3.7.1. Biométrie des pontes

Les résultats des mensurations des pontes sont reportés dans le tableau 6.

**Tableau 6 :** Analyse biométrique des pontes de *T. bonjeani*

| Stations                                       | Cycles    | Effectifs | Longueurs des pontes (mm) |                  | Diamètre des supports de ponte (mm) |                  |
|--|-----------|-----------|---------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
|  |           |           | Moyennes                  | Valeurs extrêmes | Moyennes                            | Valeurs extrêmes |
| Ikharathan<br>(Tala-Guilef)                    | 2013/2014 | 50        | 34,9 ± 5,9                | 26,1 - 47,8      | 3,7 ± 1,3                           | 1,8 - 7,7        |
|  | 2014/2015 | 50        | 33,1 ± 4,6                | 24,1 - 45,7      | 3,9 ± 1,7                           | 1,5 - 7,1        |
| One-Way ANOVA                                  |           |           | F2, 97=1,5 (P=0,632)      |                  | F2, 97=1,5 (P=0,861)                |                  |
| Tala-Omadagh<br>(Tala-Guilef)                  | 2013/2014 | 50        | 32,4 ± 6,9                | 14,1 - 45,7      | 4,2 ± 4,5                           | 2,1 - 9,2        |
|  | 2014/2015 | 50        | 33,8 ± 5,1                | 21,2 - 45,0      | 3,5 ± 1,2                           | 1,7 - 7,5        |
| One-Way ANOVA                                  |           |           | F2, 97=1,1 (P=0,410)      |                  | F2, 97=1,1 (P=0,420)                |                  |
| Tizi-Tumlilt<br>(Tala-Guilef)                  | 2013/2014 | 50        | 30,8 ± 6,1                | 15,1 - 47,2      | 4,0 ± 1,2                           | 2,3 - 7,1        |
|  | 2014/2015 | 50        | 32,3 ± 5,8                | 22,8 - 43,8      | 4,1 ± 0,9                           | 2,7 - 7,3        |
| One-Way ANOVA                                  |           |           | F2, 97=0,8 (P=0,453)      |                  | F2, 97=0,8 (P=0,530)                |                  |
| Halouane                                       | 2013/2014 | 50        | 32,8 ± 6,2                | 14,2 - 44,1      | 3,8 ± 1,1                           | 1,4 - 7,0        |
|  | 2014/2015 | 50        | 33,5 ± 6,0                | 16,7 - 45,6      | 4,5 ± 1,7                           | 2,2 - 10,6       |
| One-Way ANOVA                                  |           |           | F2, 97=3,2 (P=0,477)      |                  | F2, 97=3,2 (P=0,475)                |                  |
| One-Way ANOVA<br>(Comparisons entre les sites) |           |           | F2, 593=2,2 (P=0,110)     |                  | F2, 593=2,2 (P=0,109)               |                  |

Dans tous les cas étudiés, les pontes de *T. bonjeani* ont été localisées uniquement sur la face inférieure des rameaux de *C. atlantica* sous forme d'ooplaque (Fig. 21 et 22). La femelle dépose ses œufs en les recouvrant au fur et à mesure par des écailles protectrices, tout en progressant vers la base du rameau.



(Originale)

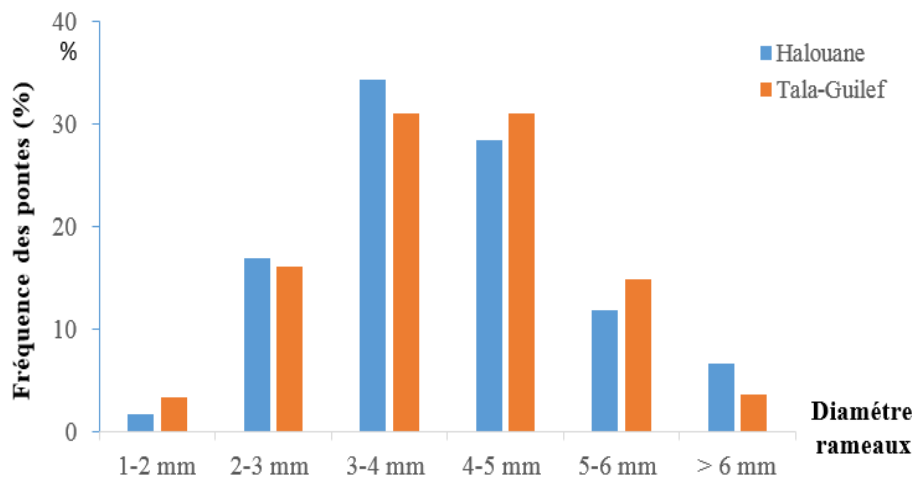
**Figure 21 :** Ponte de *T. bonjeani*



(Originale)

**Figure 22 :** Œufs de *T. bonjeani*

La longueur des pontes varie en moyenne de 30,8 mm à 34,9 mm. Les rameaux choisis comme support de ponte sont minces et flexibles d'un diamètre variable de 1,5 à 10,6 mm. La majorité des femelles pondueuses ont une préférence pour l'émission de leurs œufs sur les rameaux de 3 à 5 mm du diamètre (Fig. 23). Les résultats des analyses du Test d'ANOVA ne révèlent pas de différence significative entre les longueurs des pontes et entre les diamètres des rameaux choisis par les femelles.



**Figure 23 :** Distribution des pontes de *T. bonjeani* en fonction des diamètres des rameaux porteurs

### 3.7.2. Biométrie des écailles protectrices

Les écailles recouvrant les pontes, confèrent à celles-ci une homochromie grisâtre comparable à la couleur de l'écorce du cèdre, rendant leur repérage très difficile.

Les données des mensurations des écailles de *T. bonjeani* sont regroupées dans le tableau 7.

**Tableau 7** : Mensurations des écailles de *T. bonjeani*

| Stations                                    | Effectifs | Longueurs (mm)       |                  | Largeurs (mm)        |                  |
|---|-----------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
|   |           | Moyennes             | Valeurs extrêmes | Moyennes             | Valeurs extrêmes |
| Ikharathan                                  | 50        | 1,7 ± 0,1            | 1,2 - 2,2        | 0,8 ± 0,1            | 0,7 - 1,3        |
| Tala-Omadagh                                | 50        | 1,9 ± 0,1            | 1,2 - 2,3        | 0,9 ± 0,1            | 0,7 - 1,2        |
| Tizi-Tumlilt                                | 50        | 1,8 ± 0,1            | 1,3 - 2,2        | 0,9 ± 0,2            | 0,6 - 1,3        |
| Halouane                                    | 50        | 1,7 ± 0,1            | 1,3 - 2,1        | 0,8 ± 0,2            | 0,6 - 1,2        |
| One-Way ANOVA (Comparisons entre les sites) |           | F2, 390=4,1 (P=0,07) |                  | F2, 390=4,1 (P=0,09) |                  |

La longueur des écailles protectrices est en moyenne de 2 mm avec une largeur moyenne de 1 mm. Les résultats des analyses du test ANOVA révèlent l'absence de différence significative entre les variables considérées.

### 3.7.3. Evaluation du nombre d'œufs par ponte

Les résultats des dénombrements des œufs sont regroupés dans le tableau 8.

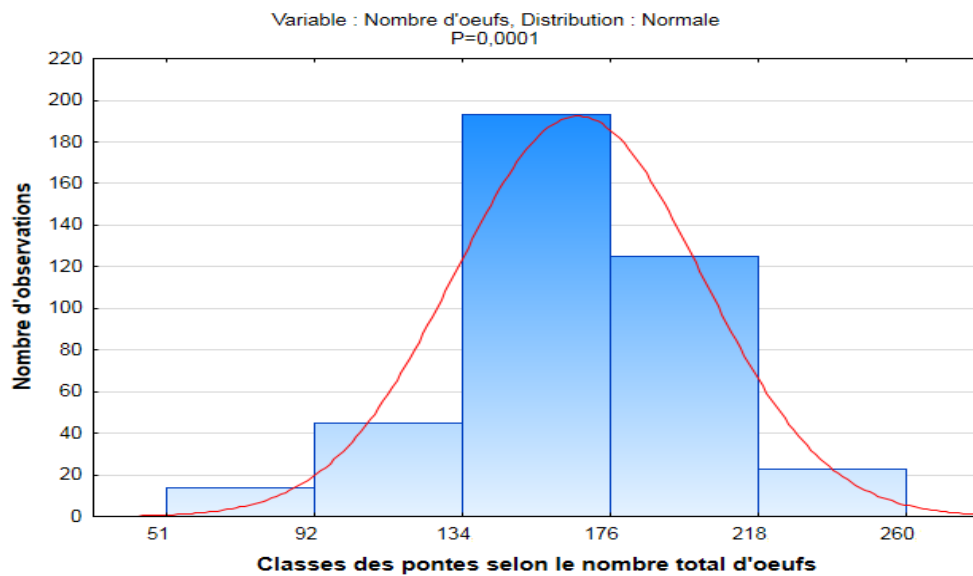
**Tableau 8** : Nombre moyen et extrême d'œufs par ponte

| Stations                    | Cycles                                  | Effectifs | Moyennes | Valeurs extrêmes |
|-----------------------------|---|-----------|----------|------------------|
| Ikharathan                  | 2013/2014                               | 50        | 176 ± 38 | 72 - 260         |
|                             | 2014/2015                               | 50        | 157 ± 29 | 91 - 208         |
|                             | One-Way ANOVA F1, 97=3,9 (P= 0,550)     |           |          |                  |
| Tala-Omadagh                | 2013/2014                               | 50        | 177 ± 35 | 81 - 230         |
|                             | 2014/2015                               | 50        | 160 ± 28 | 98 - 223         |
|                             | One-Way ANOVA F1, 97=3,8 (P= 0,553)     |           |          |                  |
| Tizi-Tumlilt                | 2013/2014                               | 50        | 172 ± 36 | 90 - 232         |
|                             | 2014/2015                               | 50        | 161 ± 42 | 88 - 221         |
|                             | One-Way ANOVA F1, 97=3,8 (P= 0,583)     |           |          |                  |
| Halouane                    | 2013/2014                               | 50        | 169 ± 46 | 57 - 229         |
|                             | 2014/2015                               | 50        | 152 ± 41 | 51 - 225         |
|                             | One-Way ANOVA F1, 97=11,0 (p= 0,063)    |           |          |                  |
| Comparisons entre les sites | One-Way ANOVA F1, 593=20,6 (p= 0,001**) |           |          |                  |



Les résultats des analyses du test ANOVA montrent que les effectifs moyens d'œufs par ponte ne diffèrent pas significativement entre les deux années d'échantillonnage pour chacune des stations prospectées. En revanche, la fécondité moyenne diffère entre les deux régions prospectées (Tala-Guilef et Halouane) (One-way ANOVA F1, 593=20,6 ; p= 0,001). La moyenne calculée sur la base des deux années d'observation est d'environ 168 œufs pour la population de Tala-Guilef et de 153 œufs pour la population de Halouane.

Une analyse fréquentielle des effectifs d'œufs par ponte a été établie afin de déterminer les classes des femelles pondeuses. La figure 24 illustre la distribution des classes des pontes de *T. bonjeani*.

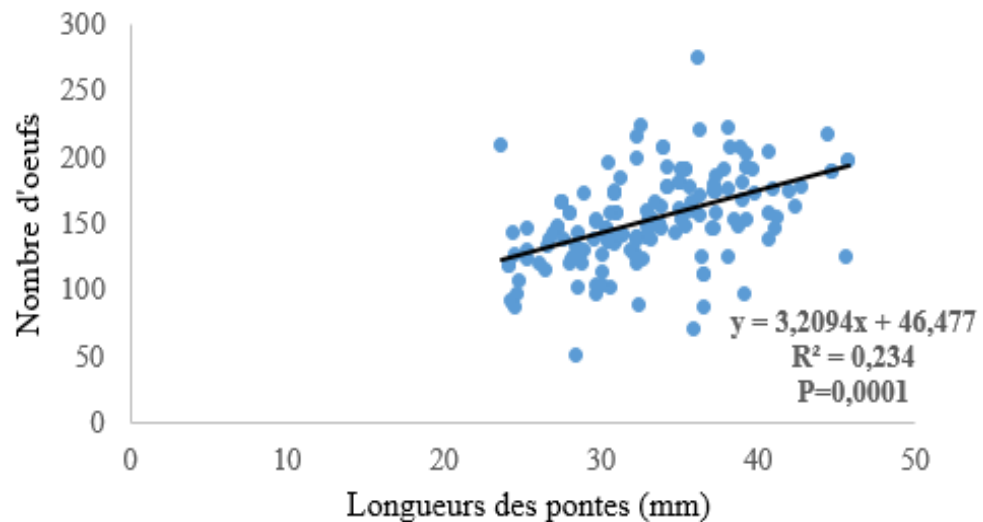


**Figure 24 :** Analyse fréquentielle des effectifs des œufs

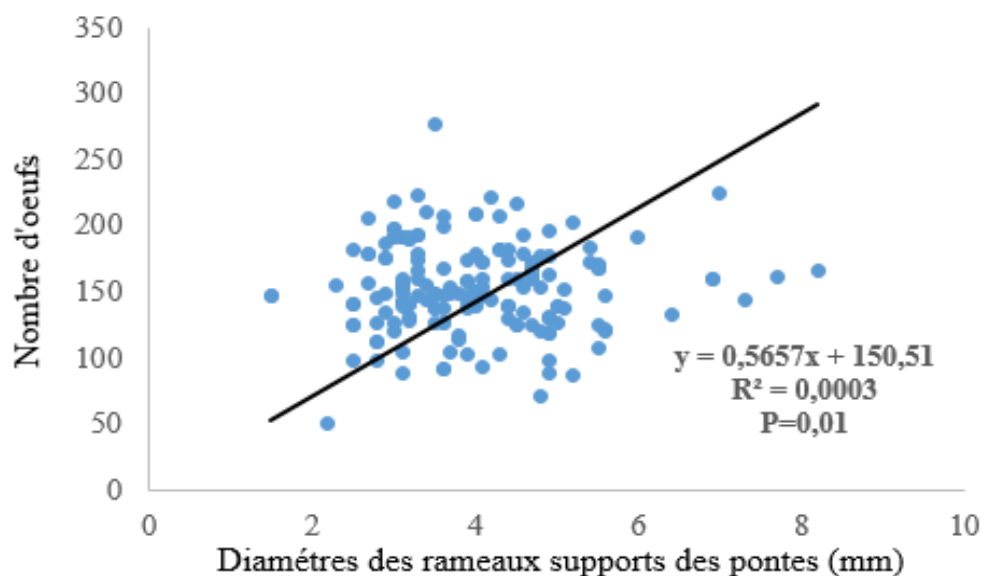
L'analyse fréquentielle des œufs quantifiés sur les pontes de *T. bonjeani* met en évidence 5 classes s'ajustant à une loi normale. La probabilité calculée est très hautement significative (p=0,0001). La première classe, représentée par 16 cas, regroupant les pontes ayant entre 51 à 92 œufs. La seconde classe, représentée par 42 cas, regroupe les pontes ayant 92 à 134 œufs. La troisième classe regroupe le maximum d'observations, soit 197 pontes, renfermant entre 134 et 176 œufs. La quatrième classe, représentée par 136 cas, regroupe les pontes ayant entre 176 à 218 œufs. La dernière classe se limite à 21 pontes dont le nombre d'œufs est compris entre 218 et 260.

### 3.7.4. Relation entre la longueur des pontes, le diamètre de leurs rameaux supports et le nombre d'œufs

L'analyse des régressions linéaires illustrées par les figures 25 et 26, met en évidence une corrélation significative entre le nombre d'œufs et les deux variables considérées (longueur des pontes et le diamètre de leurs rameaux supports).



**Figure 25 :** Relation entre le nombre d'œufs et la longueur des pontes



**Figure 26 :** Relation entre le nombre d'œufs et le diamètre des rameaux supports des pontes

### 3.8. Chronologie des éclosions

Les données recueillies sur la chronologie des éclosions des œufs de *T. bonjeani* sont regroupées dans le tableau 9.

**Tableau 9 :** Chronologie des éclosions des œufs de *T. bonjeani*

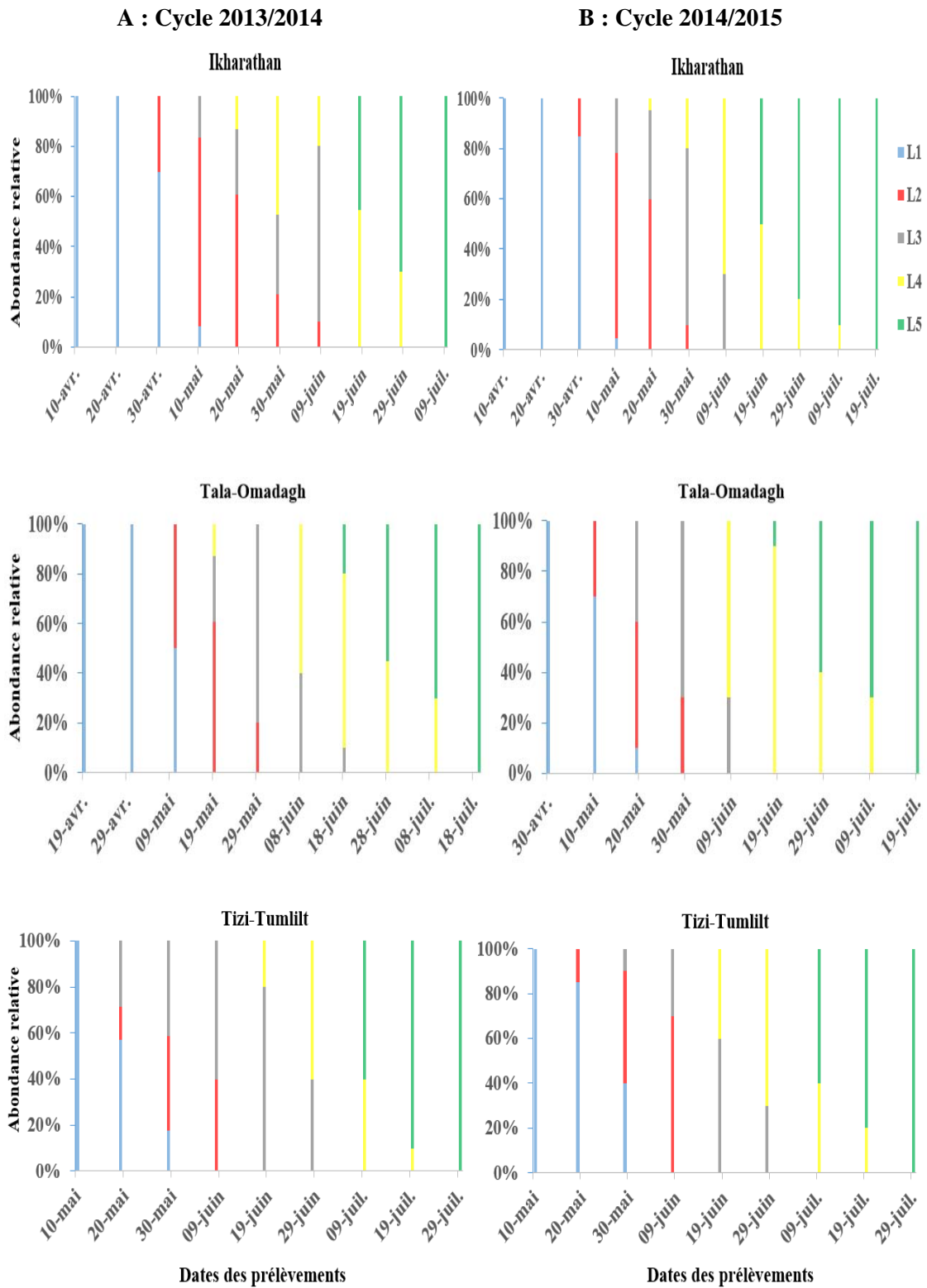
| Régions     | Stations     | Cycles    | Date de début des éclosions | Date de la fin des éclosions |
|-------------|--------------|-----------|-----------------------------|------------------------------|
| Tala-Guilef | Ikharathan   | 2013/2014 | 13 avril                    | 21 avril                     |
|             |              | 2014/2015 | 15 avril                    | 22 avril                     |
|             | Tala-Omadagh | 2013/2014 | 19 avril                    | 1 mai                        |
|             |              | 2014/2015 | 23 avril                    | 3 mai                        |
|             | Tizi-Tumlilt | 2013/2014 | 2 mai                       | 9 mai                        |
|             |              | 2014/2015 | 1 mai                       | 15 mai                       |
| Halouane    |              | 2013/2014 | 25 mars                     | 3 avril                      |
|             |              | 2014/2015 | 27 mars                     | 10 avril                     |

Les éclosions des chenilles ont lieu au printemps de l'année suivante la ponte, à partir de la dernière décade du mois de mars pour les populations de la région de Halouane et à mi-avril pour les populations de Tala-Guilef. Ces dates des éclosions sont synchronisées parfaitement avec le débourrement de cèdre de l'Atlas. Les éclosions des œufs se sont effectuées entre les mois de mars et mai selon le plan altitudinale pris en considération. Dans la station de Halouane, située relativement en basse altitude les éclosions sont plus précoces.

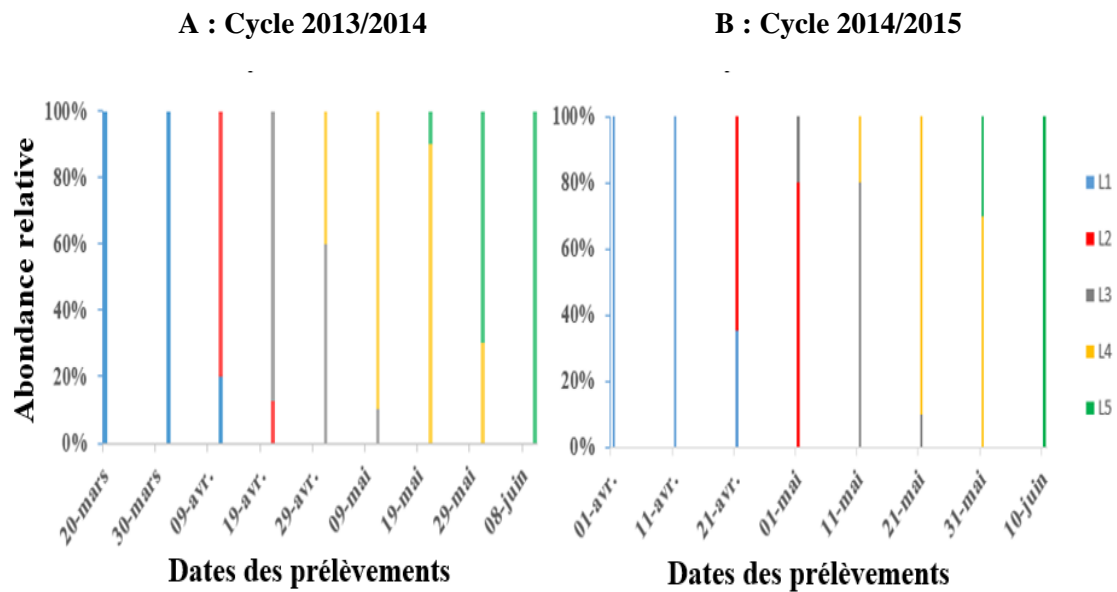
### 3.9. Phénologie larvaire et processions de nymphose

Les observations périodiques conduites dans les sites d'étude, au cours des deux cycles d'étude ont permis de mettre en évidence une caractérisation spatiotemporelle de l'évolution des stades larvaires de la processionnaire du cèdre dans son biotope.

L'évolution larvaire de l'insecte en relation avec la position altitudinale des stations est illustrée par les figures 27 et 28.



**Figure 27** : Abondance relative des différents stades larvaires de *T. bonjeani* évoluant à Tala-Guilef



**Figure 28 :** Abondance relative des différents stades larvaires de *T. bonjeani* évoluant à Halouane

Il ressort des résultats des figures 27 et 28 que l'évolution larvaire débute de la dernière décade de mars et s'achève vers la première décade de juin pour la région de Halouane et à partir de mois d'avril à la fin de juillet pour la région de Tala-Guilef. La présence de premier stade larvaire est notée entre 20 mars et 21 avril à Halouane et entre 10 avril et 30 mai à Tala-Guilef. Le deuxième stade est repéré entre le 09 avril et 01 mai à Halouane et entre 30 avril et 9 juin à Tala-Guilef. Les larves du troisième stade sont observées entre le 19 avril et 21 mai à Halouane et de 19 mai à 29 juin à Tala-Guilef. Le quatrième stade est repéré entre 29 avril et 31 mai à Halouane et de 20 mai à 19 juillet à Tala-Guilef. Le cinquième stade est noté entre le 19 mai et 10 juin à Halouane et de 18 juin à 29 juillet à Tala-Guilef.

Les premières processions de nymphose sont observées entre le 3 et 11 juin à Halouane. A Tala-Guilef, les premières processions sont observées le 08 juin et se sont poursuivies jusqu'à la dernière décade de juillet avec un maximum de descente à la première semaine de juillet. Le nombre de chenilles par procession varie de quelques dizaines à quelques centaines d'individus. Les figures 29 et 30, illustrent les différents écophases de *T. bonjeani* dans les biotopes prospectés.



Chenilles du premier stade (L1) de *T. bonjeani* à l'éclosion



Chenilles L1 en fin de stade de développement (En préparation pour la mue)



Chenilles du deuxième stade larvaire (L2)



Chenilles du troisième stade larvaire (L3)



Chenilles du quatrième stade larvaire (L4)



Chenilles du cinquième stade larvaire (L5)

(Originales)

**Figure 29** : Les cinq stades larvaires de *T. bonjeani*



Colonies de chenilles (L5) en préparation pour la procession de nymphose



Chenilles en procession de nymphose



Regroupement des chenilles, pour l'enfouissement sous terre



Chrysalides de *T. bonjeani*



(Originale)

**Figure 30 :** Chenilles en processions de nymphoses et chrysalides de *T. bonjeani*

### 3.10. Caractéristiques biométriques des stades larvaires

Les données des mesures des longueurs et des largeurs maximales des capsules céphaliques des stades larvaires sont regroupées dans les tableaux 10 et 11.

**Tableau 10 :** Synthèse des données biométriques des stades larvaires de *T. bonjeani* en provenance de la cédraie de Tala-Guilef

| Stades | Effectifs | Longueurs des chenilles (mm) |                  | Largeurs maximales des capsules céphaliques (mm) |                  |
|--------|-----------|------------------------------|------------------|--|------------------|
|        |           | Moyennes                     | Valeurs extrêmes | Moyennes   | Valeurs extrêmes |
| L1     | 100       | 2,1 ± 0,6                    | 1,6 – 4,7        | 0,6 ± 0,1  | 0,5 – 0,9        |
| L2     | 100       | 8,4 ± 1,9                    | 4,2 – 13,5       | 1,5 ± 0,3  | 0,9 – 2,4        |
| L3     | 100       | 15,8 ± 1,2                   | 13,3 – 19,8      | 1,8 ± 0,2  | 2 – 2,6          |
| L4     | 100       | 21,1 ± 2,1                   | 18,8 – 23,4      | 2,6 ± 0,3  | 2,4 – 3,3        |
| L5     | 100       | 28,4 ± 3,3                   | 22,8 – 33,3      | 3,5 ± 0,3  | 3,0 – 4,1        |

**Tableau 11 :** Synthèse des données biométriques des stades larvaires de *T. bonjeani* en provenance de la cédraie de Halouane

| Stades | Effectifs | Longueurs des chenilles (mm) |                  | Largeurs maximales des capsules céphaliques (mm) |                  |
|--------|-----------|------------------------------|------------------|--|------------------|
|        |           | Moyennes                     | Valeurs extrêmes | Moyennes   | Valeurs extrêmes |
| L1     | 100       | 2,2 ± 0,6                    | 1,5 – 4,3        | 0,6 ± 0,1  | 0,6 – 0,8        |
| L2     | 100       | 8,1 ± 1,9                    | 4,5 – 12,8       | 1,6 ± 0,2  | 0,9 – 2,2        |
| L3     | 100       | 15,5 ± 1,2                   | 12,5 – 18,2      | 1,5 ± 0,3  | 1,9 – 2,4        |
| L4     | 100       | 20,9 ± 2,1                   | 17,3 – 22,7      | 2,7 ± 0,3  | 2,1 – 3,1        |
| L5     | 100       | 28,1 ± 3,3                   | 21,7 – 32,7      | 3,3 ± 0,3  | 2,9 – 4,0        |

Les résultats biométriques des chenilles de *T. bonjeani* mettent en relief les mensurations des chenilles et de leur capsule céphalique pour les divers stades larvaires. Les mesures de la taille des différents stades larvaires ainsi que les largeurs de leur capsule céphalique en provenance des deux cédraies, restent comparable.



### 3.11. Biométrie et poids des nymphes

Les résultats des mesures des longueurs, des largeurs maximales et des poids des nymphes de *T. bonjeani* sont regroupés dans les tableaux 12 et 13.

**Tableau 12 :** Taille et poids des chrysalides mâles et femelles de *T. bonjeani* en provenance de la cédraie de Tala-Guilef

|                          | Nymphes mâles<br>(effectif=200) |                     | Nymphes femelles<br>(effectif=200) |                     | <i>F</i> | <i>p</i> |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|----------|----------|
|                          | Moyennes                        | Valeurs<br>Extrêmes | Moyennes                           | Valeurs<br>Extrêmes |          |          |
| <b>Longueur<br/>(mm)</b> | 14,9 ± 1,1                      | 11,7 – 17,4         | 16,8 ± 0,9                         | 14,2 – 18,1         | 175,9    | 0,001**  |
| <b>Largeur<br/>(mm)</b>  | 5,3 ± 0,3                       | 4,8 – 6,1           | 6,1 ± 0,3                          | 5,5 – 7,1           | 208,1    | 0,001**  |
| <b>Poids<br/>(mg)</b>    | 276 ± 29,1                      | 92 – 292            | 444 ± 45,2                         | 317 – 529           | 350,9    | 0,001**  |

(*F* : Fisher ; *P* : probabilité de Fisher)

**Tableau 13 :** Taille et poids des chrysalides mâles et femelles de *T. bonjeani* en provenance de la cédraie de Halouane

|                          | Nymphes mâles<br>(effectif=200) |                     | Nymphes femelles<br>(effectif=200) |                     | <i>F</i> | <i>P</i> |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|----------|----------|
|                          | Moyennes                        | Valeurs<br>Extrêmes | Moyennes                           | Valeurs<br>Extrêmes |          |          |
| <b>Longueur<br/>(mm)</b> | 13, 9 ± 0,7                     | 11,8 – 16,7         | 15,8 ± 0,9                         | 13,4 – 17,9         | 143,1    | 0,001**  |
| <b>Largeur<br/>(mm)</b>  | 5,1 ± 0,2                       | 4,3 – 5,6           | 5,9 ± 0,3                          | 5,1 – 6,8           | 197,7    | 0,001**  |
| <b>Poids<br/>(mg)</b>    | 267 ± 29,7                      | 96 – 283            | 421 ± 41,1                         | 298 – 498           | 360,4    | 0,001**  |

(*F* : Fisher ; *P* : probabilité de Fisher)

Les données recueillies sur la biométrie des chrysalides de *T. bonjeani* en provenance des deux cédraies, restent comparable. Les comparaisons des moyennes des longueurs et des largeurs des nymphes montrent une différence très hautement significative entre les deux sexes ( $P < 0,001$ ). La figure 31, illustre la différence entre les deux sexes.



(Originale)

**Figure 31** : Chrysalides mâle et femelle de *T. bonjeani*

### 3.12. Biométrie des adultes

Les résultats des mesures des longueurs et des envergures des adultes *T. bonjeani* sont regroupés dans les tableaux 14 et 15.

**Tableau 14** : Longueurs et envergures des adultes mâles et femelles de *T. bonjeani* en provenance de la cédraie de Tala-Guilef

|                           | Adultes mâles<br>(effectif=100) |                     | Adultes femelles<br>(effectif=100) |                     | <i>F</i> | <i>p</i> |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|----------|----------|
|                           | Moyennes                        | Valeurs<br>Extrêmes | Moyennes                           | Valeurs<br>Extrêmes |          |          |
| <b>Longueur<br/>(mm)</b>  | 12,7 ± 1,6                      | 10,2 - 16,4         | 16,8 ± 1,2                         | 14,1 - 18,9         | 348,3    | <0,001** |
| <b>Envergure<br/>(mm)</b> | 29,6 ± 1,9                      | 24,7 - 35,5         | 36,1 ± 2,2                         | 30,8 - 42,1         | 318,7    | <0,001** |

**Tableau 15** : Longueurs et envergures des adultes mâles et femelles de *T. bonjeani* en provenance de la cédraie de Halouane

|                           | Adultes mâles<br>(effectif=100) |                     | Adultes femelles<br>(effectif=100) |                     | <i>F</i> | <i>p</i> |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|----------|----------|
|                           | Moyennes                        | Valeurs<br>Extrêmes | Moyennes                           | Valeurs<br>Extrêmes |          |          |
| <b>Longueur<br/>(mm)</b>  | 11,7 ± 1,1                      | 9,6 - 15,3          | 15,3 ± 1,0                         | 13,6 - 17,1         | 351,0    | <0,001** |
| <b>Envergure<br/>(mm)</b> | 30,7 ± 2,0                      | 23,5 - 34,6         | 36,9 ± 2,3                         | 29,9 - 41,2         | 299,9    | <0,001** |

Les données recueillies sur la biométrie des deux populations d'adultes de *T. bonjeani* en provenance des deux régions, restent comparable. La comparaison des moyennes des longueurs et des envergures des adultes montre une différence très hautement significative qui caractérise le dimorphisme sexuel chez les populations de *T. bonjeani* ( $P < 0,001$ ).

#### 4. Discussion

Au Djurdjura, la durée de la phase hypogée de *T. bonjeani* allant de 47 à 95 jours. Nos résultats ont démontré que la durée de cette phase souterraine reste variable selon l'altitude, avec une durée plus conséquente dans les régions à basses altitudes. Au Maroc, Mokhles (1990) a enregistré une durée nymphale allant de 39 à 55 jours.

L'une des particularités biologiques des espèces appartenant au genre *Thaumetopoea* est de pouvoir établir leur cycle sur une ou plusieurs années (Biliotti *et al.*, 1964; El Yousfi, 1994; Zamoum *et al.*, 2015). Une période complémentaire de diapause prolongée d'un an ou plus peut faire suite. Aucun cas de prolongement de diapause nymphal n'a été noté dans les sites d'étude. Au Maroc, des cas de prolongement de diapause nymphale pluriannuel ont été notés (El Yousfi, 1989). Chez les populations de *T. pinivora* évoluant en Suède, Larson *et al.* (2006) ont enregistré une diapause nymphale bisannuelle. A Djelfa, Zamoum *et al.* (2015) ont montré l'existence de cycles trisannuels chez les populations de *T. pityocampa*.

Les vols des adultes de *T. bonjeani* se sont échelonnés entre le mois d'août et le mois de septembre pour les trois années d'observation. La variation interannuelle des émergences est faible. Le vol principal qui correspond à 50% des émergences se situe entre le 21 août et 1 septembre. Dans la cédraie de Belezma (Aurès), (Démolin, 1988) a enregistré des périodes de vols similaires. Au Maroc, El-Yousfi (1989) et Mokhles (1990) ont enregistré des périodes d'envols au cours du mois d'août.

Les œufs de *T. bonjeani* sont déposés en une seule fois et uniquement sur la face inférieure des rameaux de *C. atlantica*. Le comportement de la femelle de *T. bonjeani* lors de la ponte est comparable à celui de *T. pinivora* par le fait que les femelles de cette espèce pondent sur des aiguilles de pin en se dirigeant du sommet vers la base (Montoya et Robredo, 1972). Ce comportement de ponte diffère de celui observé sur *T. pityocampa* vivant sympatriquement sur *C. atlantica*, du fait que les femelles de cette espèce déposent leurs

œufs en se dirigeant vers l'extrémité des rameaux, ce qui élimine toute possibilité de confusion entre les deux espèces de processionnaires (Démolin, 1988). Les écailles protectrices des œufs de *T. bonjeani* sont de taille réduite avec une coloration grisâtre. Une forte similitude a été notée entre les écailles protectrices des espèces d'été : *T. bonjeani*, *T. pinivora*, *T. Libanotica* (Démolin *et al.*, 1994).

Une corrélation significative est notée entre la longueur de ponte et le nombre d'œufs renseigné sur le potentiel reproductif de l'insecte. La longueur des pontes de *T. bonjeani* récoltées dans les sites prospectés du Djurdjura varie de 14 à 48 mm. Quelle que soit l'année et la station, les longueurs des pontes restent comparables. Des données comparables ont été enregistrées sur des populations de l'espèce *T. pityocampa* évoluant sur *C. atlantica* (Sebti, 2011).

Les dénombrements des œufs ont mis en évidence des effectifs caractérisés par une variabilité spatio-temporelle. Des résultats comparables ont été notés chez l'espèce *T. pityocampa* dans la région de Djelfa où la fécondité moyenne diffère d'année en année, et augmente avec la densité des populations (Zamoum et Démolin 2005 ; Zamoum *et al.*, 2015). Selon Myers (2000), les fluctuations de la fécondité des Lépidoptères sont associées aux fluctuations de la densité de population et la fécondité est généralement plus élevée lors de la phase de culmination d'une population.

La fécondité moyenne calculée sur la base des deux années d'observation est d'environ 168 œufs pour la population de Tala-Guilef et de 153 œufs pour la population de Halouane. Sur les populations de *T. bonjeani* évoluant dans la cédraie marocaine, El-Yousfi (1994) note une fécondité moyenne plus conséquente de 186 œufs. Une moyenne de 165 œufs par femelle a été enregistrée sur les pontes de *T. pinivora* (Tsankov *et al.*, 1993). Les pontes de l'espèce *T. ispartaensis* qui se développe sur *Cedrus libani* contiennent en moyenne 121 œufs (Avci, 2003). L'étude conduite par Tsankov *et al.* (1995) sur les pontes de *T. pityocampa* en Algérie a mis en évidence une moyenne de 154 œufs.

La ponte de *T. bonjeani* a lieu en août-septembre. Les œufs de *T. bonjeani* passent l'automne et l'hiver en diapause et n'éclosent qu'au printemps à partir de la dernière décennie du mois de mars pour les populations de la cédraie de Halouane et à partir de deuxième décennie du mois d'avril pour les populations de la cédraie de Tala-Guilef. Ce caractère de diapause des œufs permet de procéder à un échantillonnage en automne-hiver dans le

cadre de l'avertissement (Fraval et Herard, 1978). Au Maroc, El Yousfi (1994) a enregistré sur le plateau d'Azrou une éclosion précoce, soit à partir de la dernière semaine du mois de février. La durée de la diapause embryonnaire au Djurdjura est de 8 mois, plus significative que dans les cédraies marocaine qui est limitée à 6 mois.

L'embryogénèse de *T. bonjeani* a lieu juste après la ponte, et les chenilles se forment après deux mois d'incubation et entrent en diapause. D'après El Yousfi (1989), le minimum demandé pour l'éclosion est de trois mois d'incubation. Le timing des éclosions est une stratégie et une adaptation qui permet aux jeunes chenilles d'échapper aux aléas du climat. En effet, les éclosions des œufs coïncident parfaitement avec la reprise végétative du cèdre.

La chronologie de développement larvaire de *T. bonjeani* dans les quatre stations prospectées a mis en évidence un décalage de l'ordre d'une dizaine de jours. Une faible hétérogénéité est notée dans la vitesse de développement des chenilles dans chacune des stations prospectées. Après l'émergence des adultes et les éclosions qui s'ensuivent, la durée moyenne de premier stade est de 20 jours, de 17 jours respectivement pour le deuxième et le troisième stade, de 16 et 15 jours respectivement pour le quatrième et cinquième stade. Au Djurdjura, la durée moyenne de développement larvaire est de l'ordre de 85 jours, plus courte que celle de *T. pityocampa* qui dure de 9 à 10 mois (Questienne et Miermont, 1978).

Les processions de nymphose observées au Djurdjura sont notées entre la première décennie de juin et la dernière décennie de juillet. Les mêmes résultats sont confirmés dans la cédraie de Belezma par Démolin (1988). Pour l'espèce *T. pityocampa* cohabitant sur *C. atlantica*, les processions de nymphose sont observées à partir du mois mars et se sont échelonnées jusqu'à fin juin, avec un maximum de descente entre le mois d'avril et mai (Sebti, 2015).

La biométrie des différents stades larvaires de *T. bonjeani* présente des valeurs variables au sein des populations larvaires. Les résultats biométriques des larves de *T. bonjeani* sont relativement faibles par rapport à ceux obtenus par Sebti (2015) chez l'espèce *T. pityocampa* évoluant sur cèdre. L'auteur précité note qu'au premier stade, la longueur des chenilles varie de 3 à 4 mm, au second stade, elle est comprise entre 10 et 13 mm, au troisième stade elle oscille entre 16 et 24 mm, et au quatrième stade elle varie entre 23 et 34 mm. La longueur des chenilles de dernier stade varie de 27 à 38 mm.

La biométrie des papillons de *T. bonjeani* au Djurdjura révèle des envergures variables de 25 à 35 mm et de 30 à 41 mm respectivement, pour les mâles et les femelles. Démolin (1969), Cadahia et Torres (1975) ont noté des envergures alaires des mâles de *T. pityocampa* comprises entre 31 et 39 mm.

**QUATRIEME CHAPITRE : FACTEURS DE  
REGULATION DES POPULATIONS DE T.  
*BONJEANI***

# QUATRIEME CHAPITRE

## FACTEURS DE REGULATION DES POPULATIONS DE *T. BONJEANI*

---

### 1. Introduction

Au même titre que les autres espèces de processionnaire, *T. bonjeani* subit à tous les stades de son cycle la pression de prédateurs, de parasitoïdes et de pathogènes. Ces ennemis naturels peuvent avoir un impact important sur les populations des processionnaires. Biliotti (1958) a dressé un inventaire des ennemis naturels s'attaquant à la processionnaire d'hiver *T. pityocampa*. Il existe trois types de parasitoïdes, ceux qui s'attaquent aux œufs, ceux qui s'attaquent aux chenilles et ceux qui s'attaquent aux chrysalides. Les parasitoïdes des œufs sont essentiellement des Hyménoptères de la famille des chalcidiens. En ce qui concerne les chenilles, lorsque ces dernières partent en procession, un certain nombre d'entre elles renferment déjà des larves d'endoparasites. Il s'agit en général de Tachinaires (Démolin, 1971). D'autres parasitoïdes agissant dans le sol à la recherche de nymphes, *Villa brunnea* (Bombyliidae) est un exemple (Du merle, 1969).

Dans ce volet de l'étude, nous avons réalisé un inventaire et une évaluation de l'incidence des principaux facteurs de mortalité des œufs, chenilles et chrysalides de *T. bonjeani*.

### 2. Méthodologie adoptée

#### 2.1. Facteurs de mortalité des œufs

Afin de tirer des informations sur les facteurs de mortalité des œufs, 400 pontes ont été collectées à partir des arbres répartis sur les quatre sites prospectés. L'échantillonnage des pontes a été réalisé pendant le mois de mars et avril des années 2014 et 2015, soit peu de temps avant la période des éclosions des chenilles. Les pontes collectées en 2014 et 2015 ont été déposées par les femelles, respectivement, en automne 2013 (cycle 2013/2014) et 2014 (cycle 2014/2015), et ont passé l'hiver en condition climatique naturelle et ont été exposées aux parasitoïdes durant toute la période de développement de l'hôte. Signalons que notre choix d'effectuer des prélèvements des pontes pendant le mois de mars et avril permettait d'avoir des données sur les éclosions des chenilles et la mortalité embryonnaire aussi proche que possible de celle de la nature. Les pontes



collectées ont été conservées individuellement dans des tubes à essai au laboratoire à une température ambiante de  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  et une humidité relative de  $65 \pm 6\%$ . Le contrôle du matériel biologique a été effectué durant toute la période de sortie des parasitoïdes.

Après l'émergence des parasitoïdes, les écailles de chaque ponte ont été retirées pour apprécier l'état de l'œuf. Quatre statuts possibles des œufs sont décelables pour l'analyse finale des pontes :

1 – Œufs normalement éclos : Ces œufs présentent un trou d'émergence circulaire caractéristique de *T. bonjeani*. Il s'agit donc de chenilles qui ont réussi leur développement larvaire.

2 – Œufs non éclos : Ces œufs ne présentent aucun trou d'émergence. Les œufs qui ne présentaient pas de trou d'émergence ont été ouverts soigneusement sous un stéréomicroscope (Grossissement  $\times 40$ ) afin d'établir la nature du facteur de réduction impliqué.

3 – Œufs parasités : Ces œufs présentent un trou d'émergence caractéristique plus petit que celui de la chenille. A l'intérieur de l'œuf, on retrouve des restes de l'embryon de la chenille, surtout si le parasitisme a eu lieu à un stade avancé du développement, ainsi que le méconium laissé par le parasitoïde juste avant l'émergence. C'est ce méconium qui servira à l'identification de l'espèce de parasitoïde d'après la méthode décrite par Tanzen et Schmidt (1995).

4 – Œufs prédatés : les œufs prédatés se caractérisent par des chorions morcelés et irréguliers.

Ainsi pour chaque ponte de chaque site nous déduisons, le taux d'éclosion des chenilles, le taux de mortalité naturel des chenilles au stade embryonnaire, le taux de prédation, le taux de parasitisme total et par espèce.

L'identification des espèces d'orthoptères prédatrices des œufs de *T. bonjeani* a été effectuée par Pr. S. Doumandji (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, Alger). Les adultes des parasitoïdes oophage obtenus ont été identifiés et confirmés par M. A. Auger-Rozenberg (INRA, Unité de Zoologie Forestière, France) par l'utilisation des marqueurs moléculaires. L'espèce *Hyperparasitoïde* a été identifiée par J. Y. Rasplus (INRA, Centre de Biologie et de Gestion des Populations, France).

## **2.2. Facteurs de mortalité des populations de *T. bonjeani* stades larvaires et du stade nymphal**

Afin de déterminer les facteurs de mortalité des populations de *T. bonjeani* et de quantifier leur action pendant la période s'étendant du départ de procession de nymphose à l'émergence des adultes, un effectif de 3846 chenilles ont été récoltées au cours des mois de juin et de juillet des années 2014 et 2015. Le matériel biologique collecté est placé sur une couche épaisse de sciure dans des boîtes d'élevage transparentes de dimensions (26,5 x 13,5 x 7,5 cm) dont l'ouverture est couverte par un tissu fin pour permettre une aération favorable et empêcher l'envol des parasitoïdes ayant opéré avant la descente des chenilles en procession de nymphose et qui se manifestent dans le sol.

Les émergences sont contrôlées, les espèces sont identifiées et comptabilisées au cours du temps.

Les adultes des parasitoïdes Tachinaires obtenus ont été identifiés par Pr. C. Cerretti (Université de Padova, Italie). Les adultes de Hyménoptère parasitoïde ont été identifiés par G. Delvare (INRA, Centre de Biologie et de Gestion des Populations, France).

## **2.3. Analyses statistiques**

Des analyses de comparaison par One-Way ANOVA ont été effectuées pour tester la différence entre le taux d'éclosions, prédatations et de parasitisme entre les stations au cours des deux années de prospections.

## **3. Résultats**

### **3.1. Impact des parasitoïdes et des prédateurs oophage**

Les 400 pontes prélevées des quatre sites prospectés au cours des deux cycles étudiés ont permis d'analyser au total 66101 œufs. Les résultats du dénombrement des catégories d'œufs sont regroupés dans le tableau 16.

**Tableau 16** : Analyse descriptive des catégories des œufs

| Sites                             | Variables      | Cycle (2013/2014)          |      | Cycle (2014/2015)         |      | F    | p     |
|-----------------------------------|----------------|----------------------------|------|---------------------------|------|------|-------|
|                                   |                | Moyenne (min-max)          | %    | Moyenne (min-max)         | %    |      |       |
| <b>Ikharathan (Tala-Guilef)</b>   | Œufs éclos     | 152,8 ± 42<br>(67-243)     | 85,7 | 67,5 ± 41,7<br>(6-161)    | 46,4 | 29,8 | 0,001 |
|                                   | Œufs parasités | 19,5 ± 16,7<br>(0-69)      | 11,3 | 48,1 ± 33,3<br>(3-124)    | 31,1 | 31,3 | 0,001 |
|                                   | Œufs prédatés  | 0                          | 0    | 0                         | 0    | -    | -     |
|                                   | Œufs non éclos | 5,6 ± 5,1<br>(0-22)        | 3,4  | 35,2 ± 19,9<br>(4-93)     | 22,5 | 41,1 | 0,004 |
| <b>Tala-Omadagh (Tala-Guilef)</b> | Œufs éclos     | 154,1 ± 36,2<br>(76-213)   | 84,2 | 60,4 ± 36,9<br>(01-170)   | 37,8 | 27,1 | 0,001 |
|                                   | Œufs parasités | 20,1 ± 25,3<br>(0-90)      | 11,1 | 69,8 ± 30,1<br>(2-119)    | 35,7 | 28,5 | 0,001 |
|                                   | Œufs prédatés  | 4,5 ± 7,1<br>(0-49)        | 1,3  | 12,1 ± 25,9<br>(17-191)   | 9,2  | -    | -     |
|                                   | Œufs non éclos | 6,2 ± 7,2<br>(0-32)        | 3,4  | 29,9 ± 20,8<br>(5-113)    | 18,4 | 35,2 | 0,001 |
| <b>Tizi-Tumlilt (Tala-Guilef)</b> | Œufs éclos     | 151,9 ± 47,1<br>(66-230)   | 75,5 | 93,7 ± 38,2<br>(29 - 142) | 52,3 | 33,5 | 0,001 |
|                                   | Œufs parasités | 15,3 ± 18,1<br>(0-55)      | 12,5 | 49,1 ± 30,6<br>(0-110)    | 11,4 | 29,7 | 0,001 |
|                                   | Œufs prédatés  | 14,1 ± 16,4<br>(0-279)     | 7,9  | 25,5 ± 29,8<br>(0 - 209)  | 8,1  | 36,1 | 0,003 |
|                                   | Œufs non éclos | 7,5 ± 7,7<br>(0-33)        | 4,1  | 25,7 ± 16,2<br>(2-58)     | 28,2 | 28,9 | 0,004 |
| <b>Halouane</b>                   | Œufs éclos     | 151,7 ± 46,4<br>(47 - 211) | 89,3 | 64,2 ± 41,7<br>(0 - 206)  | 44,9 | 31,1 | 0,001 |
|                                   | Œufs parasités | 13,1 ± 19,3<br>(0 - 62)    | 7,1  | 53,9 ± 33,3<br>(0 - 129)  | 37,8 | 33,2 | 0,001 |
|                                   | Œufs prédatés  | 0                          | 0    | 0                         | 0    | -    | -     |
|                                   | Œufs non éclos | 6,2 ± 12,1<br>(0 - 61)     | 3,6  | 24,7 ± 19,9<br>(0 - 121)  | 17,3 | 28,8 | 0,003 |

Le taux d'éclosion des chenilles de *T. bonjeani* correspond au nombre de chenilles par ponte qui ont réussi leur développement embryonnaire et qui ont émergé de leur œuf. Comparativement, le taux d'éclosion des chenilles est significativement variable durant les deux cycles étudiés (One-Way Anova, F1, 267 = 68,28,  $p < 0,0001$ ). Les pontes issues de cycle 2014/2015 ont présenté un taux d'éclosion de chenilles significativement plus limité. Pour le cycle 2013/2014, la moyenne de taux d'éclosion des chenilles varie de 75,5 à 89,3 % et il n'y a pas d'influence de site d'échantillonnage sur le taux d'éclosion des œufs

(One-Way Anova, F1, 201 = 0,6461 ;  $p = 0,421$ ). Les pontes issues de cycle 2014/2015, présentent un taux d'éclosion variable de 37,8 à 52,3 %, avec l'absence d'influence significative entre les quatre sites d'étude (One-Way Anova, F1, 223 = 0,715 ;  $p = 0,771$ ).

La variation des taux de survie des populations de la processionnaire du cèdre est en relation avec la mortalité naturelle de stade embryonnaire et l'action des ennemis naturels (parasitoïdes et prédateurs). En ce qui concerne la mortalité naturelle des embryons, elle varie significativement entre les deux cycles étudiés (One-Way Anova, F2, 298 = 1,27 ;  $p = 0,001$ ). Ce taux de mortalité varie de 3,1 à 4,1 % et de 17,3 à 28,5 %, respectivement pour le cycle 2013/2014 et 2014/2015.

En ce qui concerne le taux de parasitisme, il varie de 7,1 à 12,5 % pour le cycle 2013/2014 et de 11,4 à 37,8 % pour le cycle 2014/2015. Le taux de parasitisme est significativement plus élevé pour les pontes prélevées au cours de second cycle (One-Way Anova, F1, 362 = 7,23 ;  $p = 0,005$ ). Pour le cycle d'étude 2013/2014, les pontes prélevées en forêt naturelle de Tala-Guilef présentent un taux de parasitisme significativement plus élevé que celles récoltées en forêt artificielle de Halouane (One-Way Anova, F1, 293 = 3,34 ;  $p = 0,001$ ). En revanche, ce taux de parasitisme est significativement plus élevé en forêt de reboisement que celui enregistré en forêt naturelle pour le cycle 2014/2015 (One-Way Anova, F2, 307 = 3,91 ;  $p = 0,001$ ).

La prédation des œufs de *T. bonjeani* a été notée uniquement dans les deux stations (Ikhathar et Tala-Omadagh) de la forêt naturelle de Tala-Guilef. Le taux de prédation varie de 1,3 à 9,2 % pour les pontes prélevées au cours de cycle 2013/2014, et de 7,9 à 8,1 % pour les pontes collectées au cours de cycle 2014/2015 avec une différence de signification (One-Way Anova, F1, 341 = 5,33 ;  $p = 0,012$ ).

### **3.2. Richesse spécifique des différentes espèces d'ennemis oophage**

Une diversité de trois espèces de parasitoïdes a été répertoriée à partir des pontes récoltées dans la forêt naturelle de Tala-Guilef, il s'agit d'*Ooencyrtus pityocampae* (Mercet) (Hymenoptera : Encyrtidae) (Fig. 32A), *Baryscapus servadeii* (Domenichini) (Hymenoptera : Eulophidae) (Fig. 32C), et *Trichogramma embryophagum* (Hartig) (Hymenoptera : Trichogrammatidae) (Fig. 32D). En outre, l'espèce Hyperparasitoïde *Chartocerus* sp. (Hymenoptera : Signiphoridae) a été identifiée dans cette cédraie

naturelle (Fig. 32E). Dans la cédraie reboisée de Halouane, seul le parasitoïde *O. pityocampae* a été noté.

Trois espèces d'Orthoptères prédatrices des œufs de *T. bonjeani* ont été répertoriées uniquement dans le peuplement naturel de Tala-Guilef, il s'agit de *Tettigonia viridissima* (Linnaeus) (Fig. 33A), *Uromenus brevicollis* (Chopard) (Fig. 33B) et *Ephippiger ephippiger* (Fiebig) (Fig. 33C). Ces insectes jouent parfois un rôle important dans la régulation de la processionnaire du cèdre en s'attaquant avec avidité aux pontes non écloses. Des cas des pontes dévorées en totalité ont été repérés (Fig. 34). Ces prédateurs ont été observés durant la période automnale.



*Ooencyrtus pityocampae* (Femelle)



*O. pityocampae* en activité de ponte sur les œufs de *T. bonjeani*



*Baryscapus servadeii* (Femelle)



*Trichogramma embryophagum*



*Chartocerus* sp.

(Originales)

**Figure 32** : Parasitoïdes oophages de *T. bonjeani*



*Tettigonia viridissima*



*Uromenus brevicollis*



*Ephippiger ephippiger*

(Originales)

**Figure 33 :** Prédateurs oophages de *T. bonjeani*



(Originale)

**Figure 34 :** Ponte de *T. bonjeani* détruite par les Tettigoniidae

### 3.3. Abondance des parasitoïdes oophages

Les résultats de taux de parasitisme des œufs par espèce sont basés sur le comptage des parasitoïdes adultes émergés et morts dans les différentes phases de leurs développements embryonnaires sont illustrés dans le tableau 17.

**Tableau 17 :** Importance du nombre moyen de parasitoïdes par ponte

| Sites               | Parasitoïdes                                       | Cycle (2013/2014)      |                    | Cycle (2014/2015)      |                    |
|---------------------|--|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
|                     |  | Moyennes (min-max)     | Abondance relative | Moyennes (min-max)     | Abondance relative |
| <b>Ikharathan</b>   | <i>O. pityocampae</i>                              | 19,7 ± 16,2<br>(0-67)  | 95,2               | 48,0 ± 33,3<br>(3-124) | 96,8               |
|                     | <i>B. servadeii</i>                                | 0,9 ± 1,2<br>(0-4)     | 2,7                | 0,3 ± 0,9<br>(0-2)     | 0,8                |
|                     | Nombre d'œufs parasités par <i>T. embryophagum</i> | 0                      | 0                  | 0,1 ± 0,4              | 0,5                |
|                     | <i>Chartocerus</i> sp.                             | 0,6 ± 0,9<br>(0-3)     | 2,1                | 0,5 ± 0,6<br>(0-2)     | 1,9                |
| <b>Tala-Omadagh</b> | <i>O. pityocampae</i>                              | 25,7 ± 25,5<br>(0-111) | 96,7               | 68,8 ± 30,4<br>(2-119) | 97,2               |
|                     | <i>B. servadeii</i>                                | 0,8 ± 1,4<br>(0-4)     | 0,8                | 0,7 ± 1,2<br>(0-2)     | 0,5                |
|                     | Nombre d'œufs parasités par <i>T. embryophagum</i> | 0,2 ± 0,7<br>(0-3)     | 0,4                | 0,3 ± 0,6<br>(0-5)     | 0,6                |
|                     | <i>Chartocerus</i> sp.                             | 0,7 ± 1,1<br>(0-3)     | 2,1                | 0,5 ± 0,7<br>(0-2)     | 1,7                |
| <b>Tizi-Tumlilt</b> | <i>O. pityocampae</i>                              | 13,9 ± 16,5<br>(0-50)  | 98,9               | 39,0 ± 30,6<br>(0-110) | 99,1               |
|                     | Nombre d'œufs parasités par <i>T. embryophagum</i> | 0,3 ± 0,6<br>(0-5)     | 1,1                | 0,1 ± 0,6<br>(0-2)     | 0,9                |
| <b>Halouane</b>     | <i>O. pityocampae</i>                              | 11,6 ± 17,9<br>(0-82)  | 100                | 53,9 ± 43,1<br>(0-129) | 100                |

Durant les deux cycles étudiés et dans les deux types de peuplement de cèdre (plantation où naturel), *O. pityocampae* est le parasitoïde le plus abondant qui joue un rôle important dans la régulation naturelle des populations de *T. bonjeani* au stade embryonnaire. Cette espèce de parasitoïde affiche un taux de parasitisme le plus significatif à la seconde année de l'étude. Notons que cette augmentation d'abondance d'*O. pityocampae* en 2015, a été accompagnée, d'une réduction de la fertilité de l'hôte. Ce parasitoïde actif suit d'une manière stratégique les populations de son hôte et mérite une attention particulière dans le cadre d'une alternative de lutte biologique.

L'espèce *T. embryophagum* a été localisé dans les trois parcelles de la cédraie naturelle de Tala-Guilef, les taux de parasitisme notés pendant la période d'observation restent faibles (<1%). Vraisemblablement les écailles protectrices jouent un rôle de barrière pour son

extension. Seuls les œufs de l'extrémité qui sont souvent découverts, sont recherchés par ce parasitoïde.

Les espèces, *B. servadeii* et *Chartocerus* sp. ont été notées uniquement dans les deux parcelles : Ikharathan et Tala-Omadagh. Dans le site d'Ikharathan, le taux de parasitisme enregistré pour l'espèce *B. servadeii* est de 2,7 % et de 0,8 %, respectivement pour les deux années de suivi. Dans la parcelle de Tala-Omadagh, les taux de parasitisme enregistrés pour les deux générations étudiées sont respectivement de 0,8% et 0,5 %.

L'espèce Hyperparasitoïde affiche un taux de parasitisme comparable entre les deux parcelles. En 2014, le taux est de parasitisme enregistré est de 2,1 %. En 2015, ce taux est de 1,7 % et de 1,9 % respectivement pour la parcelle Tala-Omadagh et Ikharathan.

### 3.4. Dynamique des émergences de parasitoïde *O. pityocampae*

A partir des lots de pontes récoltées dans les deux cédraies, naturelle de Tala-Guilef et du reboisement de Halouane, les adultes de l'espèce *O. pityocampae* ont émergé en deux vagues, une précoce qui a lieu en automne, avant l'éclosion des chenilles et la seconde vague diapausante a émergé au cours de la période printano-estivale de l'année suivant la ponte. Le taux des émergences des adultes est plus élevé chez la génération diapausante. Les résultats des émergences des adultes d'*O. pityocampae* au cours de temps sont reportés dans le tableau 18.

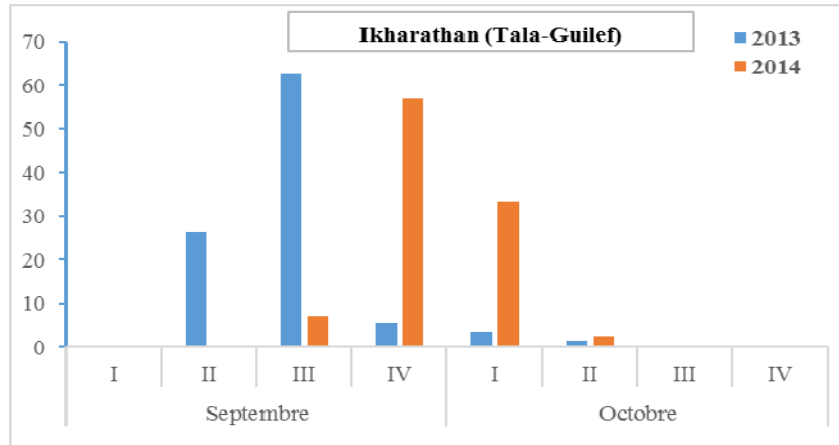
**Tableau 18** : Résultats des émergences des adultes d'*O. pityocampae*

| Sites        | Parasitoïde <i>O. pityocampae</i>                        | Cycle (2013/2014)     |      | Cycle (2014/ 2015)     |      |
|--------------|--|-----------------------|------|------------------------|------|
|              |  | Moyenne (min-max)     | %    | Moyenne (min-max)      | %    |
| Ikharathan   | • Émergés en automne (1 <sup>ère</sup> génération)       | 6,1 ± 6,8<br>(1-30)   | 30,9 | 20,1 ± 19,5<br>(1-30)  | 41,8 |
|              | • Émergés en printemps-été (2 <sup>ème</sup> génération) | 13,6 ± 14,0<br>(1-88) | 69,1 | 27,9 ± 23,9<br>(1-88)  | 58,2 |
| Tala-Omadagh | • Émergés en automne (1 <sup>ère</sup> génération)       | 14,1 ± 17,1<br>(0-46) | 39,6 | 27,2 ± 28,3<br>(1-30)  | 39,5 |
|              | • Émergés en printemps-été (2 <sup>ème</sup> génération) | 21,5 ± 23,3<br>(0-78) | 60,4 | 41,6 ± 53,1<br>(1-112) | 60,5 |
| Tizi-Tumlilt | • Émergés en automne (1 <sup>ère</sup> génération)       | 05,0 ± 11,5<br>(1-30) | 35,9 | 17,1 ± 19,2<br>(1-30)  | 45,4 |
|              | • Émergés en printemps-été (2 <sup>ème</sup> génération) | 08,9 ± 18,1<br>(1-88) | 64,1 | 20,6 ± 13,9<br>(1-88)  | 54,6 |
| Halouane     | • Émergés en automne (1 <sup>ère</sup> génération)       | 3,6 ± 11,5<br>(1-30)  | 30,8 | 15,1 ± 19,1<br>(0-29)  | 28,1 |
|              | • Émergés en printemps-été (2 <sup>ème</sup> génération) | 8,0 ± 17,9<br>(1-88)  | 69,2 | 38,8 ± 28,4<br>(0-73)  | 71,9 |



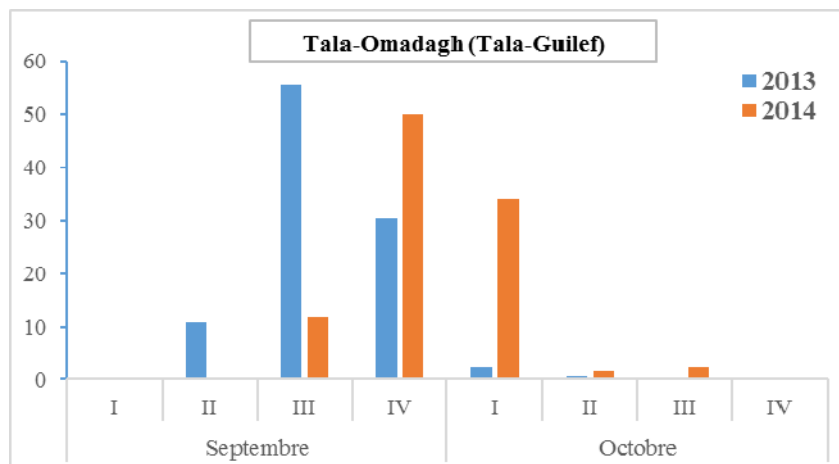
### 3.4.1. Emergence des adultes d'*O. pityocampae* de la génération automnale

A partir des pontes en provenance de site d'Ikharathan, les premiers émergents d'*O. pityocampae* ont été notés à la deuxième semaine de septembre et se sont échelonnés jusqu'à la deuxième semaine d'octobre de l'année 2013, avec un pic maximal à la troisième semaine de septembre (Fig. 35). Pour l'année de 2014, les premières émergences ont été observées à la troisième semaine de septembre et se sont échelonnées jusqu'à la deuxième semaine d'octobre, avec un pic maximal à la quatrième semaine de septembre.



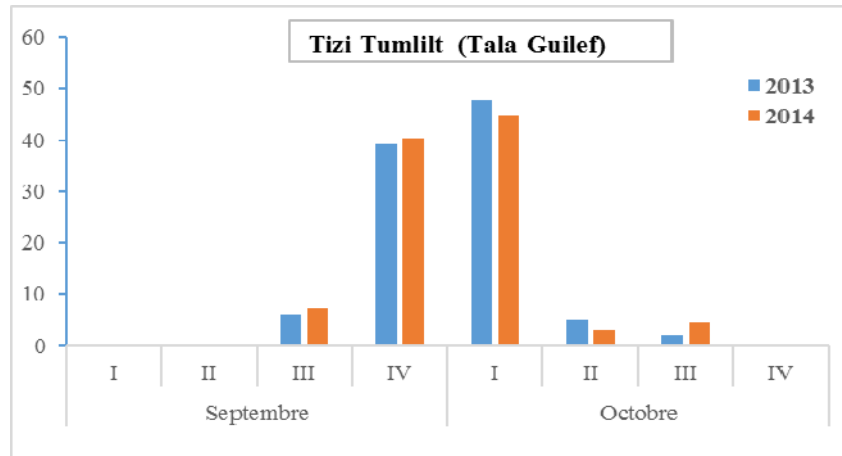
**Figure 35** : Chronologie des émergences des adultes d'*O. pityocampae* de la génération automnale (cas de la station d'Ikharathan).

Pour les pontes provenant de site de Tala-Omadagh, les premiers émergents d'*O. pityocampae* ont été notés à la deuxième semaine de septembre et se sont échelonnés jusqu'à la première semaine d'octobre pour l'année 2013, avec un pic maximal à la troisième semaine de septembre (Fig. 36). Pour l'année de 2014, les premières émergences ont été observées dès la troisième semaine de septembre et se sont échelonnées jusqu'à la troisième semaine d'octobre, avec un pic maximal à la quatrième semaine de septembre.



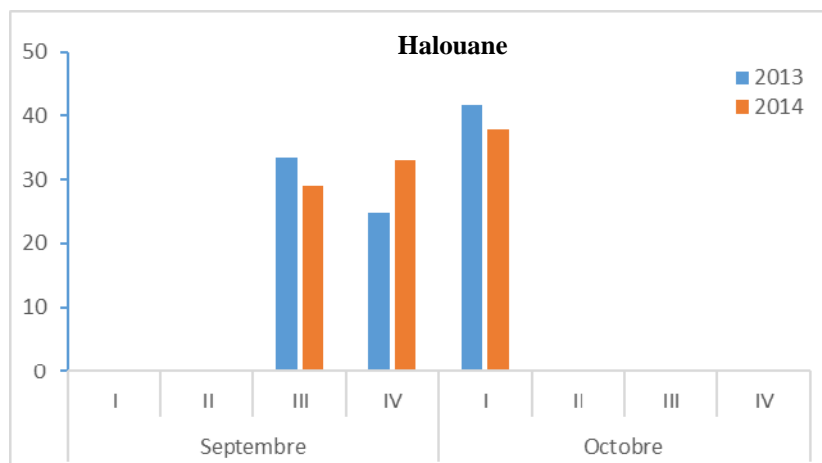
**Figure 36** : Chronologie des émergences des adultes d'*O. pityocampae* de la génération automnale à partir des pontes de *T. bonjeani* (cas de la station de Tala-Omadagh)

Pour les pontes récoltées dans le site de Tizi-Tumlilt et pour les deux années consécutives, les premiers émergents d'*O. pityocampae* ont été notés à la troisième semaine de septembre et se sont échelonnés jusqu'à la troisième semaine d'octobre, avec un pic maximal à la première semaine d'octobre (Fig. 37).



**Figure 37** : Chronologie des émergences des adultes d'*O. pityocampae* de la génération automnale à partir des pontes de *T. bonjeani* (cas de la station de Tizi-Tumlilt)

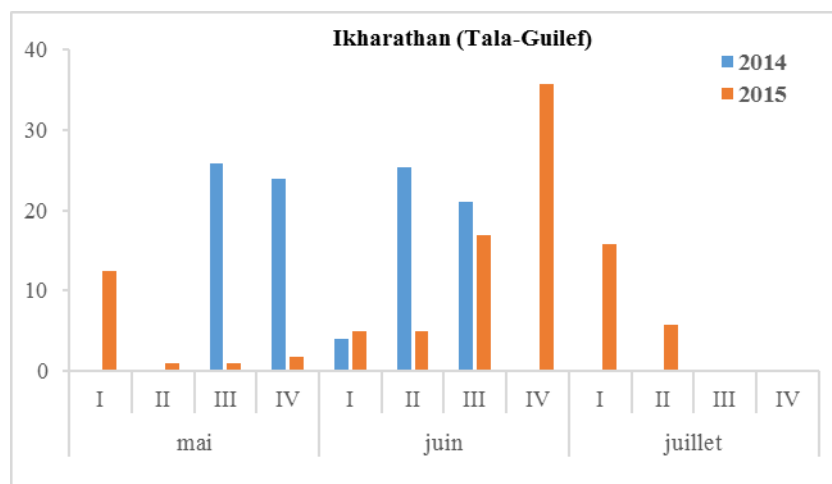
Pour les pontes récoltées de la cédraie de reboisement de Halouane et pour les deux années d'étude, les premiers émergents d'*O. pityocampae* ont été notés à la troisième semaine de septembre et se sont échelonnés jusqu'à la troisième semaine d'octobre, avec un maximum des émergences à la première semaine d'octobre (Fig. 38).



**Figure 38** : Chronologie des émergences des adultes d'*O. pityocampae* de la génération automnale à partir des pontes de *T. bonjeani* (cas de la station de Halouane)

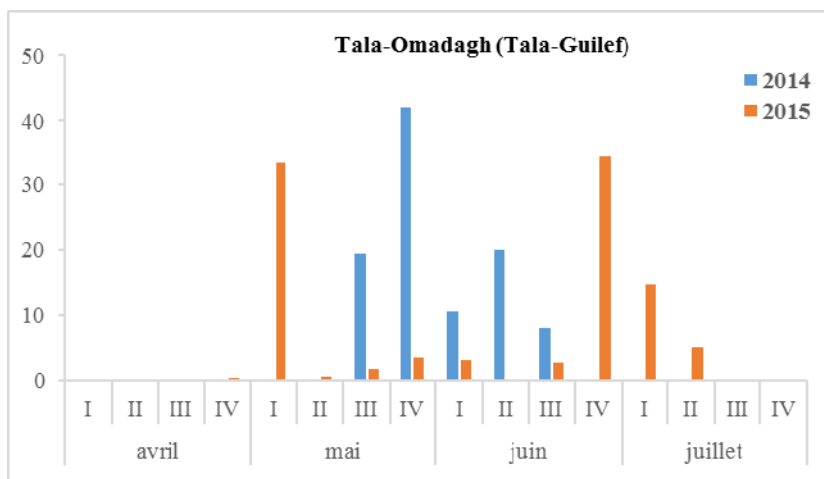
### 3.4.2. Importance des émergences des adultes d'*O. pityocampae* de la deuxième génération

A partir des pontes en provenance de site d'Ikharathan, les premiers émergents d'*O. pityocampae* hibernants ont été notés dès la troisième semaine de mai pour l'année de 2014 et à la première semaine de mai pour l'année 2015 (Fig. 39). Ces émergences se sont échelonnées jusqu'à la troisième semaine de juin pour l'année de 2014, et la deuxième semaine de juillet pour l'année 2015. Les pics des émergences ont été notés durant la troisième semaine de mai et deuxième semaine de juin pour l'année 2014. Pour l'année 2015, le maximum des émergences a été noté durant la quatrième semaine de juin.



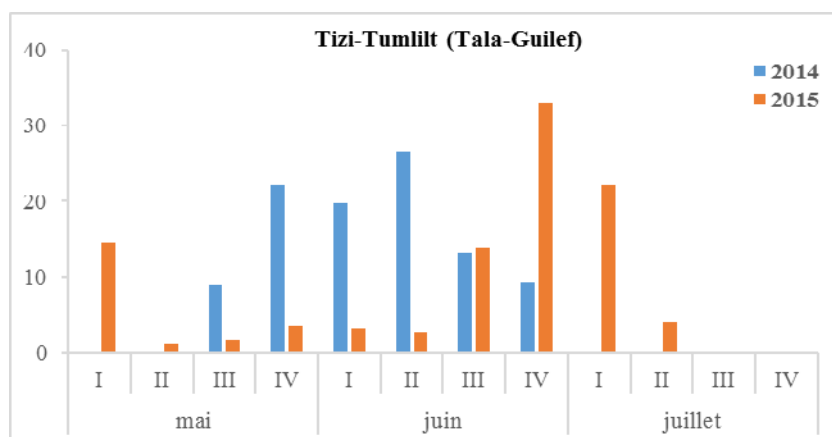
**Figure 39** : Chronologie des émergences des adultes d'*O. pityocampae* de la génération printano-estivale à partir des pontes de *T. bonjeani* (cas de la station de d'Ikharathan)

Pour les pontes en provenance du site de Tala-Omadagh, les premiers émergents d'*O. pityocampae* hibernants ont été notés à la troisième semaine de mai et se sont échelonnés jusqu'à la troisième semaine de juin pour l'année 2014, avec un maximum à la quatrième semaine de mai (Fig. 40). Durant l'année 2015, les premières émergences ont été observées à la quatrième semaine d'avril et se sont étalées jusqu'à la deuxième semaine de juillet, avec un maximum à la première semaine de mai et à la quatrième semaine de juin.



**Figure 40** : Chronologie des émergences des adultes d'*O. pityocampae* de la génération printano-estivale à partir des pontes de *T. bonjeani* (cas de la station de Tala-Omadagh)

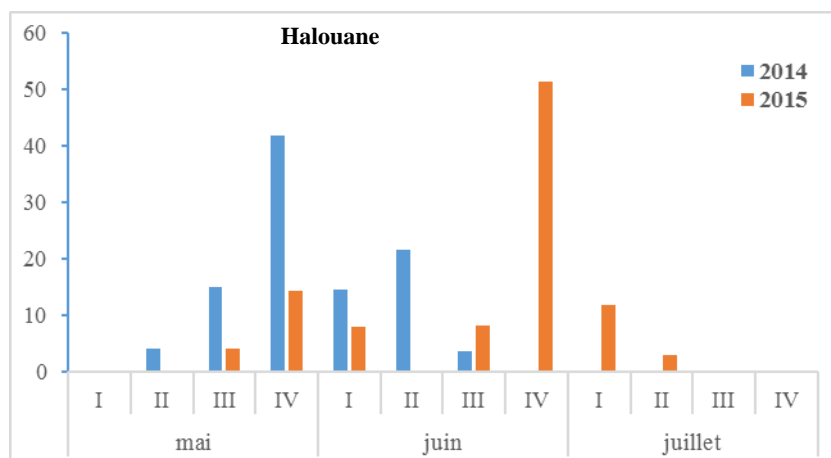
Pour les pontes en provenance de site de Tizi-Tumlilt, les premiers émergents d'*O. pityocampae* hibernants ont été notés à la troisième semaine de mai et se sont échelonnés jusqu'à la quatrième semaine de juin pour l'année 2014, avec un maximum à la deuxième semaine de juin (Fig. 41). Durant l'année 2015, les premières émergences ont été observées à la première semaine de mai et se sont étendues jusqu'à la deuxième semaine de juillet, avec un maximum à la quatrième semaine de juin.



**Figure 41** : Emergences des adultes d'*O. pityocampae* de la génération printano-estivale à partir des pontes de *T. bonjeani* (cas de la station de Tizi-Tumlilt)

Dans le cas de reboisement de Halouane, les premiers émergents d'*O. pityocampae* hibernants ont été observés à la deuxième semaine de mai et se sont étalés jusqu'à la troisième semaine de juin pour l'année 2014, avec un pic maximal à la quatrième semaine de mai (Fig. 42). Durant l'année 2015, les premières émergences ont

été observées à la troisième semaine de mai et se sont échelonnées jusqu'à la deuxième semaine de juillet, avec un pic maximal à la quatrième semaine de juillet.



**Figure 42 :** Emergences des adultes d'*O. pityocampae* de la génération printano-estivale à partir des pontes de *T. bonjeani* (cas de la station de Halouane)

### 3.5. Choix des sites d'oviposition d'*O. pityocampae*

Le tableau 19 résume les résultats du choix de la surface de la femelle d'*O. pityocampae* pour l'oviposition.

**Tableau 19 :** Répartition de l'oviposition d'*O. pityocampae* sur la ponte

| Région      | Parasitoïde                   |        | Surface de la ponte<br>(De la base vers l'extrémité) |      |      |      |       | Total |
|-------------|-------------------------------|--------|--|------|------|------|-------|-------|
|             |                               |        | 1/5  | 2/5  | 3/5  | 4/5  | 5/5   |       |
| Tala-Guilef | <i>Ooencyrtus pityocampae</i> | Nombre | 1 949  | 721  | 492  | 646  | 1 532 | 5 340 |
|             |                               | %      | 36,5   | 13,5 | 9,2  | 12,1 | 28,7  | 100   |
| Halouane    | <i>Ooencyrtus pityocampae</i> | Nombre | 283  | 131  | 86   | 96   | 217   | 813   |
|             |                               | %      | 34,8   | 16,1 | 10,5 | 11,8 | 26,7  | 100   |

L'examen des œufs parasités, a permis de constater que l'attaque de parasitoïde *O. pityocampae* est plus significative aux parties extrêmes de la ponte. Le pourcentage de parasitisme pour les deux extrémités s'élève à 63,4 % (1/5 et 5/5).

### 3.6. Parasitoïdes et entomopathogènes du stade nymphal

#### 3.6.1. Cas de la cédraie de Tala-Guilef

Au cours de la phase nymphale, quatre espèces de parasitoïdes Tachinaires ont émergé à partir des chrysalides de *T. bonjeani* en provenance de la forêt naturelle de Tala-Guilef ; Il s'agit de *C. concinnata*, *E. segregata*, *P. processionea* et *Drino* sp. (Fig. 43). A cela, s'ajoute le champignon entomopathogène *Beauveria bassiana* qui a été identifié comme espèce régulatrice des populations de *T. bonjeani* (Fig. 45).



*Exorista segregata*  
(En position de ponte sur la chenille de *T. bonjeani*)



*Compsilura concinnata*  
(En position de ponte sur *T. bonjeani*)



*Pales processionea*



*Drino* sp.

(Originales)

**Figure 43 :** Tachinaires parasitoïdes des stades larvaires de *T. bonjeani*



(Originale)

**Figures 44 :** Les œufs des Tachinaires sur le tégument de la chenille de *T. bonjeani*



Chenille de dernier stade de *T. bonjeani*  
Infectée par *B. bassiana*



Chenilles du premier stade de *T. bonjeani*  
infectées par *B. bassiana*



Nymphes de *T. bonjeani* Infectées par *B. bassiana*

(Originales)

**Figure 45 :** Chenilles et nymphes infectées par *B. bassiana*

Les données de l'incidence des différents facteurs de mortalité sur la population nymphale de *T. bonjeani* sont regroupées dans les tableaux 20, 21 et 22.

**Tableau 20 :** Facteurs de régulation sur la population nymphale de *T. bonjeani* en provenance de site d'Ikharathan

|   | Année 2014<br>(effectif total 630 nymphes) |             | Année 2015<br>(effective total 601 nymphes) |             |
|---|--|-------------|---|-------------|
|   | Total                                      | %           | Nombre                                      | %           |
| Chrysalides mortes                              | 17   | 2,7         | 15  | 2,5         |
| Chrysalides infectées<br>par <i>B. bassiana</i> | 25   | 3,9         | 3   | 0,5         |
| Chrysalides parasitées :                        | 99   | 15,7        | 56  | 9,3         |
| Par <i>E. segregata</i>                         | 21   | 3,3         | 6   | 0,9         |
| Par <i>C. concinnata</i>                        | 37   | 5,9         | 36  | 6,0         |
| Par <i>P. processionea</i>                      | 18   | 2,9         | 9   | 1,5         |
| Par <i>Drino</i> sp.                            | 23   | 3,7         | 5   | 0,8         |
| <b>Mortalité totale des<br/>chrysalides</b>     | <b>141</b>                                 | <b>22,4</b> | <b>74</b>                                   | <b>12,3</b> |

A partir du matériel biologique en provenance de site d'Ikharathan, le taux de mortalité enregistré est de 22,4 % en 2014 et 12,3 % en 2015 (Tableau 20). La régulation des populations nymphales par le champignon entomopathogène, *B. bassiana* est évaluée à 3,9 % en 2014 et à 0,5 % en 2015. Par ailleurs, l'impact des parasitoïdes varie de 15,7 % et de 9,9 %, respectivement pour les deux années de suivi.

Le taux de mortalité des chrysalides en provenance de site de Tala-Omadagh est de 15,6 % pour l'année 2014 et de 12,1 % en 2015. L'impact des parasitoïdes sur la population nymphale est de 11,2 % en 2014 et de 7,6 % en 2015. La régulation des populations nymphales par *B. bassiana* est semblable durant les deux cycles étudiés (1,1-1,2%).

Le tableau 21, regroupe les données récoltées sur la population en provenance de la station de Tala-Omadagh.



**Tableau 21 :** Incidence des facteurs de régulation sur la population nymphale de *T. bonjeani* en provenance de site Tala-Omadagh

|   | Année 2014<br>(effectif total 411 nymphes) |             | Année 2015<br>(effectif total 423 nymphes) |             |
|---|--|-------------|--|-------------|
|   | Total                                      | %           | Total                                      | %           |
| Chrysalides mortes                                  | 13   | 3,2         | 14   | 3,3         |
| Chrysalides infectées par <i>Beauveria bassiana</i> | 5  | 1,2         | 5  | 1,1         |
| Chrysalides parasitées                              | 46   | 11,2        | 32   | 7,6         |
| Par <i>E. segregata</i>                             | 5  | 1,2         | 4  | 0,9         |
| Par <i>C. concinnata</i>                            | 17   | 4,1         | 5  | 1,2         |
| Par <i>P. processionea</i>                          | 11   | 2,7         | 4  | 0,9         |
| Par <i>Drino</i> sp.                                | 13   | 3,2         | 9  | 2,1         |
| <b>Mortalité totale des chrysalides</b>             | <b>64</b>                                  | <b>15,6</b> | <b>51</b>                                  | <b>12,1</b> |

Pour les populations de la station de Tizi-Tumlilit, le taux de mortalité des chrysalides est de 4,9 % en 2014 et de 7,5 % en 2015. L'impact des parasitoïdes sur la population nymphale est de 3 % pour l'année 2014 et de 4,3 % pour l'année 2015.

Le tableau 22 résume les données recueillies sur l'incidence des divers facteurs de régulations de la population nymphale de *T. bonjeani* en provenance de site de Tizi-Tumlilit.

**Tableau 22 :** Incidence des facteurs de régulation sur la population nymphale de *T. bonjeani* en provenance de site Tizi-Tumlilit

|   | Année 2014<br>(effectif total 301 nymphes) |            | Année 2014<br>(effectif total 279 nymphes) |            |
|---|--|------------|--|------------|
|   | Total                                      | %          | Total                                      | %          |
| Chrysalides mortes                      | 6  | 1,9        | 9  | 3,2        |
| Chrysalides parasitées                  | 9  | 3,0        | 12   | 4,3        |
| Par <i>E. segregata</i>                 | 2  | 0,7        | 0  | 0          |
| Par <i>C. concinnata</i>                | 7  | 2,3        | 3  | 1,1        |
| Par <i>P. processionea</i>              | 0  | 0          | 9  | 3,2        |
| <b>Mortalité totale des chrysalides</b> | <b>15</b>                                  | <b>4,9</b> | <b>21</b>                                  | <b>7,5</b> |

### 3.6.2. Cas de la cédraie reboisée du site de Halouane

Quartres espèces de parasitoïdes ont été notées à partir des chrysalides de *T. bonjeani* en provenance de la cédraie de reboisement de Halouane ; Il s'agit de trois espèces Tachinaires déjà recensées dans le peuplement naturel de Tala-Guilef ; *C. concinnata*, *E. segregata*, *Drino* sp. et de l'espèce parasitoïde hyménoptère Braconide, *Heterospilus* sp. (Fig. 46).

Les résultats des taux de mortalité des populations nymphales de *T. bonjeani* en provenance de la cédraie de Halouane sont illustrés dans le tableau 23.

**Tableau 23 :** Incidence des facteurs de régulation sur la population nymphale de *T. bonjeani* en provenance de la station de Halouane

|   | Année 2014<br>(effectif total 810 nymphes) |             | Année 2015<br>(effectif total 391 nymphes) |            |
|---|--|-------------|--|------------|
|   | Nombre                                     | %           | Nombre                                     | %          |
| Chrysalides mortes                                  | 9  | 1,1         | 7  | 1,8        |
| Chrysalides infectées par <i>Beauveria bassiana</i> | 13   | 1,5         | 6  | 1,5        |
| Chrysalides parasitées                              | 72   | 8,8         | 12   | 3,1        |
| Par <i>E. segregata</i>                             | 12   | 1,5         | 5  | 1,3        |
| Par <i>C. concinnata</i>                            | 33   | 4,1         | 7  | 1,8        |
| Par <i>Drino</i> sp.                                | 22   | 2,7         | 0  | 0          |
| Par <i>Heterospilus</i> sp.                         | 7  | 0,9         | 0  | 0          |
| <b>Mortalité totale des chrysalides</b>             | <b>94</b>                                  | <b>11,6</b> | <b>25</b>                                  | <b>6,4</b> |



(Originale)

**Figure 46 :** Adulte d'*Heterospilus* sp.

### 3.7. Prédateurs des stades larvaires et du stade nymphal

Au cours de notre investigation une diversité de prédateurs des chenilles et de nymphes de *T. bonjeani* a été notée. La prédation des chenilles, été observée uniquement dans la cédraie naturelle de Tala-Guilef. L'action des prédateurs s'est manifestée au cours du mois de juin, essentiellement sur des chenilles du cinquième stade de *T. bonjeani*. Parmi les prédateurs les plus actifs de *T. bonjeani*, le Coléoptère Carabide, *Calosoma sycophanta* (Linnaeus) s'attaque avec voracité aux chenilles des derniers stades ainsi qu'aux nymphes (Fig. 47A, B). D'après nos observations menées au laboratoire, ce dernier consomme en moyenne 10 chenilles par jour. L'espèce de Staphilenide, *Ocypus olens* (Müller), a été observée comme prédatrice des chenilles âgées de *T. bonjeani* au stade de procession (Fig. 47C). L'observation de son comportement d'alimentation a permis de constater que uniquement les têtes des chenilles sont consommées. A celles-ci s'ajoutent les Coléoptères, *Dermestes* sp. (Fig. 47D) et *Hister thoracicus* (Paykull) (Fig. 47E, F) et la punaise *Barchyletes* sp. (Fig. 48A). La punaise *Sphedanolestes sanguineus* (Fabricius) s'attaque aux chenilles des deux premiers stades de *T. bonjeani* (Fig. 48B). De même, l'Hyménoptère Braconide *Meteorus* sp. parasite les chenilles de deuxième et de troisième stades de *T. bonjeani*. Seul trois individus ont été obtenu et uniquement à partir des chenilles en provenance de peuplement artificiel de Halouane (Fig. 49). L'ensemble de ces espèces prédatrices notées dans cette étude ont été identifiées pour la première fois sur les populations de *T. bonjeani*.



*Calosoma sycophanta*  
(s'attaquant à une chenille du stade L5)



*Calosoma sycophanta*  
(s'attaquant à une nymphe)



*Ocypus olens*  
(s'attaquant à une chenille du stade L5)



*Dermestes* sp.  
(s'attaquant à une chenille du stade L5)



*Hister thoracicus*



*Hister thoracicus*  
(s'attaquant à une chenille du stade L5)

(Originales)

**Figure 47** : Les Coléoptères prédateurs des stades larvaires et du stade nymphal de *T. bonjeani*



*Barchyletes* sp.  
(s'attaquants à une chenille du stade L4)



*Sphedanolestes sanguineus*  
(s'attaquant à une chenille du stade L2)

(Originales)

**Figure 48 :** Punaises prédatrices stades larvaires de *T. bonjeani*



(Originale)

**Figure 49 :** Cocon de *Meteorus* sp.

#### 4. Discussion

Le taux d'éclosion des chenilles est significativement variable entre les deux cycles étudiés et les stations prospectées. Les pontes issues de cycle 2013/2014 ont présenté un taux d'éclosion significativement plus élevé. Les taux calculés varient de 37,8 à 75,5 %. Sur les œufs de l'espèce *T. pityocampa* évoluant en Algérie, Tsankov *et al.* (1995), Zamoum (1998) notent des moyennes respectives de 55,8 % et 70 %.

Le taux d'éclosion des chenilles de *T. bonjeani* peut être affecté par deux facteurs : la mortalité naturelle lors du développement embryonnaire et l'action de prédateurs et/ou de

parasitoïdes. Les taux observés pour les différents types de mortalité naturelle lors de développement embryonnaire de *T. bonjeani* varient de 0,6 % à 3,9 %. Dans les cédraies marocaines le taux atteint 20 % (El yousfi, 1989). Chez l'espèce *T. pityocampa* ce taux a été évalué à 4% (Bellin *et al.*, 1990). Les causes de ses mortalités sont diverses. Parmi elles, la température qui peut induire les mortalités embryonnaires (Androic, 1957). Cette mortalité peut être également induite par le comportement des ooparasitoïdes, par leurs piqûres nutritionnelles (Zamoum, 1998). Ce comportement alimentaire des ooparasitoïdes peut être la source de contamination de l'embryon de l'hôte par des entomomycoses (Battisti *et al.*, 1989). De même, il a été observé que les piqûres de tarière des adultes de parasitoïde *Baryscapus servadeii* sur des chenilles de la processionnaire du pin en phase d'éclosion entraînent la mort de ces dernières (Massuti, 1964). Chez l'espèce de Lépidoptère *Tortrix viridana* (Lepi., Tortricidae), Du Merle (1983) a noté une mortalité naturelle de l'ordre de 40 % et qui est causée par les piqûres nutritionnelles d'une espèce de *Trichogramma*.

Les principaux acteurs de la régulation de *T. bonjeani* au stade embryonnaire sont les parasitoïdes oophages et les prédateurs orthoptères. La prédation des œufs par les Orthoptères de la famille des Tettigoniidae a été observée uniquement dans le peuplement naturel. Ce taux de prédation ne dépasse pas 9,2 %. Chez l'espèce *T. pityocampa*, *E. ephippiger* est considérée comme le principal prédateur oophage (Démolin et Delmas, 1967).

La réduction des effectifs de *T. bonjeani* par le complexe des ooparasitoïdes varie entre 7,1 % et 37,8 % et reste variable entre les deux années d'échantillonnages et les sites de son aire. Les pontes issues de cycle 2014/2015 présentent un taux de parasitisme significativement plus élevé. Sur les œufs des autres espèces de processionnaires d'été, le taux de parasitisme embryonnaire a été estimé entre 7,4 et 11,3 % pour *T. ispartaensis* (Avci, 2003) et de 10 % pour *T. pinivora* (Batisti *et al.*, 2015). Sur les œufs de la processionnaire d'hiver *T. pityocampa* en Algérie, Schmidt *et al.* (1997) notent un taux de parasitisme de 21,4 %. Nasr *et al.* (2013) ont enregistré une mortalité de l'ordre de 16 % sur l'espèce *T. wilkinsoni*.

Les études conduites sur les parasitoïdes des espèces de processionnaires ont toujours mis en avant la prédominance de deux espèces de parasitoïdes actifs, le spécialiste *Baryscapus servadeii* et le généraliste *Ooencyrtus pityocampae* (Auger-Rozenberg *et al.*, 2015 ;

Battisti *et al.*, 2015 ; Mirchev *et al.*, 2015). D'autres espèces ont été rapportées mais leur impact est souvent considéré comme négligeable, les espèces *Anastatus bifasciatus*, *Baryscapus transversalis*, *Trichogramma* sp. et *Pediobius* sp. sont des exemples. L'abondance de chaque espèce varie régionalement sur l'ensemble du bassin méditerranéen (Battisti *et al.*, 2015).

Au Djurdjura, la richesse spécifique des parasitoïdes associés à la processionnaire du cèdre sont variables selon la localité étudiée. Une diversité de trois espèces de parasitoïdes embryonnaires a été répertoriée : *O. pityocampae*, *B. servadeii* et *T. embryophagum*.

Les deux espèces, *O. pityocampae* et *B. servadeii* ont été également identifiées sur les œufs de *T. bonjeani* de Maroc (El Yousfi, 1989). Dans les pinèdes de semi-aride de la région de Djelfa, Zamoum *et al.* (2007) ont signalé la présence de quatre espèces de parasitoïdes oophage ; *B. servadeii*, *O. pityocampae*, *Anastatus bifasciatus* et *Eupelmus* sp. Dans la région oranaise, Tsankov *et al.* (1995) ont mis en évidence la présence de *B. servadeii* et *O. pityocampae*.

Dans les sites prospectés, le parasitisme est principalement assuré par l'*O. pityocampae*. Cette espèce a été identifiée au cours des deux années d'échantillonnage et dans toutes les stations échantillonnées. Tandis que les espèces *B. servadeii* et *T. embryophagum* ont un impact très limité. Ces résultats confirment ceux obtenus au Maroc par El Yousfi (1989) qui a enregistré une dominance de l'*O. pityocampae* sur les œufs de *T. bonjeani*. Par contre, une dominance de l'espèce *B. servadeii* a été noté chez la processionnaire du pin en d'Algérie (Tsankov *et al.*, 1995 ; Zamoum *et al.*, 2007 ; Sebti *et al.*, 2015) et au Maroc (Tsankov *et al.*, 1997).

Les adultes d'*O. pityocampae* émergent des œufs de *T. bonjeani* en deux vagues bien distinctes avec un taux plus conséquent pour la génération estivale. La période des émergences de ce parasitoïde coïncide parfaitement avec les envols des adultes de la processionnaire du pin *T. pityocampa* cohabitant avec *T. bonjeani*. Une stratégie de la distribution de ce parasitoïde s'effectue en parfaite adéquation avec les populations des processionnaires d'été et d'hiver ; *T. bonjeani* et *T. pityocampa*.

Le cortège des antagonistes larvo-nymphal impliqué dans la régulation des populations de *T. bonjeani* est diversifié dans sa composition. Les résultats des observations au cours de deux années sur les populations larvaires et nymphales ont permis d'identifier cinq espèces de parasitoïdes polyphages, quatre espèce de Tachinaires ; *Exorista segregata*,

*Compsilura concinnata*, *Pales processionea*, *Drino* sp. et une espèce de Braconide *Heterospilus* sp. Les trois dernières espèces signalées pour la première fois sur les populations de *T. bonjeani*. Ces espèces Tachinidae sont notées comme parasitoïdes de divers défoliateurs, notamment chez la processionnaire d'hiver et même chez le Bombyx disparate (Hamra kroua, 1986 ; Villemant, 1989 ; Khous, 1993). Au Maroc, seule l'espèce *E. segregata* a été signalée comme parasite des chenilles de *T. bonjeani* (El yousfi, 1989). D'après Démolin (1988), cette espèce pond que 4 ou 5 jours après la sortie de la puppe, ce comportement de ponte ressemble à celui de *Phryx caudata*, Tachinaire bien connu comme principal parasite de la processionnaire du pin. Les espèces, *C. concinnata* et *P. processionea* ont été également signalées sur différentes hôtes dans plusieurs pays (Halperin, 1983 ; Halperin, 1990 ; Herring et Dely-Draskovits, 1993 ; Tschorsing et Herting, 2001). Sur les populations de *T. pityocampa* évoluant en Algérie, Zamoum (1998) et Sebti (2015) notent la présence de trois espèces de parasitoïdes. Il s'agit de *E. segregata*, *P. caudata* et *villa brunnea*. En Turquie Avci et Kara (2002) signalent six espèces de Tachinaires parasitoïdes des populations de *T. ispartaensis* : *Btondetia nigripes*, *Carcelia iliaca*, *C. concinnata*, *P. processioneae*, *P. caudata* et *E. segregata*.

En termes de régulation, le taux de mortalité des populations de *T. bonjeani* attribué à l'action des parasitoïdes ne dépasse pas 16 %. Les taux d'incidence cumulés des parasitoïdes observés par Zamoum (1998) et Sebti (2015) sur l'espèce *T. pityocampa* sont respectivement de 4 % et de 13,4 %. Avci et Kara (2002) enregistrent un taux de 8,5 % de mortalité nymphale de *T. ispartaensis*. Sur la population de *T. solitaria*, Halperin (1990) note une mortalité de l'ordre de 4,5 %.

Concernant la prédation des chenilles, elle est essentiellement due à l'activité de *Calosoma sycophanta* et *Ocypus olens*. L'espèce *O. olens* est décrite pour première fois comme prédatrice des chenilles appartenant au genre de *Thaumetopoea*.



**CINQUIEME CHAPITRE : HISTOIRES DE *T.*  
*BONJEANI* ET SON HOTE LE CEDRE DE L'ATLAS :  
APPROCHES COMBINEES DE  
PHYLOGEOGRAPHIE ET DE MODELISATION  
D'AIRE DE DISTRIBUTION**

## CINQUIEME CHAPITRE

### HISTOIRES DE *T. BONJEANI* ET SON HOTE LE CEDRE DE L'ATLAS: APPROCHES COMBINEES DE PHYLOGEOGRAPHIE ET DE MODELISATION D'AIRE DE DISTRIBUTION

---

#### 1. Introduction

Le Quaternaire, qui désigne la période géologique la plus récente, est lui-même subdivisé en deux époques : le Pléistocène (-1,87 millions d'années et 10 000 ans) et l'Holocène (de 10 000 ans à nos jours). Cette ère a été caractérisée par des cycles glaciaires (alternances de glaciations et de réchauffements), conséquences d'oscillations climatiques sévères dues à des modifications de l'axe de rotation de la terre (Avisé 2000 ; Hewitt 2000). Ces cycles glaciaires n'ont pas été sans conséquences sur les êtres vivants et leur distribution géographique, vu l'extension ou la contraction de l'aire d'occupation des espèces avec les changements climatiques (Hewitt 1996, 1999, 2001, 2004 ; Taberlet *et al.*, 1998 ; DeChaine et Martin 2005 ; Karafyllidis, 1998 ; Saetersdal *et al.*, 1998). La grande majorité des espèces étudiées sont des espèces européennes de climat tempéré, dont les aires de répartition étaient très réduites et limitées à des zones refuges souvent Méditerranéennes pendant les maximum glaciaire. A l'inverse, ces espèces ont connu des phases d'expansion géographique vers le nord à l'occasion des interglaciaires. La période actuelle est typique d'une phase interglaciaire.

Mais d'autres espèces ont un préférendum climatique différent. Les espèces alpines ou boréales tolèrent mal les températures élevées, et ont des aires de distribution dans des régions à climat frais (dans les latitudes élevées, ou en altitude). Ces espèces ont répondu aux oscillations climatiques du Quaternaire à l'inverse des espèces tempérées : leurs aires de distribution ont dû être maximales pendant les phases froides et minimales pendant les interglaciaires. Elles sont aujourd'hui restreintes dans des zones refuges froides. Ainsi, le cèdre de l'Atlas, et son ravageur associé *T. bonjeani*, constituent des espèces limitées aux zones de haute altitude dans le Maghreb. Au cours des périodes de glaciation, le cèdre de l'Atlas pouvait se développer sur une aire très étendue couvrant tout le nord du Maghreb (Cheddadi *et al.*, 2009), avec une aire quasi continue d'hôte pour *T. bonjeani*, espèce qui se développe exclusivement sur *C. atlantica*. Les changements climatiques qui sont

survenus en Afrique du Nord depuis le dernier maximum glaciaire ont eu un impact sur la répartition géographique de *C. atlantica* (Cheddadi *et al.*, 2009), et par conséquent sur la distribution de l'espèce *T. bonjeani*.

Le principal objectif de ce chapitre est de retracer l'histoire évolutive de *T. bonjeani* en associant deux approches complémentaires modernes, la phylogéographie et la modélisation d'aires de distribution, afin de mieux comprendre les forces évolutives et les contraintes historiques qui ont influencé la distribution géographique et la structuration génétique actuelle de cet insecte. Les approches de modélisation permettent de plus de réaliser des prédictions sur l'évolution possible de la distribution de l'espèce face aux changements climatiques en cours.

### **La phylogéographie**

La phylogéographie est l'étude des processus gouvernant la distribution des lignées génalogiques, à un niveau d'analyse intra-spécifique (Avice *et al.*, 1987). Elle permet une déduction des phénomènes historiques (génétique et démographique) qui ont conduit à la répartition et à la structuration actuelle des populations (Avice *et al.*, 1987 ; Avice 2000). La phylogéographie permet d'explorer des scénarios évolutifs d'une espèce, et ce à l'échelle spatiale de son aire de répartition et à l'échelle temporelle remontant généralement jusqu'au Quaternaire. La phylogéographie se base sur des données génétiques, et peut intégrer des données issues de domaines différents pour interpréter les patrons mis en évidence (démographie, biogéographie ou encore paléontologie et palynologie). En effet, retracer l'histoire évolutive d'une espèce nécessite de pouvoir reconstruire les liens évolutifs entre individus composant cette espèce, ce qui suppose de connaître le mieux possible les pressions (ex : environnementales, climatiques) qui ont pu peser sur l'espèce. Dans le cas des insectes, le marqueur moléculaire utilisé préférentiellement est l'ADN mitochondrial, dont la séquence est suffisamment variable pour apporter des réponses pertinentes à cette échelle de temps et d'espace.

### **Les marqueurs moléculaires**

Les études phylogéographiques font très largement appel aux techniques utilisant les marqueurs moléculaires. Un marqueur moléculaire est un fragment précis d'ADN qui permet de détecter un polymorphisme particulier grâce à des techniques telles que le séquençage, mis au point par Sanger *et al.* (1977) ou la PCR (Polymerase Chain Reaction

ou réaction de polymérisation en chaîne ; Saiki *et al.*, 1985 ; Saiki *et al.*, 1988). Les marqueurs moléculaires sont variés : ADN des organites (mitochondries ou chloroplastes), ADN nucléaire des séquences correspondant aux espaces intergéniques des ADN ribosomiques ITS (Internal Transcribed Spacer) et plus rarement des marqueurs microsatellites. A l'heure actuelle, la grande majorité des phylogéographies publiées sont basées sur l'étude de l'ADN mitochondrial. L'utilisation de marqueurs nucléaires reste relativement occasionnelle.

Le choix du marqueur est primordial car, suivant les espèces étudiées, un marqueur donné sera plus ou moins informatif. Pour la phylogéographie, un marqueur moléculaire doit être neutre, c'est-à-dire ne pas être soumis aux pressions sélectives de l'environnement. Il doit aussi être suffisamment variable au sein d'une espèce pour permettre de discriminer finement les différences génétiques entre les populations (Hewitt 1996). Toutefois, il ne doit pas être trop variable, pour éviter l'homoplasie et permettre de relier les informations entre elles (Sunnucks, 2000). Enfin, la comparaison d'études réalisées avec différents gènes (par exemple, un marqueur mitochondrial et un marqueur nucléaire), en permettant de rassembler des informations complémentaires, est souvent très instructive. Elle rend possible la mise en évidence de processus génétiques qu'il aurait été difficile de déduire d'une étude avec un seul marqueur, ou la confrontation d'hypothèses évolutives proposées à partir de marqueurs hérités différemment (histoire maternelle pour les gènes mitochondriaux, histoire biparentale pour les marqueurs nucléaires) ou ayant différents rythmes d'évolution. Il existe des articles de synthèse qui présentent de manière très complète les différents marqueurs moléculaires utilisés en entomologie (Loxdale & Lushai 1998 ; Caterino *et al.*, 2000 ; Kerdelhué & Rasplus 2002). Seul le marqueur utilisé « ADN mitochondrial » a été utilisé au cours de cette étude.

### **L'ADN mitochondrial**

L'ADN mitochondrial a été massivement utilisé dans les études de structuration des populations et de phylogénie et plus récemment en phylogéographie. Avise *et al.* (1987) ont d'ailleurs défini cette discipline en s'appuyant sur les études intraspécifiques menées avec ce type de marqueur. En 1998, plus de 80 % des études phylogéographiques avaient été réalisées avec un marqueur mitochondrial (Avise, 1998). L'ADN mitochondrial possède en effet de nombreuses propriétés qui en font un outil très utile pour ce type d'étude. Le génome mitochondrial est circulaire, avec une organisation

simple (pas d'introns dans les séquences codantes) et hérité en une seule entité. Il échappe aux processus de recombinaison et est transmis, via les mitochondries, par les femelles. Son taux de mutation est plus élevé que celui du génome nucléaire (5 à 10 fois, Hewitt, 2001) mais variable suivant les régions du génome. L'ADN mitochondrial peut donc être considéré comme une molécule mosaïque, possédant des zones évoluant plus ou moins vite, et permettant la définition d'amorces universelles (Lunt *et al.*, 1996) qui rendent possible son utilisation chez de très nombreuses espèces. Ces propriétés ont été résumées dans plusieurs synthèses (Avice *et al.*, 1987 ; Harrison 1989 ; Roderick 1996 ; Zhang & Hewitt 1996).

### **Les modèles corrélatifs de l'aire de distribution**

Les modèles de distribution d'espèces sont appelés «modèles de niches écologiques», «modèles basés sur les enveloppes» ou « modèles bioclimatiques». Ces modèles tentent de décrire les besoins écologiques des espèces et prédisent leur répartition, en se basant sur des données climatiques ou environnementales (sol, présence de l'hôte obligatoire...). Ces modèles de prédiction de la répartition géographique des espèces sont importants pour diverses applications, comme par exemple la création de réserves naturelles en vue de conservation d'espèces menacées (Wilson *et al.*, 2005), la prédiction du risque d'invasion ou d'expansion d'espèces envahissantes (Peterson, 2003) et les effets des changements climatiques en cours sur la répartition des espèces en fonction des climats futurs (Pearson et Dawson, 2003 ; Peterson *et al.*, 2004 ; Hijmans et Graham ; 2006). Ces modèles prédisent les aires de distribution potentielles des espèces ; l'aire effectivement réalisée peut être plus restreinte selon les autres contraintes pesant les espèces considérées (capacité de dispersion, relations biotiques, contraintes abiotiques non prises en compte dans le modèle, etc.). Les projections de ces modèles peuvent être faites selon les conditions actuelles, mais dans certains cas, il est possible d'inférer les résultats selon des conditions passées ou futures.

Les modèles de distribution relient les observations spatiales d'un organisme aux variables explicatives environnementales, au moyen de diverses techniques statistiques, allant de la régression logistique à des méthodes de calcul plus complexes (Guisan et Zimmerman, 2000). A ce sujet, Guisan et Thuiller (2005) ont proposé de choisir les variables environnementales des modèles de répartition des espèces pour connaître les trois principaux types d'influences sur leur répartition: i) facteurs limitants ou régulateurs,

définis comme étant les facteurs qui contrôlent l'écophysiologie d'une espèce (ex., la température, l'eau, le sol), ii) les perturbations (naturelles ou humaines) et iii) la disponibilité des ressources, définie comme étant tous les composés pouvant être assimilés par des organismes (ex., l'énergie et l'eau). Dans notre cas, nous avons exclusivement pris en compte les variables bioclimatiques. Les projections passées nous ont permis d'appuyer l'interprétation des données de phylogéographie, tandis que les résultats sur les scénarios futurs ont permis de faire des hypothèses sur l'évolution du système face au réchauffement climatique.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Étude phylogéographique par le marqueur mitochondrial cytochrome oxydase I

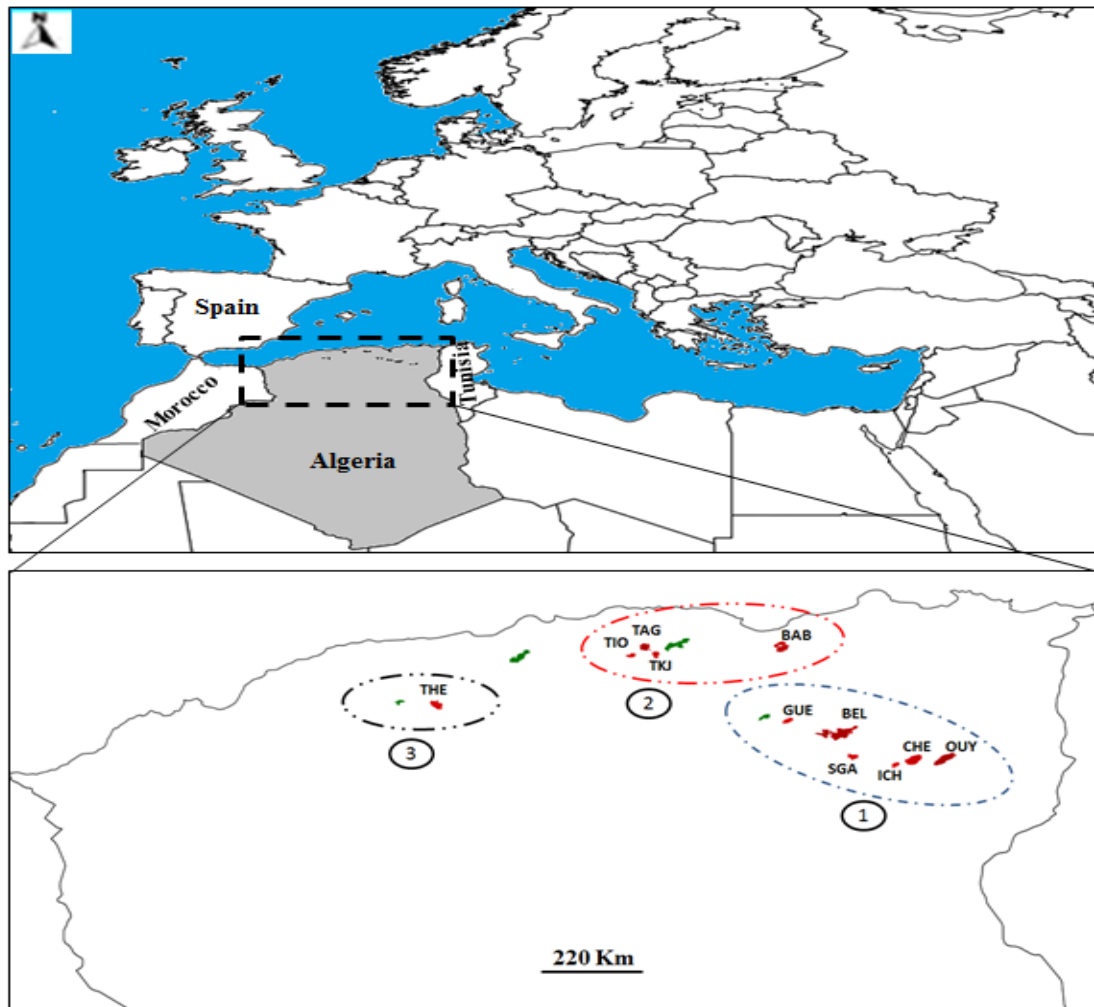
#### 2.1.1. Échantillonnage des populations de *T. bonjeani*

L'échantillonnage des larves de *T. bonjeani* a été réalisé sur l'ensemble de l'aire de présence de l'insecte en Algérie. Au total, 11 sites situés dans des forêts de cèdre de l'Atlas ont été échantillonnés (Fig. 50). Les campagnes de collectes ont été conduites entre le début d'avril et la mi-juillet des années 2013 à 2015, périodes coïncidant avec le développement larvaire de l'espèce ; des chenilles de stade L1 à L5 ont donc été collectées. Dans la mesure du possible, une dizaine de chenilles par site a été récoltée et immédiatement placée dans l'éthanol à 96%, puis stockée à -20°C jusqu'à extraction de l'ADN. Afin d'éviter les problèmes de consanguinité, une seule larve par arbre a été prélevée. Les caractéristiques relatives aux sites prospectés, ainsi que le nombre d'individus analysés sont décrits dans le tableau 24.

**Tableau 24** : Caractéristiques des sites échantillonnés et nombre d'individus analysés

| Région    | Localité       | Code | Latitude | Longitude | Altitude (m)<br>Min-Max | Date de<br>collecte | N <sub>ADNmt</sub> |
|-----------|----------------|------|----------|-----------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| Aurès     | Ichemoul       | ICH  | 35°17'N  | 6°29'E    | 1707-1765               | 2015                | 14                 |
|           | Chélia         | CHE  | 35°18'N  | 6°37'E    | 1809-2107               | 2013, 2014          | 6                  |
|           | Ouled-Yacoub   | OUY  | 35°21'N  | 6°54'E    | 1488-1721               | 2015                | 15                 |
|           | Sgag           | SGA  | 35°22'N  | 6°11'E    | 1693-1711               | 2015                | 10                 |
|           | Belezma        | BEL  | 35°34'N  | 6°40'E    | 1301-1583               | 2014                | 18                 |
|           | Guethian       | GUE  | 35°42'N  | 5°31'E    | 1696-1760               | 2013                | 9                  |
| Djurdjura | Tizi-Oujavoub  | TIO  | 36°26'N  | 3°56'E    | 1167-1181               | 2013, 2014          | 17                 |
|           | Tikjda         | TKJ  | 36°27'N  | 4°60'E    | 1477-1503               | 2013                | 5                  |
|           | Tala-Guilef    | TAG  | 36°28'N  | 4°10'E    | 1403-1825               | 2013, 2014          | 16                 |
|           | Babors         | BAB  | 36°30'N  | 5°30'E    | 1089-1660               | 2015                | 14                 |
| Ouarsenis | Theniet-El-Had | THR  | 35°51'N  | 1°59'E    | 1306-1416               | 2013, 2014          | 16                 |

N<sub>ADNmt</sub> : Nombre d'individus séquencés



**Figure 50** : Carte de répartition des cédraies en Algérie, réalisée par le programme QGIS et à partir des images satellitaires récentes (Google Earth). Note : en vert, forêts de cèdre non échantillonnées ; en rouge, cédraies échantillonnées. Les populations rassemblées par lignes en pointillés correspondent aux trois groupements géographiques utilisés pour l'analyse de variance et correspondant aux grandes cédraies algériennes (1 : Aurès ; 2 : Djurdjura ; 3 : Ouarsenis).

### 2.1.2. Extraction de l'ADN, amplification et séquençage

Les extractions d'ADN génomique total ont été faites à partir des larves entières, sauf capsules céphaliques. Nous avons utilisé le kit d'extraction DNeasy Blood and Tissue Kit (Qiagen, Hilden, Germany), conformément aux instructions du fabricant. La qualité de l'ADN extrait ainsi que sa quantité ont été estimées par spectrophotométrie (Nanodrop®). Pour chaque échantillon d'ADN, un fragment de 896 paires de bases (pb) du gène Cytochrome Oxydase I mitochondrial (COI) a été amplifié en utilisant les amorces Jerry (5'-CAA CAT TTA TTT TGA TTT TTT GG-3') et Pat (5'-TCC AAT GCA CTA ATC TGC CAT ATT A-3') (Simon *et al.*, 1994). Ces amorces ont été choisies car des études

précédentes sur *T. pityocampa* et *T. wilkinsoni* ont montré que ce fragment était suffisamment variable pour des études de phylogéographie (Rousselet *et al.*, 2010 ; Ipekdal *et al.*, 2015). Les amplifications par PCR ont été réalisées dans un volume réactionnel de 25 µl contenant 19,31 µl d'eau MILLIQ, 2,5 µl de tampon 10X, 0,8 µl d'un mélange de dNTP à 2,5 mM, 0,5 µl de chaque amorce à 10 µM, 0,14 µl de polymérase DreamTaq (5U/µl) et 1 µl d'ADN total dilué au 10<sup>ème</sup>. Les conditions d'amplification sont définies comme suit : une dénaturation initiale à 95°C pendant 4 minutes puis 30 cycles comportant une phase de dénaturation de 30 s à 95°C, une phase d'hybridation à 48°C pendant 45 s, et une phase d'élongation de 90 s à 72°C et une élongation finale de 5 min à 72°C. La taille des amplifions a été vérifiée par migration sur gel d'agarose 1,5% avec un marqueur de taille GeneRuler (Fermentas). Chaque produit d'amplification a été purifié et séquencé dans les deux sens sur séquenceur capillaire ABI 3730XL (Applied Biosystems) par la société MWG Biotech AG (Ebersberg, Allemagne).

### **2.1.3. Analyses des données**

#### **2.1.3.1. Alignement des séquences et distribution des haplotypes**

Pour chaque individu, les séquences obtenues dans les deux sens ont été vérifiées et corrigées afin d'obtenir une séquence consensus unique à l'aide du logiciel CODONCODE ALIGNER v4.2.4 (CodonCode Corporation, Dedham, MA, USA). L'ensemble des séquences obtenues, ainsi qu'une séquence provenant d'une étude antérieure (Simonato *et al.*, 2013 ; accession GenBank : HE963107 ; provenance : Chélia « CHE », Algérie) ont été alignées en utilisant CLUSTAL W v1.4 (Thompson *et al.*, 1994) dans le logiciel BIOEDIT v7.0.5, puis traduites en acides aminés en utilisant le programme MEGA v6 (Tamura *et al.*, 2013) pour vérifier que les séquences obtenues étaient bien codantes, et donc qu'aucun codon stop n'était présent. Afin de comparer les distances génétiques trouvées entre populations de *T. bonjeani* et les distances interspécifiques au sein du genre, les séquences de COI des espèces : *Thaumetopoea pinivora* (Treitschke), *T. ispartaensis* (Doganlar & Avci), *T. libanotica* (Kiriakoff & Talhouk) et *T. pityocampa* (Denis & Schiffermüller) ont été utilisées pour comparaison (séquences disponibles sur Genbank, respectivement numéros d'accension : HE963111, HE963109, HE963110, HE963113).

A partir de l'alignement total, les différents haplotypes (séquences uniques) ont été identifiés, et la liste des individus correspondant a été établie. Un réseau d'haplotypes a



été construit avec le logiciel TCS v1.21 (Clement *et al.*, 2000), qui permet de réaliser l'estimation des généalogies de gènes décrite par Templeton *et al.* (1992). La méthode utilise le principe de parcimonie.

### **2.1.3.2. Paramètres génétiques et structuration des populations**

Afin d'estimer la diversité génétique dans chaque population, la diversité haplotypique ( $H_d$ ) et la diversité nucléotidique ( $\pi$ ) (Nei et Tajima 1981 ; Nei 1987) ont été calculées avec Arlequin v3.11 (Excoffier *et al.*, 2005). La distance génétique entre les paires d'haplotypes a été calculée en utilisant la distance dite de « Kimura deux paramètres » (distance K2P) avec le logiciel MEGA. Ce modèle prend en compte la variation du ratio transition/transversion ainsi que le taux de variation entre les sites, et est adaptée aux gènes mitochondriaux codants.

La structuration génétique des populations a été appréhendée par une analyse hiérarchique de la différenciation populationnelle, analyse moléculaire de variance (AMOVA, Excoffier *et al.*, 1992). Cette procédure estime la proportion de variance génétique totale attribuable à différents niveaux hiérarchiques (i.e. intra et inter population, inter groupe). Les groupes ont été définis en fonction de la position géographique des localités échantillonnées. D'autre part, l'indice de différenciation  $F_{st}$  a été calculé entre paires de populations, et la significativité a été estimée en permutant les haplotypes entre les populations. Le même estimateur a été calculé entre les cédraies. Les valeurs de  $F_{st}$  par paire de populations ont été estimées en considérant 1000 permutations aléatoires des haplotypes. L'ensemble de ces tests (AMOVA et  $F_{st}$ ) a considéré le modèle de distance génétique K2P et a été réalisé avec Arlequin.

### **2.1.3.3. Histoire démographique**

Pour inférer l'histoire démographique de l'espèce étudiée et détecter les signes d'expansion géographique récente des populations dans chacun des trois groupements géographiques (Aurès, Djurdjura et Ouarsenis), nous avons utilisé les tests d'écart à la neutralité basés sur les indices  $D$  de Tajima (Tajima, 1989) et  $F_s$  de Fu (Fu, 1997), avec 1000 simulations de coalescence effectuées avec le logiciel DnaSP v5.10 (Librado et Rozas, 2009). Des valeurs significativement négatives de ces indices marquent un écart à la neutralité, qui peut être lié à une expansion démographique récente ou à un effet de la sélection sur le marqueur considéré.

## **2.2. Prédiction des aires de répartition actuelle, passée et future de *T. bonjeani* et son hôte *C. atlantica***

Les points d'occurrence considérés dans ce travail sont situés en Algérie et au Maroc, où l'espèce *T. bonjeani* et son hôte sont endémiques. Nous avons projeté tous les résultats de la modélisation à l'échelle du Maghreb et de l'Europe. Pour leur construction, les SDM nécessitent des données décrivant la distribution actuelle observée des espèces étudiées (variable à expliquer). Pour *C. atlantica*, un total de 42 sites (19 en Algérie et 23 au Maroc) a été utilisé en tant que données de présence pour l'étude de la niche écologique de l'espèce. La répartition actuelle réalisée est tirée d'une imagerie satellite récente, et a été confirmée par les données de la littérature (Quezel, 1980 ; Bariteau *et al.*, 1999 ; M'hirit et Benzyane 2006 ; Roche 2006).

Pour l'espèce *T. bonjeani* en Algérie, nous disposons des données de présence, c'est-à-dire de localités où l'espèce a été observée, et de points où l'espèce a été recherchée sans succès et a donc pu être considérée comme absente. Ces données d'occurrence proviennent uniquement de nos propres observations (lors des campagnes d'échantillonnages de 2013 à 2015). Les coordonnées d'occurrence ont été prises à l'aide d'un GPS (Système de positionnement global). Pour le Maroc, les données d'occurrences sont issues des travaux antérieurs sur l'espèce (El Yousfi, 1989 ; Mokhles, 1990). L'ensemble du jeu de données obtenu représente un total de 241 points d'occurrence, utilisé pour l'étude de la niche écologique de l'espèce.

La modélisation de la niche écologique des deux espèces a été construite avec le programme *MaxEnt* version 3.3.3k (Elith *et al.*, 2011) qui est considéré comme le plus performant pour la prédiction des aires de distribution des espèces (Hernandez *et al.*, 2006 ; Kumar et Stohlgren, 2009 ; Rebelo et Jones, 2010). *MaxEnt* utilise une approche statistique appelée entropie maximale pour réaliser une approximation de la niche écologique de l'espèce étudiée en fonction des variables environnementales choisies (Baldwin, 2009). Cette approche repose sur un algorithme qui permet d'estimer la distribution la plus probable de l'espèce en se basant sur le principe que la meilleure estimation d'une distribution inconnue est celle qui est la moins contraignante pour l'espèce. Les « contraintes » sont définies en comparant la distribution des valeurs des variables environnementales aux points d'observation avec leur distribution pour un grand nombre de points pris au hasard dans la zone d'étude (absence ou présence de l'espèce

possible) (Suárez-Seoane *et al.*, 2008 ; Baldwin, 2009). Plus les valeurs des variables environnementales en un point donné dans la zone d'étude sont proches des conditions moyennes aux points d'observation par rapport aux conditions au niveau des points aléatoires, plus la probabilité d'occurrence prédite pour l'espèce est élevée (Phillips *et al.*, 2006).

Pour évaluer la qualité du modèle produit par *MaxEnt*, nous avons analysé la Courbe Caractéristique d'Opération (ROC - *Receiver Operating Characteristic*) qui attribue une valeur unique en fonction de la performance du modèle (AUC - *Area Under the Curve*). L'analyse ROC est une mesure de sensibilité, qui correspond au taux de positifs vrais (aucune erreur d'omission), par rapport au taux de faux positifs (erreur de prévision superflue). Ainsi, l'analyse ROC évalue la capacité du modèle à prédire correctement les occurrences de l'espèce. Plus la valeur d'AUC est proche de un, plus on est éloigné d'un modèle aléatoire (Phillips *et al.*, 2006). Un modèle est considéré de bonne qualité si la valeur de l'AUC est supérieure à 0,90 (Swets, 1988).

Dix-neuf variables bioclimatiques ont été utilisées pour modéliser l'aire de distribution potentielle des deux espèces (tableau 25). Les données climatiques ont été obtenues à partir des données brutes de WorldClim v1.4 (Hijmans *et al.*, 2005), avec une résolution spatiale de 30 secondes d'arc (environ 1 km). Ces données climatiques sont issues d'interpolations à partir de données de plus de 20000 stations météorologiques couvrant les 5 continents (Koffi *et al.*, 2008). La période de référence, considérée comme le climat actuel dans nos analyses, est 1950-2000. Nous avons constitué un sous-ensemble de données climatiques correspondant aux zones où les deux espèces étudiées sont présentes ou absentes. Les modèles générés sur la base des données disponibles de nos jours ont été utilisés pour prédire les distributions potentielles actuelles, passé (durant le dernier maximum glaciaire, il y a environ 21 000 ans) et du futures (deux horizons ont été considérés : 2050 et 2070).

Pour les projections de climat futur sous l'hypothèse de changement climatique, les données ont été extraites de la base de données WorldClim (Hijmans *et al.*, 2005) qui fournit des couches climatiques à haute résolution avec des prédictions climatiques les plus récentes utilisées dans le cinquième rapport d'évaluation (AR5, *assessment report n°5*) du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Nous avons simulé la distribution potentielle future des deux espèces en utilisant un modèle de circulation générale (GCM : *Global Circulation Models*) parmi les plus recommandés,

BCC\_CSM1.1 (Beijing Climate Center climate system model, Wu *et al.*, 2010) en se basant sur le scénario RCP4.5 ([http://www.worldclim.org/cmip5\\_10m](http://www.worldclim.org/cmip5_10m)). Ce scénario est basé sur un ensemble déterminé de profils représentatifs d'évolution des concentrations en gaz à effet de serre (GES), d'ozone et de précurseurs des aérosols pour le 21<sup>ème</sup> siècle et au-delà (jusqu'en 2300). Le RCP4.5 est considéré comme un scénario « optimiste » associé à des mesures de plafonnement des émissions qui permettent de limiter, à l'horizon 2100, les forçages radiatifs causés par les changements climatiques à un peu plus du double des forçages actuels (Van Vuuren *et al.*, 2011).

**Tableau 25 :** Variables bioclimatiques utilisées pour la modélisation de la niche climatique de *T. bonjeani* et son hôte *C. atlantica*

| <b>Les Variables bioclimatiques</b>             | <b>Codes</b> |
|---|--------------|
| Température moyenne annuelle                    | Bio1         |
| Ecart diurne moyen                              | Bio2         |
| Isothermalité                                   | Bio3         |
| Saisonnalité de la température                  | Bio4         |
| Température maximale du mois le plus chaude     | Bio5         |
| Température minimale du mois le plus froide     | Bio6         |
| Ecart annuel de température                     | Bio7         |
| Température moyenne du trimestre le plus humide | Bio8         |
| Température moyenne du trimestre le plus sec    | Bio9         |
| Température moyenne du trimestre le plus chaud  | Bio10        |
| Température moyenne du trimestre le plus froid  | Bio11        |
| Précipitations annuelles                        | Bio12        |
| Précipitations de la période la plus humide     | Bio13        |
| Précipitations de la période la plus sèche      | Bio14        |
| Saisonnalité des précipitations                 | Bio15        |
| Précipitations du trimestre le plus humide      | Bio16        |
| Précipitations du trimestre le plus sec         | Bio17        |
| Précipitations du trimestre le plus chaud       | Bio18        |
| Précipitations du trimestre le plus froid       | Bio19        |

### 3. Résultats

#### 3.1. Étude phylogéographique

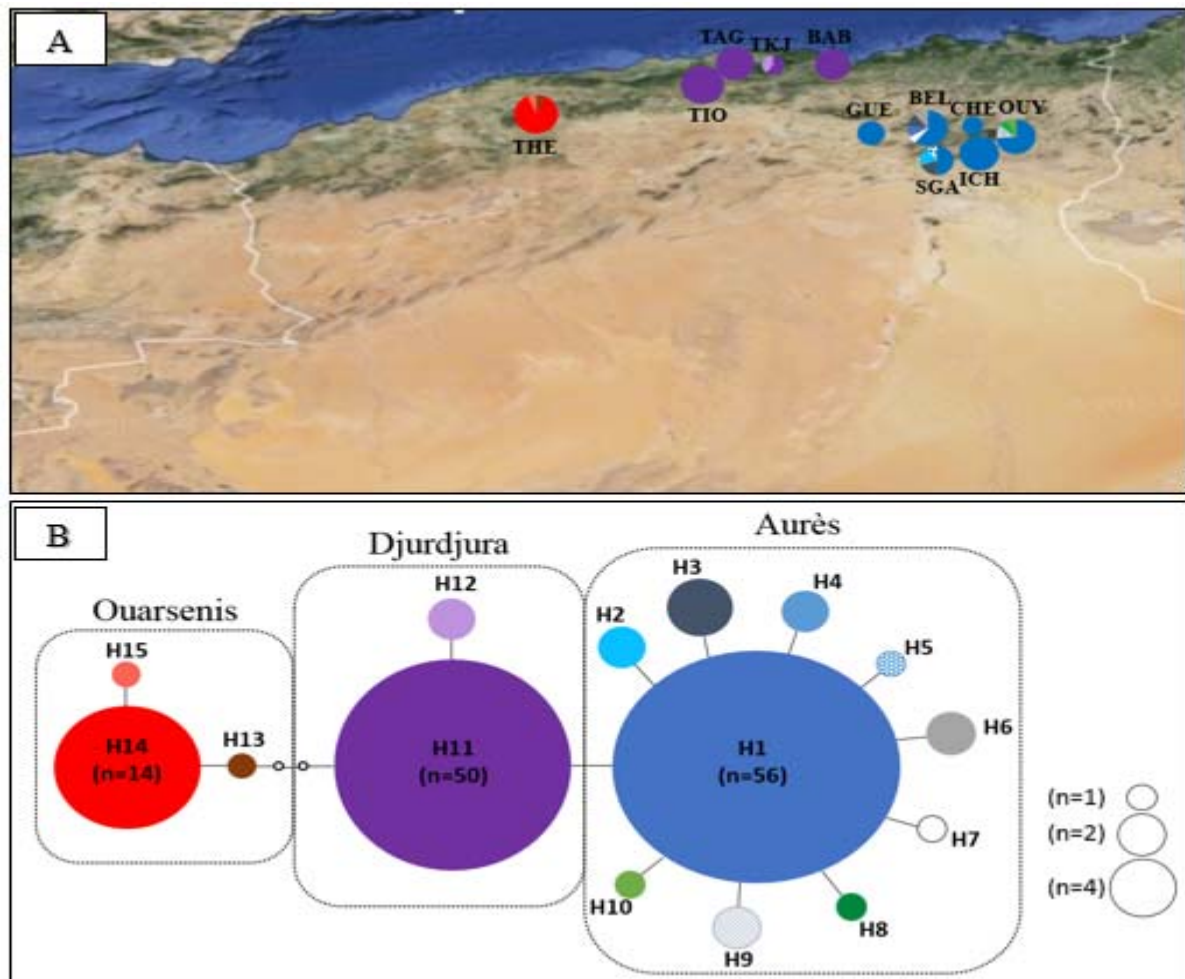
##### 3.1.1. Alignement des séquences et distribution des haplotypes

Un total de 140 individus provenant de 11 sites a été séquencé avec succès pour le gène mitochondrial COI. Nous avons utilisé un fragment final après corrections de 773 pb. L'alignement complet, contenant la séquence de *T. bonjeani* récupérée sur GenBank et les séquences des autres espèces de *Thaumetopoea*, est non ambigu (les chromatogrammes ne contenaient aucun double pic ni fort bruit de fond) et aucun codon stop n'est observé, ce qui indique que notre jeu de données ne contient pas de pseudogène (Bensasson *et al.*, 2001 ; Berteau *et al.*, 2011 ; Haran *et al.*, 2015). Le polymorphisme a été détecté sur 16 sites nucléotidiques, sans insertion ni délétion. Parmi ces sites, 11 étaient informatifs et 5 des singletons. Quinze haplotypes distincts (notés H\_1 à H\_15) ont été identifiés. Dix sont présents dans les Aurès, 2 dans le Djurdjura et 3 à Ouarsenis (Tab. 3 ; Fig. 51a). Les haplotypes sont peu différents les uns des autres, la plupart des haplotypes étant liés à leur plus proche voisin par un seul pas mutationnel, à l'exception des haplotypes de Ouarsenis, séparés de ceux du Djurdjura par 3 pas mutationnels.

Les haplotypes obtenus sont réunis dans un seul réseau en forme d'étoile (Fig. 51B), et structurés en trois haplo-groupes, correspondant parfaitement aux régions géographiques échantillonnées. Un haplo-groupe, composé de 10 haplotypes (de H\_1 à H\_10) regroupe les populations de la région des Aurès (GUE, BEL, SGA, ICL, CHE et OUY). Le deuxième haplo-groupe, formé de deux haplotypes (H\_11 et H\_12), regroupe tous les individus des populations de Djurdjura (TKJ, TAG, TIO et BAB). Le troisième haplo-groupe, constitué de trois haplotypes (H\_13, H\_14 et H\_15), est restreint à la population de Ouarsenis (THE).

Dans chaque haplo-groupe, un haplotype est majoritaire et correspond à au moins 50% des individus de la région considérée, tandis que les autres haplotypes locaux diffèrent de l'haplotype majoritaire par une seule mutation. Ainsi, H\_1 est majoritaire dans les populations des Aurès, avec une fréquence locale allant de 50 à 100% [SGA (50%), BEL (61%), OUY (73%), GUE, ICH et CHE (100%)]; H\_11, est largement répandu dans toutes les populations du Djurdjura, avec une fréquence variant de 60% à 100% [TKJ (60%), TAG, TIO et BAB (100%)] ; et H\_14, détecté exclusivement dans la population de

Ouarsenis (THE), présente une fréquence de 88%. Aucun haplotype commun n'est observé entre les trois zones géographiques.



**Figure 51 :** A) Carte de répartition des haplotypes de *T. bonjeani* en Algérie. B) Réseau haplotypique mettant en relation les différents haplotypes retrouvés dans les populations de *T. bonjeani*. Chaque haplotype est représenté par un cercle de couleur dont le diamètre est fonction du nombre d'individus (n) présents au sein de cet haplotype. Les petits cercles blancs correspondent à des haplotypes fantômes dans lesquels aucun individu de l'étude n'a été retrouvé, et chaque ligne représente un pas mutationnel. Les haplotypes rassemblés par lignes en pointillées correspondent aux trois groupements géographiques échantillonnés.

### 3.1.2. Paramètres génétiques et structuration des populations

Les diversités haplotypique et nucléotidique ont été calculées par population et par zone géographique (tableau 26). La diversité haplotypique est très hétérogène entre populations. Elle varie de 0 à 0,733 (valeur maximale atteinte chez la population de SGA), avec une valeur moyenne de 0,704, alors que la diversité nucléotidique demeure

globalement très basse ( $\pi \leq 0,001$ ). Pour certaines populations du Djurdjura (BAB, TAG et TIO) et des Aurès (CHE, ICH et GUE) la diversité génétique est nulle (présence d'un seul haplotype dans les populations). Par groupe de populations, la région des Aurès présente la plus forte diversité haplotypique et nucléotidique ( $H_d = 0,394$  et  $\pi = 0,0006$ ), ce qui en fait la région la plus diverse génétiquement.

**Tableau 26 :** Liste des haplotypes retrouvés pour chaque population étudiée et paramètres génétiques correspondant.

| ADNmt COI |                  |            |           |   |                                   |                                  |
|-----------|------------------|------------|-----------|---|-----------------------------------|----------------------------------|
| Régions   | Population       | n          | nh        | Haplotypes (n)  | Hd<br>(SD)                        | $\pi$<br>(SD)                    |
| Aurès     | <b>Total</b>     | <b>73</b>  | <b>10</b> | <b>H_1(57), H_2(2), H_3(4), H_4(2), H_5(1),<br/>H_6(2), H_7(1), H_8(1), H_9(2), H_10(1)</b> | <b>0,394</b><br><b>(0,105)</b>    | <b>0,0006</b><br><b>(0,0001)</b> |
|           | CHE              | 7          | 1         | H01(7)  | 0,000                             | 0,0000                           |
|           | OUY              | 15         | 4         | H_1(11), H_6(1), H_7(1), H_8(2),  | 0,467<br>(0,148)                  | 0,0007<br>(0,0002)               |
|           | ICH              | 14         | 1         | H_1(14)   | 0,000                             | 0,0000                           |
|           | SGA              | 10         | 4         | H_1(5), H_3(1), H_9(1), H_10(2),  | 0,733<br>(0,120)                  | 0,0012<br>(0,0003)               |
|           | BEL              | 18         | 5         | H_1(11), H_2(1), H_3(2), H_4(2), H_5(2)   | 0,621<br>(0,117)                  | 0,0010<br>(0,0002)               |
|           | GUE              | 9          | 1         | H_1(9)  | 0,000                             | 0,000                            |
| Djurdjura | <b>Total</b>     | <b>53</b>  | <b>2</b>  | <b>H_6(37), H_7(2)</b>  | <b>0,075</b><br><b>(0,065)</b>    | <b>0,0001</b><br><b>(0,0001)</b> |
|           | TKJ              | 5          | 2         | H_11(3), H_12(2)  | 0,602<br>(0,178)                  | 0,0008<br>(0,0002)               |
|           | TIO              | 17         | 1         | H_11(18)  | 0,000                             | 0,0000                           |
|           | TAG              | 16         | 1         | H_11(16)  | 0,000                             | 0,0000                           |
|           | BAB              | 14         | 1         | H_11(14)  | 0,000                             | 0,0000                           |
|           | <b>Ouarsenis</b> | <b>THE</b> | <b>16</b> | <b>3</b>  | <b>H_13(1), H_14(14), H_15(1)</b> | <b>0,242</b><br><b>(0,135)</b>   |
|           | <b>Global</b>    | <b>141</b> | <b>15</b> | <b>(H_1 à H_15)</b>   | <b>0,704</b><br><b>(0,025)</b>    | <b>0,0020</b><br><b>(0,0002)</b> |

n : nombre d'individus séquencés ; nh : nombres d'haplotypes par population et les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre d'individus partageant l'haplotype considéré ; Hd : diversité haplotypique ;  $\pi$  : diversité nucléotidique. Les codes des localités sont donnés dans le tableau 1.

Les distances génétiques intra-spécifiques entre haplotypes, calculées suivant le modèle « K2P » varient de 0,1 à 0,9%, avec une moyenne de 0,4% (tableau 27). Le maximum de divergence étant trouvé entre certaines populations des Aurès (OUY, SGA et BEL) et la population de Ouarsenis (THE). En revanche, les distances génétiques interspécifiques sont élevées, allant de 5,3 à 15,8%, la plus grande divergence est observée avec l'espèce *T. pityocampa*.

**Tableau 27 :** Distances génétiques entre paires d'haplotypes, calculées d'après le modèle « K2P ».

| <b>Haplotypes</b>      | H_1   | H_2   | H_3   | H_4   | H_5   | H_6   | H_7   | H_8   | H_9   | H_10  | H_11  | H_12  | H_13  | H_14  | H_15  | <i>T.pini</i> | <i>T.lib</i> | <i>T.isp</i> |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|--------------|--------------|
| H_2                    | 0,001 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |               |              |              |
| H_3                    | 0,001 | 0,003 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |               |              |              |
| H_4                    | 0,001 | 0,003 | 0,003 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |               |              |              |
| H_5                    | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |               |              |              |
| H_6                    | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |               |              |              |
| H_7                    | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |               |              |              |
| H_8                    | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |       |       |       |       |       |       |       |       |               |              |              |
| H_9                    | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |       |       |       |       |       |       |       |               |              |              |
| H_10                   | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |       |       |       |       |       |       |               |              |              |
| H_11                   | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |       |       |       |       |       |               |              |              |
| H_12                   | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,001 |       |       |       |       |               |              |              |
| H_13                   | 0,006 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,005 | 0,006 |       |       |               |              |              |
| H_14                   | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,004 | 0,005 | 0,001 |       |               |              |              |
| H_15                   | 0,008 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,006 | 0,008 | 0,001 | 0,003 |               |              |              |
| <i>T. pinivora</i>     | 0,057 | 0,058 | 0,058 | 0,057 | 0,058 | 0,055 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,057 | 0,058 | 0,062 | 0,061 | 0,064 |               |              |              |
| <i>T. ispartaensis</i> | 0,078 | 0,080 | 0,080 | 0,078 | 0,080 | 0,077 | 0,080 | 0,080 | 0,080 | 0,080 | 0,077 | 0,078 | 0,083 | 0,081 | 0,084 | 0,077         |              |              |
| <i>T. libanotica</i>   | 0,081 | 0,083 | 0,083 | 0,081 | 0,083 | 0,080 | 0,083 | 0,083 | 0,083 | 0,083 | 0,083 | 0,081 | 0,088 | 0,087 | 0,090 | 0,073         | 0,053        |              |
| <i>T. pityocampa</i>   | 0,135 | 0,134 | 0,137 | 0,135 | 0,137 | 0,134 | 0,137 | 0,137 | 0,137 | 0,137 | 0,137 | 0,135 | 0,140 | 0,141 | 0,141 | 0,132         | 0,158        | 0,140        |



L'analyse moléculaire de variance (AMOVA) a été réalisée en tenant compte de la situation géographique des populations (Aurès, Djurdjura et Ouarsenis). Tous les composants partitionnant la variance se sont révélés hautement significatifs (tableau 28). La majeure partie de la variation génétique observée est expliquée par la variation inter-régionale (88,4%,  $P < 0,001$ ), montrant ainsi une forte structuration géographique des populations. A l'inverse une faible portion de la variation est retrouvée à l'intérieur des populations (10,6%,  $P < 0,01$ ) et entre les populations à l'intérieur des groupes (1,0%,  $P < 0,01$ ), ce qui suggère que ces niveaux hiérarchiques ne constituent pas un facteur déterminant de la structuration.

**Tableau 28** : Analyse moléculaire de variance (AMOVA) des populations de *T. bonjeani*.

| Source de variation                     | composant de variation | Pourcentage de variation | P-value    |
|---|------------------------|--------------------------|------------|
| Entre groupes                           | 1,09946                | 88,36                    | 0,0000 *** |
| Entre populations au sein des groupes   | 0,01238                | 01,00                    | 0,0020 **  |
| Entre individus au sein des populations | 0,13241                | 10,64                    | 0,0019 **  |

\*\*  $P < 0,01$  ; \*\*\*  $P < 0,001$ .

Les valeurs de  $F_{st}$  entre paires de populations confirment les résultats de l'AMOVA et révèlent une faible structure génétique au sein des populations d'une même zone géographique, mais une forte différence entre les populations de différentes régions (tableau 29).

**Tableau 29** : Calculs des  $F_{st}$  par paires de populations (diagonale basse), et significativité des valeurs de  $P$  (diagonale haute). Niveau significatif = 0,05.

|           |     | Aurès          |                |                |                |                |                | Djurdjura      |                |                |                | Ouarsenis |
|-----------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
|           |     | CHE            | BEL            | GUE            | OUY            | ICH            | SGA            | TKJ            | TIO            | TAG            | BAB            | THE       |
| Aurès     | CHE | 0,00000        | -              | -              | -              | -              | -              | +              | +              | +              | +              | +         |
|           | BEL | -0,04285       | 0,00000        | -              | -              | -              | -              | +              | +              | +              | +              | +         |
|           | GUE | 0,00000        | -0,00378       | 0,00000        | -              | -              | -              | +              | +              | +              | +              | +         |
|           | OUY | -0,04873       | 0,04193        | -0,00766       | 0,00000        | -              | +              | +              | +              | +              | +              | +         |
|           | ICH | 0,00000        | 0,03100        | 0,00000        | 0,02980        | 0,00000        | +              | +              | +              | +              | +              | +         |
|           | SGA | 0,01950        | 0,02877        | 0,07451        | <b>0,08338</b> | <b>0,13425</b> | 0,00000        | +              | +              | +              | +              | +         |
| Djurdjura | TKJ | <b>0,80648</b> | <b>0,60909</b> | <b>0,84952</b> | <b>0,67666</b> | <b>0,88990</b> | <b>0,58051</b> | 0,00000        | +              | -              | -              | +         |
|           | TIO | <b>1,00000</b> | <b>0,72793</b> | <b>1,00000</b> | <b>0,80820</b> | <b>1,00000</b> | <b>0,76429</b> | <b>0,54626</b> | 0,00000        | -              | -              | +         |
|           | TAG | <b>1,00000</b> | <b>0,72152</b> | <b>1,00000</b> | <b>0,80274</b> | <b>1,00000</b> | <b>0,75656</b> | 0,53171        | 0,00000        | 0,00000        | -              | +         |
|           | BAB | <b>1,00000</b> | <b>0,70767</b> | <b>1,00000</b> | <b>0,79079</b> | <b>1,00000</b> | <b>0,73941</b> | 0,49940        | 0,00000        | 0,00000        | 0,00000        | +         |
| Ouarsenis | THE | <b>0,96298</b> | <b>0,90598</b> | <b>0,96770</b> | <b>0,92848</b> | <b>0,97334</b> | <b>0,90860</b> | <b>0,92534</b> | <b>0,96980</b> | <b>0,96882</b> | <b>0,96665</b> | 0,00000   |

Note : Les valeurs en gras sont significatives (et correspondent aux “+” de la matrice en diagonale haute).

### 3.1.3. Histoire démographique

Les valeurs de  $D$  de Tajima et  $F_s$  de Fu sont négatives et hautement significatives pour les populations des Aurès, indiquant une expansion démographique récente pour ces populations. Pour la population de la région de l'Ouarsenis, seule la valeur de  $F_s$  est significative, ce qui suggère une faible expansion de la population qui n'a été détecté que par le test le plus sensible. En revanche, les estimations des deux statistiques ne sont pas significatives pour les populations de Djurdjura (tableau 30), ce qui signifie une évolution neutre pour ces populations.

**Tableau 30** : Valeurs du  $D$  de Tajima et du  $F_s$  de Fu pour les différentes populations de *T. bonjeani*

| groupe de populations | $n$ | $D$ de Tajima<br>( $P$ -value)    | $F_s$ de Fu<br>( $P$ -value)      |
|-----------------------|-----|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Aurès                 | 73  | -1.9949**<br>(0.0030)             | -9.5860***<br>(0.0000)            |
| Djurdjura             | 52  | -0.8255 <sup>ns</sup><br>(0.1950) | -0.6437 <sup>ns</sup><br>(0.0880) |
| Ouarsenis             | 16  | -1.4980<br>(0.0610)               | -1.6146*<br>(0.0140)              |

$n$  : nombre d'individus ; \*  $P < 0,05$  ; \*\*  $P < 0,01$  ; \*\*\*  $P < 0,001$ . ns = non significatif.

## 3.2. Modélisation des aires de répartition actuelle, passée et future de *T. bonjeani* et son hôte *C. atlantica*

### 3.2.1. Le cas de *C. atlantica*

Le modèle de distribution géographique potentielle produit par *MaxEnt* pour *C. atlantica* s'est montré précis (AUC = 0,99), ce qui indique la robustesse de la modélisation effectuée. En plus de valider la distribution connue, le modèle a aussi permis d'identifier de nouveaux habitats favorables où l'espèce pourrait être introduite.

Les variables environnementales ayant le plus de poids dans le modèle de la distribution géographique potentielle du cèdre sont : la température moyenne du trimestre le plus froid (Bio11), contribuant pour 47,9% dans la détermination de l'aire potentielle actuelle ; la température moyenne annuelle (Bio1, 46,66%) ; la température du trimestre le plus humide (Bio8, 3,75%), et les précipitations annuelles (Bio12, 1,67%).

Les résultats de la modélisation montrent que globalement, les habitats qui sont actuellement très favorables à *C. atlantica* en Algérie sont principalement localisés dans le centre-nord et le nord-est du pays, réparties sur l'Atlas tellien et saharien (Fig. 52B). Au Maroc, cet ensemble est représenté par le Rif, le Moyen Atlas et le Haut Atlas. Ces résultats ont montré que les zones où la probabilité d'occurrence était la plus élevée correspondent à des zones se trouvent les points d'observation. Il est intéressant de noter que le modèle suggère la présence potentielle du cèdre en Tunisie, dans les Monts de Kroumirie (Dorsal tunisienne).

Durant le maximum glaciaire (-21 000 ans), le climat de l'Afrique du Nord semble bien convenir au Cèdre, son aire favorable est quasi continue et les populations sont peu fragmentées (Fig. 53B). Contrairement à la période actuelle, les basses altitudes correspondaient alors à des conditions climatiques favorables au développement du Cèdre. En Algérie, le modèle suggère que l'aire potentielle de Cèdre s'étendait sur l'ensemble de l'Atlas tellien et sur la partie orientale et centrale de l'Atlas saharien (Aurès, Hodna, Djelfa). Au Maroc, l'aire favorable à l'espèce s'étendait du Haut Atlas au Moyen Atlas, ainsi sur une vaste part du Rif. Les régions montagneuses de Tunisie (Kroumirie) réunissaient des conditions climatiques favorables à l'installation de *C. atlantica*.

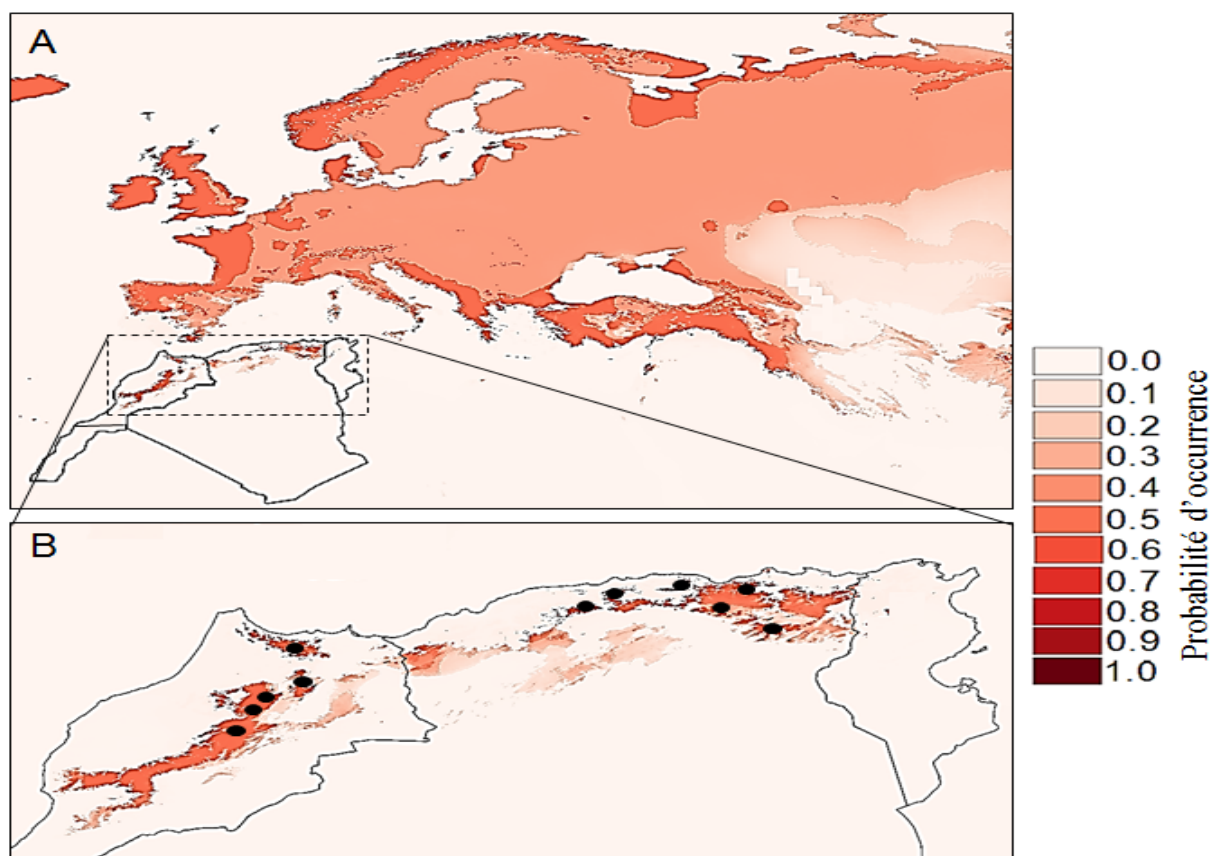
En ce qui concerne les projections futures à l'horizon 2050 et 2070, le modèle prédit une diminution considérable des aires favorables à l'espèce par rapport à l'aire potentielle actuelle (Fig. 54B, 55B). Il ressort de cette analyse que le changement climatique pourrait entraîner la disparition du cèdre de l'Atlas d'une grande partie de l'Algérie ; son aire de distribution deviendrait très morcelée par rapport à l'aire potentielle prédite pour le Maroc. Les hautes altitudes de la partie orientale de l'Atlas saharien (Aurès) pourraient constituer son principal refuge futur en Algérie, si les autres conditions environnementales le permettent.

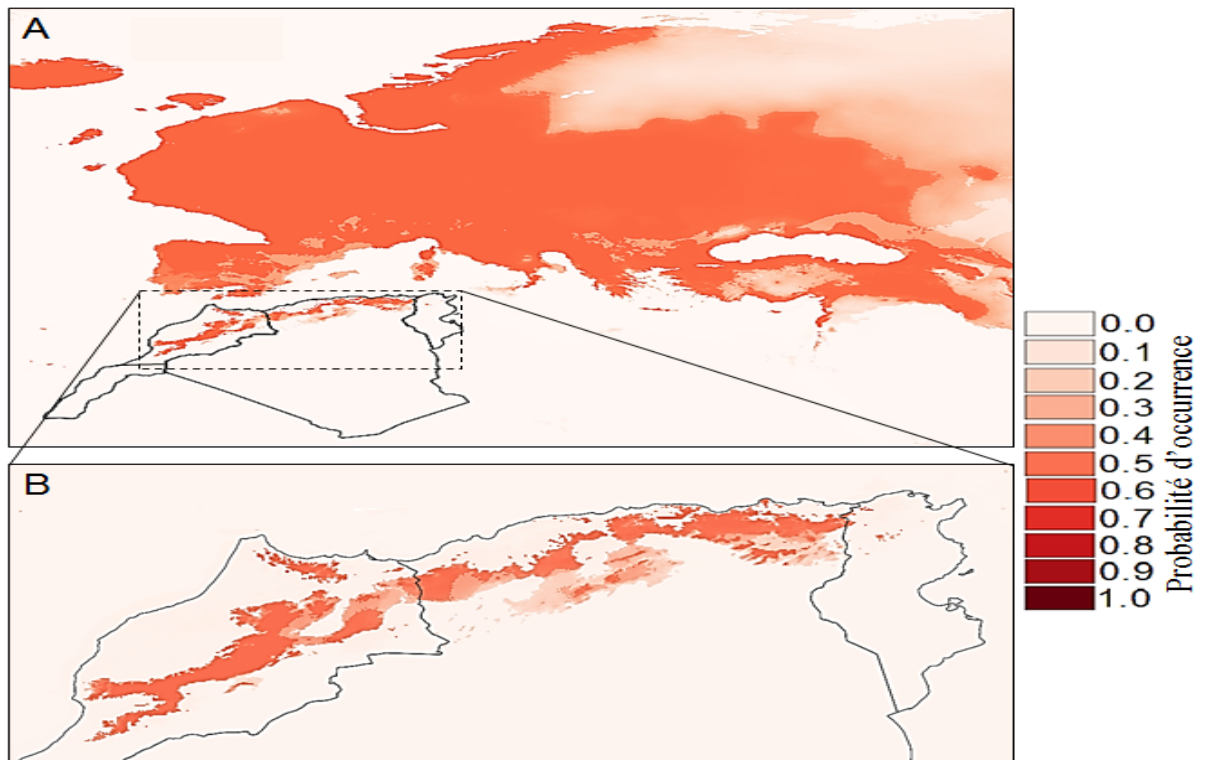
L'enveloppe climatique établie pour *C. atlantica* (Fig. 52A) montre que l'espèce, dont l'aire native est limitée à l'Algérie et au Maroc, pourrait occuper de larges régions d'Europe, qui auraient un climat qui lui est favorable. Le modèle indique que les conditions climatiques sont favorables à *C. atlantica* au nord de l'Espagne, de la Suède, de la Finlande, dans une grande partie du Royaume-Uni, d'Irlande, des Pays-Bas, de la France, de Suisse, de Danemark, de Norvège, de l'Italie, de Portugal, de Belgique, de la Slovénie, de la Croatie, de Bulgarie, de Grèce, de Chypre. Au-delà de l'Europe, les conditions

seraient également favorables au cèdre en Russie et en Turquie (où l'espèce sœur *C. libani* est présente).

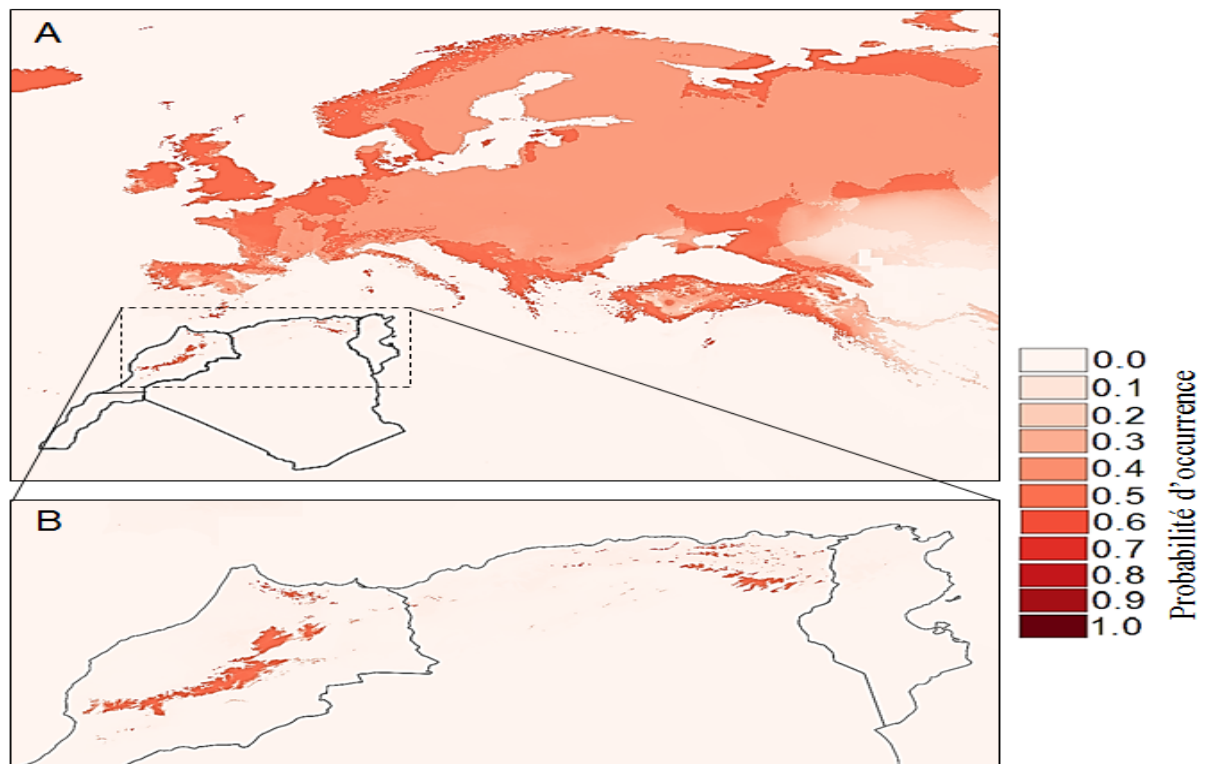
Durant le maximum glaciaire (-21 000 ans), le climat de l'Europe de l'Ouest semble très favorable au Cèdre (Fig. 53A). Dans cette partie de l'Europe, l'aire potentielle de l'espèce est très étendue à cette période. Par contre, le nord et l'est de l'Europe ne conviennent pas au développement du Cèdre. Ces zones sont en effet trop froides.

L'impact potentiel des changements climatiques (à l'horizon 2050 et 2070) sur l'étendue des habitats favorables du Cèdre en Europe est beaucoup moins important que celui prévu pour l'Afrique du Nord (Fig. 54A, 55A).

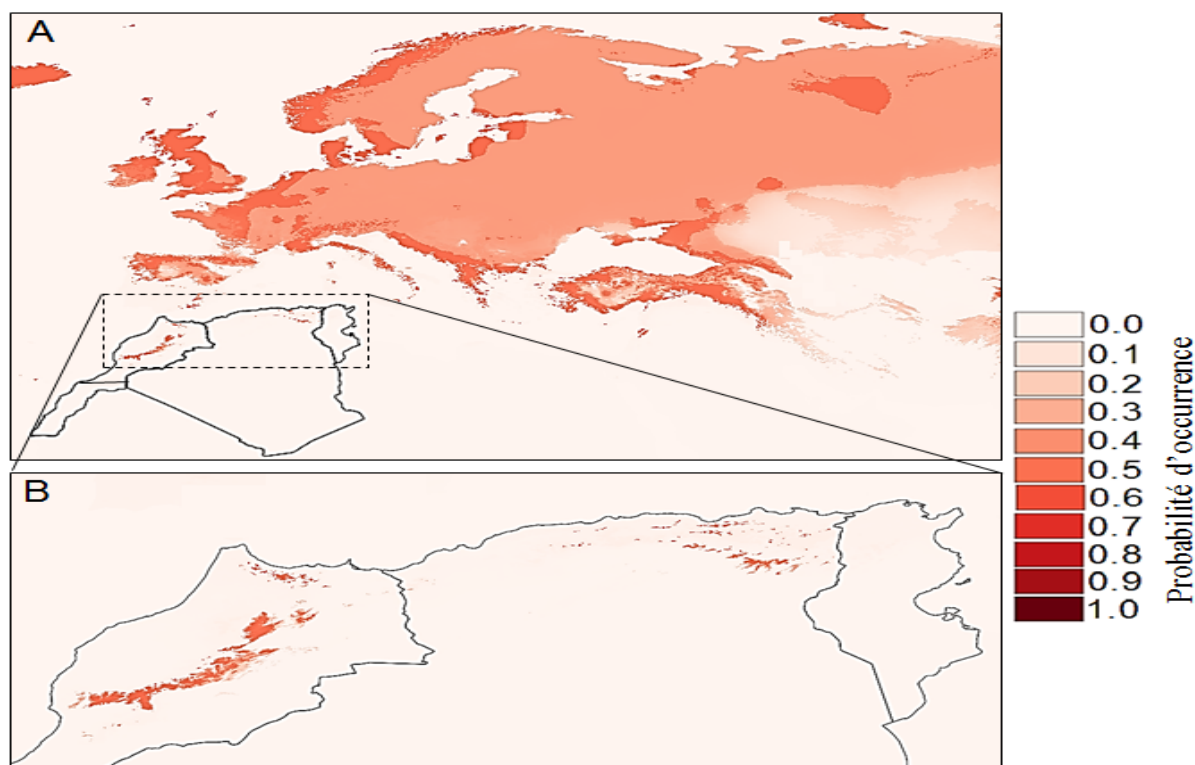




**Figure 53 :** Aire de distribution géographique passée (durant le maximum glaciaire « - 21000 ans ») de *C. atlantica* (marron) (A : en Europe, B : en Afrique du Nord).



**Figure 54 :** Aire de distribution de *C. atlantica* (marron) en 2050 suivant le scénario de changement climatique RCP4.5 (BCC\_CSM1.1) (A : en Europe, B : en Afrique du Nord).



**Figure 55** : Aire de distribution de *C. atlantica* (marron) en 2070 suivant le scénario de changement climatique RCP4.5 (BCC\_CSM1.1) (A : en Europe, B : en Afrique du Nord).

### 3.2.2. Le cas de *Thaumetopoea bonjeani*

Le modèle de distribution géographique potentielle produit par le modèle *MaxEnt* pour *T. bonjeani* s'est montré précis (AUC = 0,99). Ceci suggère une bonne performance de l'algorithme *MaxEnt* pour modéliser les occurrences de cette espèce.

Quatre variables environnementales ont été retenues en tant que variables potentiellement explicatives de l'occurrence de la processionnaire du cèdre. Deux d'entre elles ont un rôle majeur (la température moyenne du trimestre le plus froid Bio11, 94,99% et les précipitations annuelles Bio12, 4,74%. Les deux autres ont une contribution plus mineure (la température du trimestre le plus humide Bio8, contribution de 0,25% et la température moyenne annuelle Bio1, 0.025%).

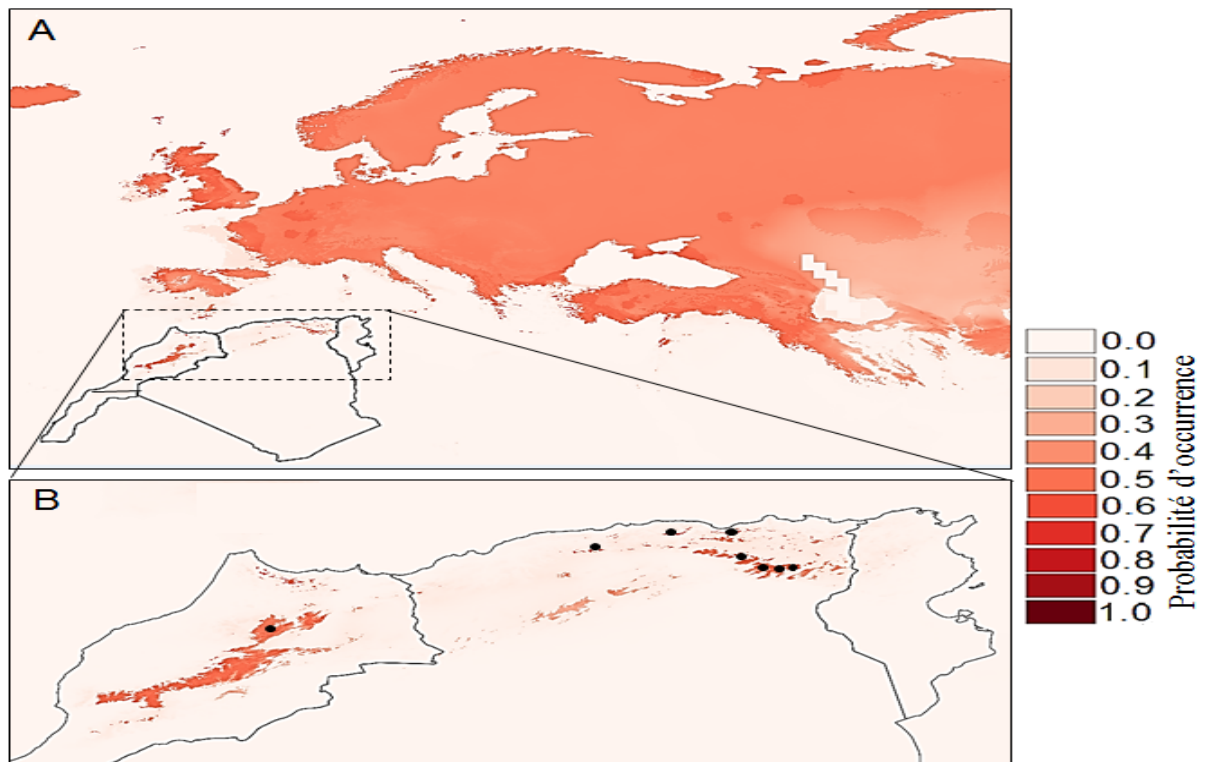
Le modèle ajusté sur les données empiriques a été utilisé pour cartographier la distribution potentielle actuelle de *T. bonjeani* (Fig. 56). Ces résultats montrent que les conditions climatiques sont potentiellement favorables à *T. bonjeani* en hautes altitudes des régions montagneuses d'Algérie et de Maroc. Les populations de l'insecte recensées se rencontrent à des altitudes comprises entre 1300 m et 1900 m.

En Algérie, les résultats de modélisation montrent que les habitats actuellement favorables à l'insecte sont fragmentés en plusieurs îlots plus ou moins importants (Fig. 56B). Les aires favorables sont principalement localisées dans les hautes altitudes de l'Atlas Saharien (Aurès, Hodna) et de l'Atlas Tellien (Ouarsenis, Atlas blidéen, Djurdjura, Bibans, Boutaleb). L'aire potentielle de *T. bonjeani* est beaucoup plus importante au Maroc. Le Moyen Atlas et le Haut Atlas constituent les endroits où l'aire potentielle de l'espèce est la plus étendue, incluant de vastes surfaces au sein desquelles les données d'occurrences de l'espèce sont rares. Les conditions climatiques actuelles en Tunisie ne sont pas supposées favorables à *T. bonjeani*, contrairement aux résultats obtenus sur sa plante-hôte.

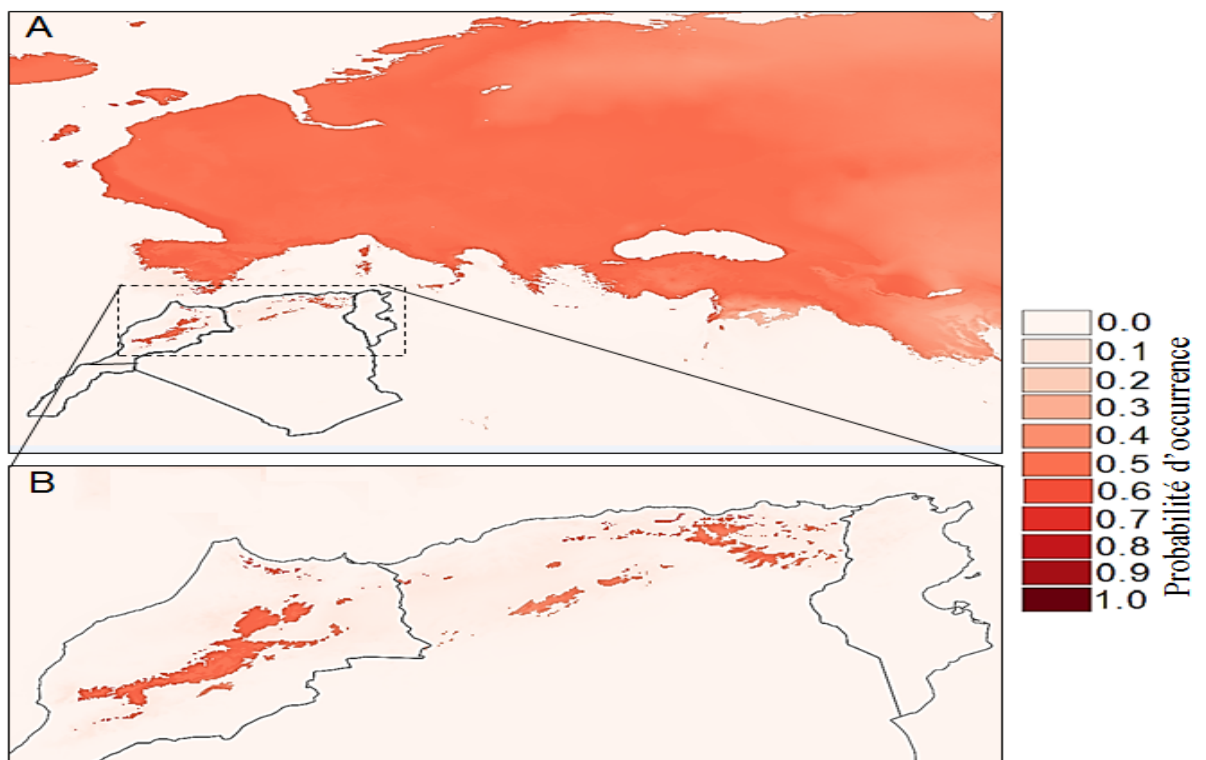
Les résultats de la modélisation laissent entendre que le climat convient à *T. bonjeani* hors de son aire géographique naturelle, dans plusieurs parties de l'Europe (Fig. 56A). L'aire potentielle inclut des vastes surfaces d'Espagne, de Portugal, de France, de Royaume-Uni, d'Irlande, de Belgique, des Pays-Bas, d'Allemagne, de Norvège, de Suède, de Finlande et de la Russie.

Durant le maximum glaciaire et contrairement à son hôte, l'insecte semble occuper des aires limitées et discontinues tout au long du Maghreb (Fig. 57B), et rester absent de Tunisie. Contrairement à la période actuelle, *T. bonjeani* occupait des altitudes moins élevées qui correspondaient alors à des conditions climatiques favorables à son développement.

En ce qui concerne les projections futures pour 2050 et 2070, le modèle prédit une régression considérable des aires actuellement favorables à l'espèce (Fig. 58B, 59B). Sa présence en Algérie sera fortement menacée. Elle n'y subsistera plus que dans certains îlots (Aurès, Hodna, Boutaleb, Djurdjura, Babors), qui pourraient constituer son unique refuge réellement viable en Algérie si les autres conditions environnementales lui sont effectivement favorables.

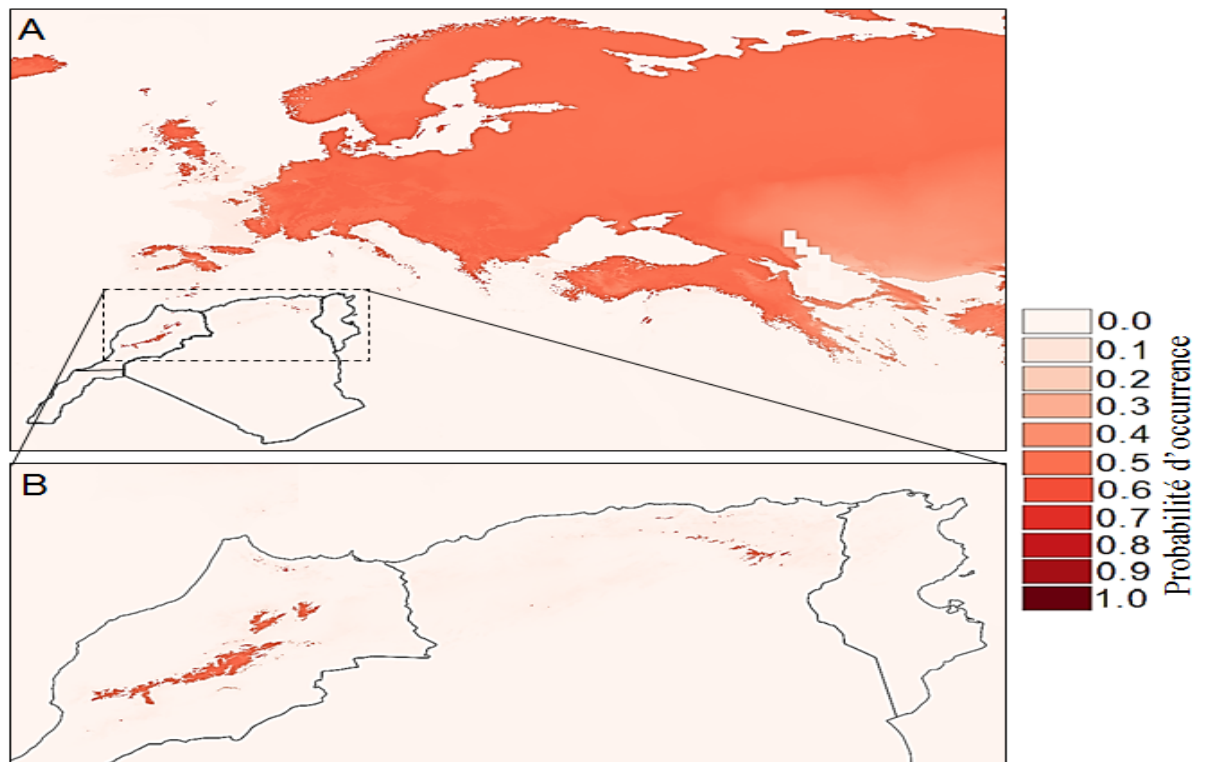


**Figure 56 :** Aire de distribution potentielle actuelle de *T. bonjeani* (marron) (A : en Europe, B : en Afrique du Nord). Plus la probabilité d'occurrence est élevée (du rose vers le rouge sur la carte) plus les caractéristiques climatiques sont supposées favorables à l'espèce. Les cercles noirs sont les localités où l'espèce a effectivement été trouvée.

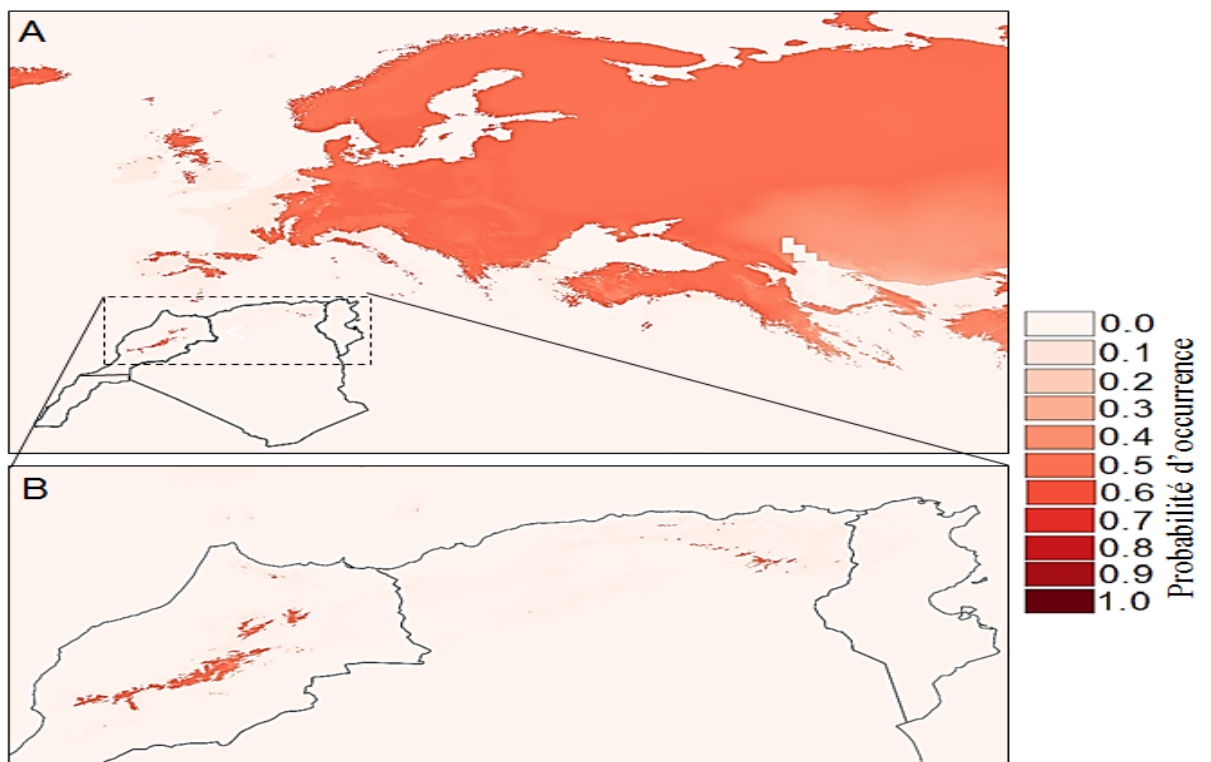


**Figure 57 :** Aire de distribution géographique passée (durant le maximum glaciaire « -21 000 ans ») de *T. bonjeani* (marron) (A : en Europe, B : en Afrique du Nord).





**Figure 58** : Aire de distribution de *T. bonjeani* (marron) en 2050 suivant le scénario de changement climatique RCP4.5 (BCC\_CSM1.1) (A : en Europe, B : en Afrique du Nord).



**Figure 59** : Aire de distribution de *T. bonjeani* (marron) en 2070 suivant le scénario de changement climatique RCP4.5 (BCC\_CSM1.1) (A : en Europe, B : en Afrique du Nord).

#### 4. Discussion

Nous présentons ici la première étude génétique des populations de *T. bonjeani*. Cette analyse expose des informations relatives à la variabilité génétique de l'ADNmt chez l'espèce, ainsi que des données sur sa structure génétique géographique et son histoire démographique en Algérie.

Les séquences d'ADN mitochondrial étudiées ont montré une diversité haplotypique élevée. Sur les 141 individus séquencés, 15 haplotypes différents ont été détectés. La diversité génétique globale  $H_d$  atteint une valeur élevée (0,704). On aurait pu s'attendre à une divergence moins importante entre les populations algériennes de *T. bonjeani*, situées dans des zones biogéographiques peu distantes. La plus grande diversité au sein des populations des Aurès pourrait suggérer que ces populations correspondent à une zone refuge importante. Chez les populations de *T. pinivora*, espèce proche écologiquement et génétiquement de *T. bonjeani* (Frérot *et al.*, 1990 ; Frérot et Démolin, 1993 ; Simonato *et al.*, 2013), Cassel-Lundhagen *et al.* (2013) ont mis en évidence une diversité génétique faible ( $H_d = 0,146$ ), avec sept haplotypes pour 128 individus (1 seul haplotype trouvé en Russie, France et Danemark ; 2 haplotypes en Suède ; 3 haplotypes en Allemagne ; 4 haplotypes trouvés en Espagne).

Les résultats des analyses phylogéographiques prenant en compte les différents haplotypes mitochondriaux identifiés chez *T. bonjeani* mettent clairement en évidence trois haplo-groupes correspondant à des populations occupant des entités géographiques bien définies : un haplo-groupe présent au nord-ouest (Ouarsenis : Theniet El-Had), un haplo-groupe limité au centre nord (Djurdjura : Tikjda, Tala-Guief, Tizi-Oujavoub et Babors), un haplo-groupe regroupant les populations de l'est (Aurès : Ouled-Yacoub, Chélia, Ichemoul, Sgag, Belezma et Guethian). Aucun haplotype commun n'est trouvé entre les trois zones géographiques, qui correspondent à des groupes de cédraies proches. Tous les haplotypes trouvés sont endémique d'un site d'échantillonnage ou d'une région. Cela tend à montrer que les flux de gènes femelles sont très restreints dans l'espace. En effet, l'absence de continuum forestier tout au long des trois groupements géographiques (350 km au minimum sépare une population des Aurès de Ouarsenis ; 140 km au minimum sépare une population des Aurès de celle de Djurdjura ; 220 km au minimum sépare la population de Ouarsenis de celle de Djurdjura) peut être l'origine de cet isolement reproductif. Il est intéressant de noter que cette structuration spatiale de la diversité

génétique de *T. bonjeani* n'est pas accompagnée par une structuration de son hôte *C. atlantica*. En effet, Terrab *et al.* (2008) ont enregistré une très faible variabilité génétique au sein des populations de *C. atlantica* en Algérie (Ouarsenis, Djurdjura et Aurès), avec une absence de structuration phytogéographique.

La présence d'haplotypes dominants et de nombreux autres haplotypes uniques dans le réseau peut indiquer une sélection (Avisé *et al.*, 1984), ou des événements stochastiques dans l'histoire de la population, comme un effet fondateur ou un goulot d'étranglement suivi d'une expansion (D'Amato et Carvalho, 2005). L'allure générale du réseau ainsi que les résultats obtenus au cours des différentes analyses statistiques (tests de neutralité) aident à comprendre l'histoire évolutive des populations. Ainsi, une population qui n'est pas à l'équilibre mais plutôt en expansion présentera un réseau régulier en étoile, ce qui a été reporté dans la présente étude. Les deux tests de neutralité sont basés sur le modèle de mutation dit des sites infinis, sans recombinaison. Des études de simulation suggèrent fortement que le test du  $D$  de Tajima (Tajima 1989) présente un plus fort pouvoir de résolution que d'autres tests similaires lorsque les hypothèses alternatives sont des balayages sélectifs ou un goulot d'étranglement (Simonsen *et al.*, 1995). Le test  $F_s$  de Fu (Fu, 1997) détecte un excès d'allèles rares récents et est particulièrement sensible dans le cas des populations en expansion et si le gène subit un effet d'entraînement génétique (auto-stop génétique) (Fu, 1997). Une valeur  $D$  de Tajima négative correspond à un nombre excessif d'allèles (polymorphisme de basse fréquence), ce qui indiquerait une récente expansion de la population ou un gène subissant un effet d'entraînement génétique et/ou une sélection purificatrice (Holsinger, 2010). Les valeurs de  $D$  de Tajima et  $F_s$  de Fu sont négatives et hautement significatives pour les populations des Aurès, indiquant une expansion démographique passée pour ces populations. Pour la population de la région de l'Ouarsenis, seule la valeur de  $F_s$  était significative, ce qui suggère une faible expansion de la population. En revanche, les estimations des deux statistiques ne sont pas significatives pour les populations de Djurdjura, ce qui signifie une évolution neutre pour ces populations.

L'AMOVA hiérarchique réalisée montre que les variations moléculaires observées chez *T. bonjeani* sont davantage entre groupes de populations. L'analyse révèle la présence d'une structure génétique géographique significative entre les trois groupements de populations (Ouarsenis, Djurdjura et Aurès), qui pourrait être la conséquence de l'isolement géographique. Les haplotypes des trois groupes de populations diffèrent entre eux par

quelques pas mutationnels seulement, et leur distance génétiques varient de 0,1 à 0,9 %. Le maximum de divergence étant trouvé entre certaines populations des Aurès (OUY, SGA et BEL) et la population de Ouarsenis (THE), ce qui correspond aux paires les plus distantes géographiquement (situées entre 410 et 490 km à vol d'oiseau).

Le calcul de temps de divergence entre les deux haplotypes très divergents donne 43 000 ans, soit au cours du Pléistocène : Ce temps de divergence entre haplotypes a été estimé grâce à l'horloge moléculaire définie par Farrell *et al.* (2001) pour le COI des arthropodes, soit 1,5% de divergence par million d'années. Même si ces estimations sont peu précises, ces résultats démontrent que *T. bonjeani* existe depuis fort longtemps dans les cédraies algériennes, même si sa découverte fut récemment au Belezma en 1982 (Démolin, 1988). Les temps de divergence entre cédraies sont compatibles avec des événements survenus au Quaternaire récent, et sont probablement à mettre en lien avec les oscillations climatiques. L'isolement des populations de *T. bonjeani* dans les différentes cédraies pourrait dater de la dernière glaciation, et par conséquent la différenciation avec les populations marocaine sera plus ancienne avec des haplotypes plus différenciés.

Comparativement pour les populations de *T. pinivora*, un seul haplotype majoritaire a été trouvé, et aucune structuration phylogéographique n'a été enregistrée sur l'ensemble de son aire de pullulation en Europe (Cassel-Lundhagen *et al.*, 2013 ; Hódar *et al.*, 2016).

La distribution dans l'espace de la diversité génétique actuelle des espèces est fortement influencée par son histoire, et en particulier par l'impact des cycles glaciaires du Quaternaire (Hewitt, 2000 ; Hewitt, 2004). Les zones refuges sont habituellement considérées comme des zones où la diversité génétique est importante, et la diversité ancestrale y est conservée (Hewitt, 1996 ; Taberlet *et al.*, 1998). La région méditerranéenne a connu une importante et complexe zone de refuges pendant les périodes froides du Pléistocène, et par conséquent, la diversité génétique des espèces est exceptionnellement élevée (Fady, 2005 ; Petit *et al.*, 2005 ; Fady et Conord, 2010). Il a été démontré grâce aux données de pollen et macrofossile que *C. atlantica*, l'hôte de *T. bonjeani*, était bien présent en Afrique du nord (Algérie, Maroc et Tunisie) pendant le dernier maximum glaciaire (il y a 41 000-16 000 ans) (Ben Tiba et Reille 1982 ; Salamani, 1993 ; Demarteau *et al.*, 2007 ; Cheddadi *et al.*, 2009). Demarteau *et al.* (2007) ont montré que le cèdre de l'Atlas a atteint son aire optimale dans le dernier maximum glacial, (vers -24 000 ans), puis a régressé à la fin du Pléniglaciaire supérieur (vers -

20.000 à -15.000 ans), alors qu'à partir de l'aire Holocène et plus précisément l'Atlantique (vers -8.000 à -4.700 ans) le cèdre de l'Atlas a cédé la place au chêne vert en basse altitude, et complètement disparu en Tunisie où la majorité des sommets culminent à moins de 1500 m avant d'occuper l'aire qu'on lui connaît aujourd'hui. En effet, les résultats de l'analyse d'aire de distribution par le modèle *MaxEnt* pour *C. atlantica* montrent que, au cours des périodes de glaciation maximale (-21 000 ans), le cèdre de l'Atlas avait la possibilité de se développer sur une aire très étendue couvrant tout le nord du Maghreb (Algérie et Maroc). Si actuellement, il ne pousse plus de cèdres dans ces endroits, il est intéressant de constater que cette espèce est potentiellement viable dans ces montagnes.

Contrairement à son hôte, *T. bonjeani* occupait des aires limitées et discontinues, et à plus basses altitudes qu'actuellement, avec l'absence de zones de sympatrie entre les trois groupes de populations (Aurès, Djurdjura et Ouarsenis). Cet isolement reproductif aurait pu permettre une évolution indépendante, une divergence de ces populations et l'apparition des lignées distinctes avec de nouveaux haplotypes.

## **CONCLUSIONS GÉNÉRALES**

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Sur la base des prospections conduites dans les diverses cédraies algériennes, la processionnaire du cèdre, *Thaumetopoea bonjeani* présente une large répartition. L'espèce vit sympatriquement avec la processionnaire d'hiver *Thaumetopoea pityocampa* et parfois partagent le même arbre hôte. *T. bonjeani* se manifeste d'une façon cyclique et périodique par des défoliations massives dans divers cédraies. Les prospections et les investigations menées depuis l'année 2013 confirment la phase de culmination de la population dans la cédraie de Tala-Guilef (Djurdjura). L'étude menée dans les peuplements forestiers de Parc National du Djurdjura a mis en évidence les principaux aspects écologiques, biologiques et génétiques du défoliateur ainsi que les facteurs de sa dynamique de population.

L'étude pluriannuelle sur la chronologie de développement de *T. bonjeani* dans les sites prospectés nous a permis d'élucider les différentes phases de cycle de développement de l'insecte. *T. bonjeani* est une espèce univoltine. Le vol des adultes s'effectue du mois d'août à septembre. Le maximum des émergences est enregistré au cours de la première semaine de septembre. Les œufs pondus sous forme d'un manchon caractéristique sont décelés le jour même de l'émergence des adultes. L'examen des pontes nous a permis de tirer des informations sur la fécondité de l'espèce. Les comptages effectués des œufs ont révélés des valeurs moyennes de 157 à 177 œufs par ponte respectivement, pour la cédraie de reboisement et la cédraie naturelle.

Les premières éclosions se sont manifestées vers la fin du mois de mars et se sont échelonnées jusqu'à la première semaine du mois de mai. Le développement larvaire s'effectue entre la fin du mois de mars et la fin de juillet. La durée de développement larvaire est de trois mois en moyenne. La durée moyenne de premier stade est de 20 jours, de 17 jours respectivement pour le deuxième et le troisième stade, de 16 et 15 jours respectivement pour le quatrième et cinquième stade. La chronologie des départs en processions de nymphose a été notée à la première décade de juin et s'est échelonnée jusqu'à la dernière décade de juillet. L'étude du stade nymphal a permis de déduire la durée de la variabilité de la phase hypogée de 47 à 95 jours. Sur les populations suivies, aucun prolongement de diapause n'a été noté.

Une diversité d'insectes auxiliaires prédateurs et parasitoïdes identifiés, joue un rôle important dans la régulation des populations de *T. bonjeani* au cours des différentes

phases de son développement. Le cortège de ces ennemis naturels varie selon les régions et les années. Les parasitoïdes *Ooencyrtus pityocampae*, *Baryscapus servadeii*, *Trichogramma embryophagum* et *Chartocerus* sp. ont été recensés sur les œufs de *T. bonjeani*. L'espèce Hyperparasitoïde, *Chartocerus* sp. a été signalée pour la première fois sur les œufs du genre *Thaumetopoea*. L'espèce *O. pityocampae* est le parasitoïde le plus actif et le plus dominant qui a un impact conséquent dans la régulation naturelle des populations de *T. bonjeani* au stade embryonnaire. Les adultes d'*O. pityocampae* ont émergé en deux vagues, une en automne, et la seconde vague a lieu à partir du printemps de l'année suivante.

Les émergences de parasitoïde *O. pityocampae* de la première génération ont été notées entre les mois de septembre et d'octobre. Pour la seconde génération diapausante, les émergences ont été notées entre les mois de mai et juillet. Il apparaît donc que la période de vol de la génération diapausante de parasitoïde polyphage, *O. pityocampae* est en parfaite synchronisation avec l'apparition des papillons de l'espèce *T. pityocampa* évoluant sur cèdre. Cette stratégie d'occupation reste très discutable et mérite plus d'investigation pour tirer plus d'informations fiables sur la dynamique de cet axillaire utile.

La régulation naturelle des populations larvo-nymphal de la processionnaire du cèdre est assurée par un cortège d'axillaires de parasitoïdes, de prédateurs et d'entomopathogènes. Une diversité de quatre espèces Tachinaires ont été identifiées pour la première fois : *Exorista segregata*, *Compsilura concinnata*, *Pales processionea* et *Drinos* sp. A cela s'ajoute l'espèce d'Hyménoptère Braconide, *Heterospilus* sp. qui a été identifiée uniquement dans la cédraie artificielle. L'espèce *C. concinnata* est l'antagoniste le plus actif du stade hypogé de *T. bonjeani*.

L'inventaire des prédateurs des stades larvo-nymphal fait ressortir la présence de 6 espèces, identifiées pour la première fois ; 4 espèces de Coléoptères, *Calosoma sycophanta*, *Ocypus olens*, *Hister thoracicus*, *Dermestes* sp. et 2 espèces d'Hétéroptères, *Sphedanolestes sanguineus*, *Barchyletes* sp.

Parmi les prédateur, *C. sycophanta* est le prédateur le plus actif qui réduit considérablement l'effectif des populations de *T. bonjeani* des deux derniers stades larvaires et de stade nymphal. Ce prédateur a été déjà observé comme principal régulateur des populations larvaires du bombyx disparate, *Lymantria dispar*.



L'histoire évolutive de *T. bonjeani* en associant deux approches complémentaires modernes, la phylogéographie et la modélisation d'aires de distribution, a été retracée pour mieux comprendre les forces évolutives et les contraintes historiques qui ont influencé la distribution géographique et la structuration génétique actuelle de cet insecte dans les cédraies en Algérie. Les approches de modélisation nous ont permis de réaliser des prédictions sur l'évolution possible de la distribution de l'espèce face aux changements climatiques en cours.

Les résultats de modélisation montrent que les habitats actuellement favorables à *T. bonjeani* sont principalement localisées dans les hautes altitudes de l'Atlas Saharien et de l'Atlas Tellien. Au Maroc, le Moyen Atlas et le Haut Atlas constituent les endroits où l'aire potentielle de l'espèce est la plus favorable. Pour les projections futures (période de 2050 et 2070), les modèles proposés prédisent une régression importante des aires actuellement favorables à l'espèce *T. bonjeani*.

Les populations de *T. bonjeani* se structurent en trois haplo-groupes dont un regroupe les populations des Aurès. Le deuxième haplo-groupe, regroupe toutes les populations du Djurdjura. Le troisième haplo-groupe est restreint à la population de l'Ouarsenis. Aucun haplotype commun n'a été noté entre les trois haplo-groupes. Tous les haplotypes déduits sont endémiques d'un site d'échantillonnage ou d'une région. La diversité haplotypique est très hétérogène entre les populations. La plus grande diversité génétique a été enregistrée chez les populations des Aurès. Cette variation génétique observée est expliquée par la variation inter-régionale, montrant ainsi une forte structuration géographique des populations.

Un complément des données avec un marqueur nucléaire permettrait de mieux appréhender les interactions génétiques entre les populations, ce qui permet d'observer des structurations à une échelle plus fine. Il serait intéressant d'étudier plus particulièrement les populations de *T. bonjeani* du Maroc pour mieux comprendre la structuration des populations dans l'ensemble de son aire de répartition.

L'importance des pullulations de *T. bonjeani* ces dernières années à Tala-Guilef, mérite une attention plus particulière sur son évolution et sa cartographie afin de gérer au mieux des interventions dans ces biotopes fragiles.

## **RÉFÈRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## RÉFÈRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abdessemed K. (1981). Le Cèdre de l'Atlas dans les massifs de l'Aurès et du Belezma - Étude phytosociologique et problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse Doct. Ing. Fac. St. Jérôme, Marseille, France, 199 p.
2. Agenjo R. (1941). Monographie de la famille des Thaumetopoeidae (Lep.). *Eos*, 171 : 69-128.
3. Arnaldo P. S., Chacim S., & Lopes D. (2010). Effects of defoliation by the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* on biomass growth of young stands of *Pinus pinaster* in northern Portugal. *iForest*, 3: 159-162.
4. Auger-Rozenberg M. A., Torres-Leguizamon M., Courtin C, Rossi J. P., & Kerdelhué C. (2015). Incongruent evolutionary histories of two parasitoids in the Mediterranean Basin: influence of host specialization and ecological characteristics. *Journal of Biogeography*, 42: 1040-1051.
5. Aussenac G., Granier A., et Gross P. (1981). Etude de la croissance en hauteur du Cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti) Utilisation d'un appareillage de mesure automatique. In *Annales des Sciences Forestières* (Vol. 38, No. 3, pp. 301-316). EDP Sciences.
6. Avcı M. (2003). Parasitism of egg-batches of the cedar processionary moth *Traumatocampa ispartaensis* in Turkey. *Phytoparasitica*, 31: 118-123.
7. Avcı M., & Carus S. 2005. The impact of cedar processionary moth [*Traumatocampa ispartaensis* (Doganlar & Avcı) (Lepidoptera: Notodontidae)] outbreaks on radial growth of Lebanon cedar (*Cedrus libani* A. Rich.) trees in Turkey. *J Pest Sci*, 78: 91-98.
8. Avcı M., & Kara K. (2002). Tachinidae parasitoids of *Traumatocampa ispartaensis* from Turkey. *Phytoparasitica*, 30(4) : 361-364.
9. Avise J. C. 1998. The history and purview of phylogeography: a personal reflection. *Molecular Ecology*, 7: 371-379.
10. Avise J. C., Neigel J. E. & Arnold J. (1984). Demographic influences on mitochondrial DNA lineage survivorship in animal populations. *Journal of Molecular Evolution*, 20: 99-105.
11. Avise J. C., Arnold J., Ball R. M., Bermingham E., Lamb T., Neigel J. E., Reeb C. A. & Saunders N. C. (1987). Intraspecific phylogeography: the mitochondrial DNA

bridge between population genetics and systematics. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18: 489-522.

12. Avise J. C. (2000). Phylogeography: the history and formation of species. *Harvard University Press*, Cambridge, MA (USA), 447 p.
13. Baldwin, R. A. (2009). Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy*, 11(4), 854-866.
14. Bariteau M., et Ferrandes P. (1992). Les cèdres, in : Amélioration des espèces végétales cultivées, Objectifs et critères de sélection. Ouvrage collectif coordonné par A. Gallais et H. Bannerot. Institut National de la recherche Agronomique. Paris. Pp : 732-743.
15. Battisti A. (1989). Field studies on the behavior of two egg parasitoids of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa*. *Entomophaga*, 34: 29-38.
16. Battisti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques, A., & Larsson S. (2005). Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological applications*, 15(6) : 2084-2096.
17. Battisti A., Holm G., Fagrell B., et Larsson S. (2011). Urticating hairs in arthropods: Their nature and medical significance. *Annual Review of Entomology*, 56: 203-220.
18. Battisti A., Avcı M., Avtzi D. N., Ben Jamaa M. L., Berardi L., Berretima W., ... Zamoum M. (2015). Natural history of the processionary moths (*Thaumetopoea* spp.): new insights in relation to climate change. In A. Roques (Ed.), *Processionary Moths and Climate Change: An Update* (pp. 15-80). Dordrecht-Versailles : Springer-Quae.
19. Bellin S., Schmidt G. H., & Douma-Petridou E. 1990. Structure, ooparasitoid spectrum and rate of parasitism of egg-batches of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.)(Lep., Thaumetopoeidae) in Greece. *Journal of Applied Entomology*, 110(1-5) : 113-120.
20. Bensasson D., Zhang, D. X., Hartl, D. L. & Hewitt, G. M. 2001. Mitochondrial pseudogenes: evolution's misplaced witnesses. *Trends in ecology & evolution*, 16(6) : 314-321.
21. Benabid A. (1993). Biogéographie phytosociologie et phytodynamique des cédraies de l'Atlas *Cedrus atlantica* (Manetti). *Silva Méditerranéenne Actes du séminaire International sur le cèdre de l'Atlas*. Ifran (Maroc). 7-11 juin 1993. Pp : 62-69.

22. Benhalima S. (2004). Les insectes xylophages et leur rôle dans le dépérissement du Cèdre de l'Atlas *Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière dans le Haut et le Moyen Atlas (Maroc). Thèse Doc. Univ. Moh. V- Agdal, Rabat, Maroc, 107 p.
23. Bentouati A., et Oudjehih B. (1999). Premières études de la croissance et de la Productivité du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif de Belezma (Aurès-Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, t. XX, (2) : 115-119.
24. Berryman A. A. (1976). Theoretical explanation of mountain pine beetle dynamics in lodgepole pine forests. *Environmental Entomology*, 5 (6) : 1225-1233.
25. Bertheau C., Schuler H., Krumböck S., Arthofer W., & Stauffer C. (2011). Hit or miss in phylogeographic analyses: the case of the cryptic NUMTs. *Molecular Ecology Resources*, 11: 1056-1059.
26. Bertheau C., Salle A., Roux-Morabito G., Garcia J., Certain G., & Lieutier F. (2009). Preference-performance relationship and influence of plant relatedness on host use by *Pityogenes chalcographus* L. *Agricultural and Forest Entomology*, 11 : 389-396.
27. Biliotti E. (1958). Les parasites et prédateurs de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. (Lepidoptera). *BioControl*, 3(1) : 23-34.
28. Biliotti E., Démolin G., & Ham R. (1964). Entomologie-caractères de la diapause nymphale chez *Thaumetopoea pityocampa* schiff. *Comptes rendus hebdomadaires des seances de l academie des sciences*, 258(2) : 706.
29. Boudy P. (1952). Guide du forestier en Afrique du Nord. Les essences Forestières. Edition la maison rustique, 505 p.
30. Boudy P. (1955). Economie forestière nord-africaine : Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. Éd. Larose, T (4), Paris, 483 p.
31. Bruchim Y., Ranen E., Saragusty J., et Aroch I. (2005). Severe tongue necrosis associated with pine processionary moth (*Thaumetopoea wilkinsoni*) ingestion in three dogs. *Toxicon*, 45(4) : 443-447.
32. Cadahia C. & Torres M. (1975). L'analyse de la seve comme index de l'effet du bore dans la nutrition de la plante. *Le Contrôle de L'alimentation Des Plantes Cultivées : Questions générales et méthodologie. Plantes céréalières, fourragères, industrielles. Cultures maraîchères, ornementales, forestières. Cultures méditerranéennes, subtropicales*, 1 : 37.

33. Cassel-Lundhagen A., Ronnås C., Battisti A., Wallen J. & Larsson S. (2013). Stepping-stone expansion and habitat loss explain a peculiar genetic structure and distribution of a forest insect. *Molecular Ecology*, 22: 3362-3375.
34. Caterino M. S., Cho S. & Sperling F. A. H. (2000). The current state of insect molecular systematics: a thriving tower of Babel. *Annual Review of Entomology*, 45: 1-54.
35. Chakali G. (2005). L'Hylésine des Pins, *Tomicus destruens* Wollaston 1865 (Coleoptera-Scolytidae) en Zone Semi-Aride (Algérie). *Silva Lusitana*, 13(1) : 113-124.
36. Cheddadi R., Fady B., François L., Hajar L., Suc J. P., Hunag K., Dermarteanu M., Vendramin G. G. & Ortu E. (2009). Putative glacial refugia of *Cedrus atlantica* deduced from Quaternary pollen records and modern genetic diversity. *Journal of Biogeography*, 36(7): 1361–1371.
37. Clement M., Posada D., & Crandall K. A. (2000). TCS: a computer program to estimate gene genealogies. *Molecular Ecology*, 9: 1657–1659.
38. D'Amato M. E., & Carvalho G. R. (2005). Population genetic structure and history of the long-tailed hake, *Macrurus magellanicus*, in the SW Atlantic as revealed by mtDNA RFLP analysis. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 62(2): 247-255.
39. DeChaine, E. G., & Martin A. P. (2005). Historical biogeography of two alpine butterflies in the Rocky Mountains: broad-scale concordance and local-scale discordance. *Journal of Biogeography*, 32: 1943-1956.
40. Demarteanu M., François L., Cheddadi R., & Roche E. (2007). Responses of *Cedrus atlantica* when faced with past and future climatic changes. *Geo-Eco-Trop*, 31: 105-146.
41. Démolin, G., & Delmas J. C. (1967). Les éphippigères [Orthoptères Tettigoniidae] prédateurs occasionnels, mais importants de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. *Entomophaga*, 12(4) : 399-401.
42. Démolin G. (1969). Comportement des adultes de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Dispersion spatiale, importance écologique. In *Annales des Sciences Forestières* (Vol. 26, No. 1, pp. 81-102). EDP Sciences.
43. 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. Répercussion sur l'efficacité des parasites. *Annales de Zoologie, Ecologie Animale (HS)*, 33-56.

44. Démolin G. (1988). La processionnaire du cèdre : *Thaumetopoea bonjeani* (Powell). Rapport Scientifique et Rapport Iconographique - Intensification de la Protection Phytosanitaire des Forêts, Algérie 1986-1987. FAO Report, Rome, Italy.
45. Démolin G., Frerot B., Chambon J. P., & Martin J. C. (1994). Réflexions bio systématiques 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. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc (Morocco)*, no. 27 (spec. no.).
46. Derridj A. (1990). Etudes des populations de *Cedrus atlantica* M. en Algérie. Thèse Doc. Uni. Paul Sabatier. Toulouse, France, 122 p.
47. Dubuis A., & Faurel L. (1949). Essai sur la flore montagnarde du Djurdjura : endémisme et affinités floristiques. Trav. bot., dédiés à René Maire. *Mém. HS de la Soc. Hist. Nat. Afr. Nord*, 65-78.
48. Du Merle P. (1969). Le complexe parasitaire hypogé de *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. (Lepidoptera). *Boletín del Servicio de Plagas Forestales*, 13 : 131-132.
49. Du Merle P., & Mazet R. (1983). Stades phénologiques et infestation par *Tortrix viridana* L. (Lep., Tortricidae) des bourgeons du chêne pubescent et du chêne vert. *Acta Oecologica*, 4 : 47-53.
50. Du Merle P. (1988). Phenological resistance of oaks to the green oak leaf roller, *Tortrix viridana* (Lepidoptera: Tortricidae). In *Mechanisms of woody plant defenses against insects* (pp. 215-226). Springer New York.
51. Emberger L. (1938). Aperçu général sur la végétation du Maroc : commentaire de la carte phytogéographique du Maroc 1 : 1.500. 00. Huber.
52. Excoffier L., Smouse P. E., & Quattro J. M. (1992). Analysis of molecular variance inferred from metric among DNA haplotypes: application to human mitochondrial DNA restriction data. *Genetics*, 191: 479-491.
53. Excoffier L., Laval G. & Schneider S. (2005). Arlequin (version 3.0): an integrated software package for population genetics data analysis. *Evolutionary Bioinformatics Online*, 1: 47-50.
54. El Yousfi M. (1989). The cedar processionary moth, *Thaumetopoea bonjeani* (Powell). *Boletín de Sanidad Vegetal, Plagas*, 15: 43-56.

55. El Yousfi M. (1994). La santé du cèdre de l'atlas au Maroc. In O. M'hirit, A. Samih & M. Maiagnoux (Eds.), *Le cèdre de l'Atlas, Actes du séminaire international sur le cèdre de l'Atlas*. Annales de la recherche forestière au Maroc (pp. 594-611). Ifrane, Marocco.
56. Elith J., Phillips S. J., Hastie T., Dudík M., Chee Y. E., & Yates C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1): 43-57.
57. Farrell, B. D., Sequeira, A. S., O'Meara, B. C., Normark, B. B., Chung, J. H., & Jordal, B. H. (2001). The evolution of agriculture in beetles (Curculionidae: Scolytinae and Platypodinae). *Evolution*, 55(10), 2011-2027.
58. Ferrandes P. (1986). Cèdres : les programmes d'amélioration, résultats actuels et escomptés. *RFF*, 38 : 139-141.
59. Flandrin J. (1947). La chaîne du Djurdjura. Esquisse géologique et géographique. Guide de la montagne algérienne. 60 p.
60. Flandrin J. (1952). La chaîne du Djurdjura. Monographie régionale. 1<sup>ère</sup> série, Algérie, n°19, 49 pages + Carte géologique au 1/50.000.
61. Fraval A., Herard F., & Jarry M. 1978. Méthodes d'échantillonnages des populations de pontes de *L. dispar* (Lep.: Lymantriidae) en Mamora (Maroc). In *Annales de zoologie : Ecologie animale*.
62. Fredon D., Maumy- Bertrand M., Bertrand F. (2009). Mathématiques. Ed., Dunod, Paris, 157p.
63. Frerot B., Malosse C., Milat M. L., Demolin G., Martin, J. C., Khemici M., Zamoum M., & Gachi M. (1990). Chemical analysis of the sex pheromone glands of *Thaumetopoea bonjeani* (Powell) (Lep., Thaumetopoeidae). *Journal of Applied Entomology*, 109: 210-212.
64. Frérot B. & Démolin G. (1994). Sex pheromone of the processionary moths and biosystematics considerations within the genus *Thaumetopoea* (Thaumetopoeidae: Thaumetopoeinae). *Bollettino di Zoologia Agraria e di Bachicoltura, Ser. II* 25: 33-40.
65. Fu Y. X. (1997). Statistical tests of neutrality of mutations against population growth, hitchhiking and background selection. *Genetics*, 147(2): 915-925.
66. Fady B. (2005). Is there really more biodiversity in Mediterranean forest ecosystems? *Taxon*, 54: 905-910.



67. Fady B. & Conord C. (2010). Macroecological patterns of species and genetic diversity in vascular plants of the Mediterranean Basin. *Diversity and Distributions*, 16(1) : 53-64.
68. Gachi M., Khemici M., & Zamoum M. (1986). Note sur la présence en Algérie de la processionnaire du cèdre *T. bonjeani* Powell (Lepidoptera : Thaumetopoeidae). *Annales de la recherche forestière*, Algérie I : 53-63.
69. Gachi M. (1994). Note sur la présence en Algérie de la processionnaire du cèdre : *Thaumetopoea bonjeani* Powell (Lepidoptera ; Thaumetopoeidae). In O. M'herit, A. Samih & M. Maiagnoux (Eds.), *Le cèdre de l'Atlas, Actes du séminaire international sur le cèdre de l'Atlas*. Annales de la recherche forestière au Maroc (pp. 528-537). Ifrane, Morocco.
70. Gachi M., Demolin G., Khemici M., & Zamoum M. (2005). An evaluation of the radial growth losses of Atlas cedar following defoliation by *Thaumetopoea bonjeani* in the Belezma massif (Aurès, Algeria). In F. Lieutier & D. Ghaïoule (Eds.), *Entomological Research in Mediterranean Forest Ecosystems* (117–122). INRA Paris.
71. Guisan A., & Zimmermann N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, 135(2): 147-186.
72. Guisan A. & Thuiller W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8: 993-1009.
73. Gaussen H. (1967). Les gymnospermes actuelles et fossiles. *Les Taxodiacees. Trav. Lab. forest. Toulouse II, 1*.
74. Halperin J. (1983). *Thaumetopoea solitaria* Freyer (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) in Israel. *Phytoparasitica*, 11(2) : 71-82.
75. Halperin J. (1990). Life history of *Thaumetopoea* spp. (Lep., Thaumetopoeidae) in Israel. *Journal of Applied Entomology*, 110(1-5) : 1-6.
76. Hamra Kroua S. (1986). Note préliminaire sur les ennemis naturels de *Lymantria dispar* dans les forêts de chêne-liège du Nord Constantinois. *Ann. Inst. natl. Agron. (El Harrach)*, 10 : 26-44.
77. Haran J., Koutroumpa F., Magnoux E., Roques A., & Roux G. (2015). Ghost mtDNA haplotypes generated by fortuitous NUMTs can deeply disturb infra-specific genetic diversity and phylogeographic pattern. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 53: 109-115.

78. Harrison R. G. (1989). Animal mitochondrial DNA as a genetic marker in population and evolutionary biology. *Trends in Ecology & Evolution*, 4: 6-11.
79. Hebertson E.G. & Jenkins M.J. (2008). Climate factors associated with historic spruce beetle (Coleoptera : Curculionidae) outbreaks in Utah and Colorado. *Environmental Entomology*, 37 : 281-292.
80. Hellmann J. J., Pelini, S. L., Prior K. M., & Dzurisin J.D.K. (2008). The response of two butterfly species to climatic variation at the edge of their range and the implications for poleward range shifts. *Oecologia*, 157 : 583-592.
81. Hernandez P. A., Graham C. H., Master L. L., & Albert D. L. (2006). The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, 29 (5): 773-85.
82. Herring B., & Dely-Draskovits A. (1993). Family Tachinidae. in : Soos, A. and Papp, L. [Eds.] Catalogue of Palaearctic Diptera. Anthomyiidae -Tachinidae. Vol. 13, pp. 118-458. Typesetting Pars Ltd., Budapest, Hungary.
83. Hewitt G. M. (1996). Some genetic consequences of ice ages, and their role in divergence and speciation. *Biological Journal of the Linnean Society*, 58: 247-276.
84. Hewitt G. M. (1999). Post-glacial re-colonization of European biota. *Biological Journal of the Linnean Society*, 68: 87-112.
85. Hewitt G. M. (2000). The genetic legacy of the quaternary ice ages. *Nature*, 405: 907-913.
86. Hewitt G. M. (2001). Speciation, hybrid zone and phylogeography - or seeing genes in space and time. *Molecular Ecology*, 10: 537-549.
87. Hewitt G. M. (2004). Genetic consequences of climatic oscillations in the Quaternary. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Biology*, 359: 183-195.
88. Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L., Jones P. G. & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965-1978.
89. Hijmans R. J., & Graham C. H. (2006). The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global change biology*, 12(12): 2272-2281

90. Hódar J.A., Cassel-Lundhagen A., Battisti A., & Larsson S. (2016). A little further south: host range and genetics of the northern pine processionary moth, *Thaumetopoea pinivora* (Lepidoptera: Notodontidae) at the southern edge of its distribution. *European Journal of Entomology*, 113, in press, doi:10.14411/eje.2016.proof.
91. Holsinger K. E. (2010). Tajima's D, Fu's FS, Fay and Wu's H, and Zeng *et al.*'s E. <http://darwin.eeb.uconn.edu/eeb348/lecturenotes/molevol-tajima.pdf>.
92. Jacquet J. S., Orazio C., & Jactel H. (2012). Defoliation by processionary moth significantly reduces tree growth: a quantitative review. *Annals of Forest Science*, 69: 857–866.
93. Ipekdağ K., Burban C., Kerdelhue C., & Çağlar S. S. (2015). Distribution of two pine processionary moth species in Turkey evidences a contact zone. *Turkish Journal of Zoology*, 39(5) : 868-876.
94. Jacquet J. S., Bosc A., O'Grady A. P., & Jactel, H. (2013). Pine growth response to processionary moth defoliation across a 40-year chronosequence. *Forest ecology and management*, 293 : 29-38.
95. Karafyllidis I. (1998). A model for the influence of the greenhouse effect on insect and microorganism geographical distribution and population dynamics. *Biosystems*, 45: 1-10.
96. Kerdelhué C., & Rasplus J.-Y. (2002). Le séquençage des acides nucléiques et les méthodes d'analyse des données moléculaires en phylogénie. *Mémoires de la SEF 6* : 97-122.
97. 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(1) : 220.
98. Khai Tran J., Ylioja T., Billings R.F., Regniere J., & Ayres M.P. (2007). Impact of minimum winter temperatures on the population dynamics of *Dendroctonus frontalis*. *Ecological Applications*, 17 : 882-899.
99. Koffi K. J., Boyemba F., Ndjele M., Mate M., Robbrecht E., Lejoly J., & Bogaert J. (2008). La distribution spatiale des Acanthaceae dans les secteurs phytogéographiques de Ndjele (1988) en R.D. Congo. *Annales de la Faculté des Sciences de Kisangani*, 13: 1-8.

100. Khouss M. G. (1993). Contribution à l'étude de l'écobiologie et du contrôle naturel du *Lymantria dispar* (L) (Lepidoptera; Lymantriidae) en chênaie verte du Djurdjura (Tikjda). Thèse de Mag., Un. Houari Boumediène, 110 p.
101. Krouchi F. (2010). Étude de la diversité de l'organisation reproductive et de la structure génétique du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) en peuplement naturel (Tala-guilef, Djurdjura nord-ouest, Algérie). Thèse Doc. Un., Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 154p.
102. Kumar S., & Stohlgren T. J. (2009). Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and natural Environment*, 1(4): 094-098.
103. Lanier L. (1976). Mycologie et pathologie forestières. Tome II. Pathologie forestière. Edition Masson. Paris. Pp : 16-26.
104. Lapie G. (1909). *Étude phytogéographique de la Kabylie du Djurdjura*. Delagrave.
105. Le Houérou H. N., et Hoste, C. H. (1977). Rangeland production and annual rainfall relations in the Mediterranean Basin and in the African Sahelo-Sudanian zone. *Journal of Range Management*, 181-189.
106. Librado P. & Rozas J. (2009). DnaSP v5: a software for comprehensive analysis of DNA polymorphism data. *Bioinformatics*, 25(11): 1451-1452.
107. Linares J. C., Senhadj, 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. *Forest Ecology and Management*, 315 : 129-137.
108. Loxdale H. D. & Lushai G. (1998). Molecular markers in entomology. *Bulletin of Entomological Research*, 88: 577-600.
109. Lunt D. H., Zhang D.-X., Szymura J. M., & Hewitt G. M. (1996). The insect cytochrome oxidase I gene: evolutionary patterns and conserved primers for phylogenetic studies. *Insect Molecular Biology*, 5: 153-165.
110. Maire R., & Viollette M. (1926). Carte phytogéographique de l'Algérie et de la Tunisie.
111. Martinat, P.J. (1987). The role of climatic variation and weather in forest insect outbreaks. In *Insect outbreaks*. Edited by P. Barbosa and J.C. Shultz. Academic Press Inc., San Diego, PP. 241-268.

112. Masutti L. (1964). Ricerche sui parassiti oofagi della *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. *Ann. Centro Econ. Mont. Ven*, 4 : 205-271.
113. McCarty J.P. (2001). Ecological consequences of recent climate change. *Conservation Biology*, 15 : 320-331.
114. Mecellem D., & Chakali G. (2014). Les prédateurs des pontes du bombyx disparate, *Lymantria dispar* L. 1758 (Lepidoptera : Lymantriidae) en phase de pullulation dans les peuplements du massif forestier blidéen (Algérie). *Lebanese Science Journal*, 15(2) ; 107.
115. Meddour R. (1994). Cédraies de l'Atlas Blidéen, bioclimatologie, syntaxonomie et dynamique. Séminaire sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc, 7-11 juin 1993). *Ann. Rech. For. Maroc.*, 27(numéro spécial), Vol.1. Edité par M'Hirit, O., Samih, A. et Malagnoux, M. pp : 106-127.
116. Meddour R. (2010). Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie, exemple des groupements forestiers et préforestiers de la Kabylie Djurdjurenne. Thèse Doc., Un., Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 461p.
117. M'hirit O. (1982). Etude écologique et forestière des cédraies du Rif marocain ; essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la productivité du cèdre (*Cedrus Atlantica* Manetti).
118. M'hirit O. (1994). Croissance et productivité du cèdre : approche multidimensionnelle de l'étude des liaisons stations productions. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc (Morocco)*. no. 27 (spec. no.).
119. M'hirit O. et Benziane M. (2006). Le cèdre de l'Atlas : Mémoire du temps. *Edition Mardaga*, Sprimont-Belgique.
120. Mirchev P., Dautbašić M., Mujezinović O., Georgiev G., Georgieva M., & Boyadzhiev P. (2015). Structure of Egg Batches, Hatching Rate and Egg Parasitoids of the Pine Processionary Moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Denis and Schiffermüller, 1775) (Lepidoptera : Notodontidae), in Bosnia and Herzegovina. *Acta Zool. Bulg.*, 67 (4) : 579-586.
121. Mokhles A. (1990). 6<sup>ème</sup> contribution à la connaissance des Lépidoptères du Maroc. Observations sur trois élevages de *Thaumetopoea bonjeani* (Powell, 1922). *Shilap Revista de Lepidopterologia*, 18: 89-91.
122. Moneo I., Battisti A., Dufour B., Garcia-Ortiz C., Gonzalez-Munoz M., Moutou F., ... Vega J. (2015). Natural history of the processionary moths (*Thaumetopoea* spp.):

new insights in relation to climate change. In A. Roques (Ed.), *Processionary Moths and Climate Change: An Update* (pp. 15-80). Dordrecht-Versailles : Springer-Quae.

123. Montoya R., & Robredo F. (1972). *Thaumetopoea pinivora* Tr., la procesionaria de verano. *Boletín Estación Central Ecología*, 1 : 43-56.
124. Moore B. A., & Allard G. B. (2008). Climate change impacts on forest health. Forest Health & Biosecurity Working Papers. FAO. *Food and Agriculture Organization, Rome*.
125. Morandini R., et Mercurio R. (1990). Atlas Cedar (*Cedrus atlantica* M.) in Italy. In *actes du Symposium International sur le cèdre*. Antalya, Turquie.
126. Mouna M. (2012). Les insectes du cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le Nord de l'Afrique. Travaux de l'Institut Scientifique, *Série Zoologie*, n° 48, 1-81.
127. Myers J. H. (2000). Population fluctuations of the western tent caterpillar in southwestern British Columbia. *Population Ecology*, 42: 231-241.
128. Nasr J., Hammad E. A. F., Demolin G., & Nemer N. (2013). Egg mass Structure and Parasitism of *Thaumetopoea wilkinsoni* (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) in Lebanon. *Advances in Crop Science and Technology*, 1 :3.
129. Nejahi A. (1988). La cédraie de chréa (Atlas blideen) phénologie, productivité, rebéération. Thèse Doct. Université de Nancy, p 173.
130. Nei M. & Tajima F. (1981). DNA polymorphism detectable by restriction endonucleases. *Genetics*, 97(1): 145-163.
131. Nei M. (1987). *Molecular evolutionary genetics*. Columbia university press.
132. Parmesan C., Ryrholm N., Stefanescu C., Hill J.K., Thomas C.D., Descimon H., Huntley B., Kaila L., Kullberg J., Tammaru T., Tennent W.J., Thomas J.A., & Warren M. (1999). Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 399 : 579-583.
133. Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 37 : 637-669.
134. Panetsos K. P., Christou A., & Scaltsoyiannes A. (1992). First analysis on allozyme variation in Cedar species (*Cedrus* sp.). *Silvae Genetica*, 41 (6) : 339-342.

135. Pearson R. G., & Dawson T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global ecology and biogeography*, 12(5): 361-371.
136. Peterson A.T. (2003). Predicting the geography of species invasions via ecological niche modeling. *The Quarterly Review of Biology*, 78: 419-433.
137. Martínez-Meyer, E., Townsend Peterson, A., & Hargrove, W. W. (2004). Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for Pleistocene extinctions and climate change projections for biodiversity. *Global Ecology and Biogeography*, 13(4) : 305-314.
138. Petit R. J., Hampe A., & Cheddadi R. (2005). Climate changes and tree phylogeography in the Mediterranean. *Taxon*, 54: 877-885.
139. Phillips S. J., Anderson R. P., & Schapire R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3) : 231-259.
140. Poyry J., Luoto M., Heikkinen R.K., Kuussaari M., & Saarinen K. (2009). Species traits explain recent range shifts of *Finnish butterflies*. *Global Change Biology*, 15 : 732-743.
141. Putod R. (1979). Le cèdre de l'Atlas en France. Bull. de vulgarisation For. Août-Sept, 1-75.
142. Questienne P., Miermont Y. (1978). Contribution à la connaissance *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. Etude de la chenille processionnaire du pin et du cèdre au Maroc. *Ann. Rev. For. Maroc*, mai 1978. 151-233.
143. Quézel P. (1957). Peuplement végétal des hautes montagnes de l'Afrique du Nord.
144. Quézel P., & Santa S. (1962). Nouvelle Flore de l'Algérie 1. *Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris*.
145. Quezel P. (1976). Les forêts du pourtour méditerranéen. In Forêts et maquis méditerranéens : écologie, conservation et aménagement. Note technique MAB, 2. Pp : 9-33. UNESCO, Paris.
146. Quezel P. (1980). Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen. In « Actualités d'Ecologie forestière », collection éditée par Pesson. Masson, Paris, pp. : 205-256.
147. Rahim, N., Chakali, G., Berretima, W., & Battisti, A. (2015). Natural History of the Cedar Processionary Moth, *Thaumetopoea bonjeani*. In A. Roques (Ed.),

*Processionary Moths and Climate Change: An Update* (pp. 47-48). Dordrecht-Versailles: Springer-Quae.

148. Rebelo H. & Jones G. (2010). Ground validation of presence-only modelling with rare species: a case study on barbastelles *Barbastella barbastellus* (Chiroptera: Vespertilionidae). *Journal of Applied Ecology*, 47(2): 410-420.
149. Roche E. (2006). Palynologie de la région méditerranéenne. Université de Liège. Notes de cours, inédit.
150. Robinet C., Baier P., Pennerstorfer J., Schop, A., & Roques A. (2007). Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France. *Global Ecology and Biogeography*, 16(4) : 460-471.
151. Roderick G. K. (1996). Geographic structure of insect populations: gene flow, phylogeography, and their uses. *Annual Review of Entomology*, 41: 325-352.
152. Rousselet J., Zhao R., Argal D., Simonato M., Battisti A., Roques A., & Kerdelhué C. (2010). The role of topography in structuring the demographic history of the pine processionary moth, *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera: Notodontidae). *Journal of Biogeography*, 37(8) : 1478-1490.
153. Saiki R. K., Gelfand D. H., Stoffei S., Scharf S. J., Higuchi R., Horn G. T., Mullis K. B. & Erlich H. A. (1988). Primer-directed enzymatic amplification of DNA with a thermostable DNA polymerase. *Science*, 239: 487-491.
154. Saiki R. K., Scharf S., Faloona F., Mullis K. B., Horn G. T., Erlich H. A. & Arnheim N. (1985). Enzymatic amplification of  $\beta$ -globin genomic sequences and restriction site analysis for diagnosis of sickle cell anemia. *Science*, 230: 1350-1354.
155. Sanger F., Nicklen S. & Coulson A. R. (1977). DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. *Proceedings of the National Academy of Science, USA* 74: 5463-5467.
156. Sbabdji M., El Hadi O., Haddad A., Kadik B., & Lambs, L. (2009). Cedar tree growth (*Cedrus atlantica* Manetti) in chréa national park, algeria, and the influence of defoliation by the pine processionary caterpillar (*Thaumetopoea pityocampa* SCHIFF.). *Revue d'écologie*, 64(4) : 323-332.
157. Sbabdji M., & Kadik B. (2011). Effects of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) defoliation on performance of the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*). *Journal of Pest Science*, 84(2) : 213-217.



158. Schmidt H., Mirchev P., & Tsankov G. (1997). The egg parasitoids of *Thaumetopoea pityocampa* in the atlas Mountains near Marrakech (Morocco). *Phytoparasitica*, 25(4) : 275-281.
159. Sebti S. (2011). Caractéristiques biologiques et écologiques de la processionnaire, *Thaumetopoea pityocampa* Schiff (Lepidoptera : Thaumetopoeidae) sur le cèdre de l'atlas *Cedrus atlantica* Manetti dans le parc national de Chrea. Thèse Mag., Un., Saad Dahlab, Blida, 128 p.
160. Sebti S. (2015). Recherche écologique et répartition spatio-temporelle de la processionnaire *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. dans la région de l'Atlas blideen. Thèse Doc. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, El Harrach, 107 p.
161. Suárez-Seoane S., De La Morena, E. L. G., Prieto M. B. M., Osborne P. E. & De Juana E. (2008). Maximum entropy niche-based modelling of seasonal changes in little bustard (*Tetrax tetrax*) distribution. *Ecological modelling*, 219(1): 17-29.
162. Sunnucks P. (2000). Efficient genetic markers for population biology. *Trends in Ecology & Evolution*, 15: 199-203.
163. Swets J. A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240: 1285-1293.
164. Simonato M., Battisti A., Kerdelhué C., Burban C., Lopez-Vaamonde C., Pivotto I., Salvato P. et Negrisolo N. (2013). Host and phenology shifts in the evolution of the social moth genus *Thaumetopoea*. *PLOS ONE*, 8 (2): e57192.
165. Simonsen K. L., Churchill G. A., & Aquadro C. F. (1995). Properties of statistical tests of neutrality for DNA polymorphism data. *Genetics*, 141: 413-429.
166. Salamani M. (1993). Premières données paléo-phytogéographiques du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) dans la région de Grande Kabylie (NE Algérie). *Palynosciences*, 2: 147-155.
167. Sætersdal M., Birks H. J., & Peglar S. (1998). Predicting changes in Fennoscandian vascular-plant species richness as a result of future climatic change. *Journal of Biogeography*, 25(1): 111-112.
168. Simon C., Frati F., Beckenbach A., Crespi B., Liu H., & Flook P. (1994). Evolution, weighting, and phylogenetic utility of mitochondrial gene sequences and a compilation of conserved polymerase chain reaction primers. *Annals of the entomological Society of America*, 87(6) : 651-701.

169. Tanzen E., & Schmidt G. H. (1995). Identification by meconia of four species of egg parasitoids of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Insecta, Lepidoptera, Thaumetopoeidae). *Bollettino di Zoologia agraria e di Bachicoltura*, 27 : 61-70.
170. Taberlet P., Fumagalli L., Wust-Saucy A. G., & Cosson J. F. (1998). Comparative phylogeography and postglacial colonization routes in Europe. *Molecular Ecology*, 7: 453-464.
171. Tajima F. (1989). Statistical method for testing the neutral mutation hypothesis. *Genetics*, 123: 585-595.
172. Tamura K., Stecher G., Peterson D., Filipiński A., & Kumar S. (2013). MEGA6: molecular evolutionary genetics analysis version 6.0. *Molecular biology and evolution*, 30(12): 2725-2729.
173. Terrab A., Hampe A., Lepais O., Talavera S., Vela E., & Stuessy T. F. (2008). Phylogeography of North African Atlas cedar (*Cedrus atlantica*, Pinaceae): combined molecular and fossil data reveal a complex Quaternary history. *American journal of botany*, 95(10): 1262-1269.
174. Templeton A. R., Crandall K. A., & Sing C. F. (1992). A cladistic analysis of phenotypic associations with haplotypes inferred from restriction endonuclease mapping and DNA sequence data. III. Cladogram estimation. *Genetics*, 132(2): 619-633.
175. Thompson, J. D., Higgins D. G., & Gibson T. J. (1994). CLUSTAL W: improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucleic acids research*, 22 (22): 4673-4680.
176. Tiberi R. (1990). Egg parasitoids of the pine processionary caterpillar, *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Thaumetopoeidae) in Italy: distribution and activity in different areas. *Journal of applied entomology*, 110 (1-5) : 14-18.
177. Toth J. (1970). Plus que centenaire et plein d'avenir : Le cèdre en France. R.F.F. n°3, pp. 353-364.
178. Toth J. (1980). Le cèdre dans quelques pays du pourtour méditerranéen et dans deux autres pays à grande importance forestière. *Forêt Médit.* II (1), CTGREF, Aix en Provence.
179. Toth J. (1990). Le cèdre. *La Forêt privée*, (193-194), 195.

180. Tsankov G., Schmidt G. H., & Mirchev P. (1993). Structure, hatching rate and parasitism of egg-batches of *Thaumetopoea pinivora* (Tr.) (Lep. Thaumetopoeidae) near the Baltic Sea. ). *Bollettino di Zoologia Agraria e di Bachicoltura, Ser. II* 25: 143-152.
181. Tsankov G., Schmidt G. H., & Mirchev P. (1995). Impact of parasitoids in egg-batches of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. and Schiff.) in Algeria. *Bollettino di Zoologia Agraria e di Bachicoltura, Ser. II* 27: 53-60.
182. Tschorsing H. P., Herting B. (2001). The Tachinids (Diptera: Tachinidae) of central Europe: Identification Keys for the Species and data on Distribution and Ecology, 506:1-170.
183. Van Vuuren D. P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., & Lamarque J. F. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109: 5-31.
184. Vega J. M., Vega J., Garcia-Ortiz C., Moneo I., & Roques A. (2015). Natural history of the processionary moths (*Thaumetopoea* spp.): new insights in relation to climate change. In A. Roques (Ed.), *Processionary Moths and Climate Change: An Update* (pp. 15-80). Dordrecht-Versailles : Springer-Quae.
185. Villemant C., & Fraval A. (1992). Les ennemis des oeufs de *Porthetria* (*Lymantria*) *dispar* (L.) (Lép. Lymantriidae) au Maroc : inventaire et problèmes relatifs à l'évaluation de leur impact. *Bulletin de l'Institut scientifique, Rabat*, 16 : 160-172.
186. Wu T., Yu R., Zhang F., Wang Z., Dong M., Wang L., Jin X., Chen D. & Li L. (2010). The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: description and its performance for the present-day climate. *Climate dynamics*, 34(1): 123-147.
187. Walther G.R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J.M., Hoegh-Guldberg, O., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416 : 389-395.
188. Wilson R. J., Gutiérrez D., Gutiérrez J., Martínez D., Agudo R., & Monserrat V. J. (2005). Changes to the elevational limits and extent of species ranges associated with climate change. *Ecology Letters*, 8(11) : 1138-1146.
183. Zamoum M. (1998). Données sur la bio écologie, les facteurs de mortalité et la dynamique des populations de *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiffermüller (Lep., *Thaumetopoeidae*) dans les pineraies subsahariennes de la région de Djelfa (Algérie). Thèse Doc. Univ. Des sciences de Rennes I, France, 247 p.

189. Zamoum M. & Démolin G. (2005). The life cycle of the pine processionary caterpillar in the bioclimatic conditions of a sub-Saharan region. In F. Lieutier & D. Ghaioule (Eds.), *Entomological Research in Mediterranean Forest Ecosystems* (pp. 107–116). Paris : INRA.
190. Zamoum M., Guendouz H. & Deia D. (2007). Structure des communautés d'ennemis naturels de *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiffermuller (Lep., Thaumetopoeidae) sur pin d'Alep en Algérie subsaharienne. *Entomologica: Annali di Entomologia Generale ed Applicata*, 40: 139–151.
191. Zamoum M., Martin J. C., & Bensidi A. (2015). Fecundity of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera: Notodontidae) at the southern edge of its distribution range. *Biologia*, 70: 386-392.
192. Zhang D. X. & Hewitt G. M. (1996). Nuclear integrations: challenges for mitochondrial DNA markers. *Trends in Ecology & Evolution*, 11: 247-251.

# ARTICLE

## **RÉSUMÈS**

## Bioécologie de la processionnaire du cèdre *Thaumetopoea bonjeani* Powell

### (Lepidoptera : Notodontidae) dans le Djurdjura

#### Résumé.

La processionnaire du cèdre, *Thaumetopoea bonjeani* est une espèce univoltine qui provoque des dommages périodiques, exclusivement sur *Cedrus atlantica*. Ces dernières années, les populations de ce défoliateur se multiplient significativement et ont atteint la phase de culmination dans la cédraie du Djurdjura. La présente étude s'articule autour de quatre aspects : les traits comportementaux de l'insecte et sa dynamique à travers le suivi pluriannuel de son cycle biologique, les facteurs écologiques impliqués dans la régulation naturelle de ses populations et certains aspects de la dynamique de ces derniers. De plus, cette étude expose des informations relatives à la variabilité génétique de l'ADNmt chez l'espèce, ainsi que des données sur sa structure génétique géographique et son histoire démographique.

L'envol des adultes se situe entre le mois d'août et septembre. La quantification des œufs a mis en évidence des valeurs moyennes de 157 à 177 œufs par ponte en relation avec les sites prospectés. Les éclosions des chenilles ont lieu au printemps de l'année suivante la ponte, entre la dernière décade de mars et la première semaine de mai. La durée moyenne de développement larvaire est de 85 jours. La durée moyenne de premier stade est de 20 jours, de 17 jours respectivement pour le deuxième et le troisième stade, de 16 et 15 jours respectivement pour le quatrième et cinquième stade. La phase hypogée dure de 47 à 95 jours.

Une diversité d'auxiliaires parasitoïdes et prédateurs joue un rôle dans la régulation des populations de *T. bonjeani* au cours des différentes phases de son développement. Le cortège de ces ennemis naturels varie selon les sites prospectés. Trois espèces de parasitoïdes embryonnaires ont été répertoriées ; *Ooencyrtus pityocampae*, *Baryscapus servadeii* et *Trichogramma embryophagum*. L'espèce Hyperparasitoïde, *Chartocerus* sp. a été signalée pour la première fois à partir des œufs du genre *Thaumetopoea*. A celles-ci s'ajoutent cinq espèces de parasitoïdes des stades larvaires et du stade nymphal ; *Exorista segregata*, *Compsilura concinnata*, *Pales processionea*, *Drino* sp., et *Heterospilus* sp.

Les séquences d'ADN mitochondrial étudiées ont montré une diversité haplotypique élevée qui caractérise les populations de *T. bonjeani*. Sur les 141 individus séquencés, 15 haplotypes différents ont été détectés. Les résultats phylogéographiques ont mis en évidence la présence de trois haplo-groupes correspondant à des populations de *T. bonjeani* occupant des entités géographiques bien définies, avec l'absence de zones de sympatrie entre ces groupes de populations.

**Mots clés :** Processionnaire du cèdre, bioécologie, régulation naturelle, phylogéographie.

## Bioecology of the cedar processionary moth *Thaumetopoea bonjeani* Powell (Lepidoptera: Notodontidae) in the Djurdjura

### Abstract

The North African cedar processionary moth, *Thaumetopoea bonjeani*, is a univoltine species that causes periodic damage exclusively on *Cedrus atlantica* Manetti. In recent years, the populations of this pest multiplied significantly and reached the outbreak peak in the cedar forests of the National Park of Djurdjura, Algeria. The present study focuses on four aspects: the behavioural traits of the insect and its population dynamics through multi-year monitoring of the population life cycle, some ecological factors implicated in the natural regulation, the dynamics of these ecological factors, the population genetics all over the outbreak range in Algeria, with an insight in its phylogeography and past history.

The emergence of adults spanned between August and September. The average number of eggs per egg batch was 157-177. The eggs hatched in the spring of the following year, between the end of March and the first week of May. The average duration of larval development was 85 days. The mean duration of the first stage was 20 days, 17 days for both the second and third stage, 16 and 15 days for the fourth and fifth stage, respectively. The pupal stage in the soil lasted on average 45-72 days.

Insect predators and parasitoids played an important role in the regulation of populations of *T. bonjeani* in the different phases of the development. The community of these natural enemies varied between sites and years. The pattern of egg parasitism was driven largely by chalcid wasps such as *Ooencyrtus pityocampae*, followed by *Baryscapus servadeii* and *Trichogramma embryophagum*. An hyperparasitoid, *Chartocerus* sp., was collected for the first time from eggs of *Thaumetopoea* species. Five parasitoids of the larvae and pupae were involved in the regulation of *T. bonjeani*: the tachinids *Exorista segregata*, *Compsilura concinnata*, *Pales processionea*, *Drino* sp., and the braconid *Heterospilus* sp.

The mitochondrial DNA sequences studied showed high haplotype diversity. From 141 individuals sequenced 15 different haplotypes were identified. Phylogeographic results shows the presence of three haplotypal groups corresponding to populations of *T. bonjeani* occupying clearly defined geographical entities, with the absence of sympatric zones between these population groups.

**Keywords:** Cedar processionary moth, bioecology, natural enemies, phylogeography.



## البيولوجية البنينة ليسروع الارز الأطلسي *Thaumetopoea bonjeani* Powell

### في جرجرة. (Lepidoptera: Notodontidae)

#### ملخص.

يسروع الأرز الأطلسي، *Thaumetopoea bonjeani* يسبب أضرارا دورية على شجرة الأرز الأطلسي *Cedrus atlantica* Manetti خلال السنوات الأخيرة هذه الحشرة تتزايد بشكل ملحوظ وقد بلغت مرحلة الذروة في غابات الأرز في الحظيرة الوطنية لجرجرة. وتهدف الدراسة الى متابعة بيولوجيا وإيكولوجيا حشرة الأرز الأطلسي في الحظيرة الوطنية لجرجرة خلال الفترة الممتدة بين 2013-2015. تركز هذه الدراسة على أربعة جوانب: الصفات السلوكية للحشرة وديناميكتها من خلال رصد دورة حياتها لعدة سنوات، العوامل البيئية المتحكمة في التنظيم البيولوجي المساهمة في تشتت الحشرة في المناطق الموبوءة، بالإضافة قمنا بدراسة البنية الجينية للحشرة.

مرحلة بزوغ الفراشات تبدأ بين شهري أوت وسبتمبر. تعداد البيوض أظهر متوسط قدره 157-177 بيضة لكل انثى. يفقس البيض في الربيع من السنة التالية، بين اواخر شهر مارس والأسبوع الأول من شهر ماي، بالتزامن مع ظهور براعم الأرز الأطلسي. متوسط مدة نمو اليرقات هو 85 يوما. متوسط نمو الشرايق فيقدر ب 45-72 يوما.

قد ابرزت الدراسة التي اجرية على بيض الحشرة *T. bonjeani* مجموعة من 4 انواع من الطفيليات والتي لها أثر فعال في تنظيم مستوى تدرج الحشرة تابعة لرتبة عشائيات الاجنحة. من اهم هذه الطفيليات لدينا: *Ooencyrtus pityocampae* ، *Thaumetopoea sp.*، *Chartocerus sp.*، *T. embryophagum*، *Baryscapus servadeii* وتقدم أساسا التطفل من قبل *O. pityocampae*، واثنين من الأنواع الأخرى المحددة ليس لها تأثير يذكر. تشارك خمسة أنواع من الطفيليات اليرقية في الضبط الطبيعي ليسروع الأرز الجرار: *Exorista segregata*، *Compsilura concinnata*، *Heterospilus sp.* و *Pales processionea*، *Drino sp.*،

اظهرت دراسة الحمض النووي الميتوكوندري (ADN) تنوع كبير النمط الفر داني ليسروع الارز الأطلسي. من مجموع 141 فرد، وجدنا 15 نمطا متنوعا. اظهرت نتائج دراسة الفيلوجيوغرافيا وجود ثلاث مجموعات من النمط الفردي والمحددة بوضوح، مع غياب بئر التكاثر بين هذه المجموعات.

**الكلمات المفتاحية:** يسروع الارز الاطلسي الجرار، بيولوجيا، الضبط الطبيعي، فيلوجيوغرافيا.