

Popular Democratic Republic of Algeria  
Ministry of High Education and Scientific Research  
Abbes Laghrou University- Khenchela-  
Natural and life sciences Faculty  
Molecular and Cellular Biology Department



N° de série : .....

## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences de la Nature et de la Vie**

Filière : **Sciences Biologiques**

Spécialité : **Biologie et Contrôle des Populations d'insectes**

*Présenté par :*

*Ayoub MENZER*

Thème

**Impact du changement climatique sur la distribution  
potentielle des phlébotomes, vecteurs de la  
Leishmaniose, dans le Nord-Est de l'Algérie**

*Mémoire soutenu publiquement le 18 / 06 / 2025 devant le jury composé de :*

**M. Mohamed Amine AICHE**

MCB, Université de Khenchela, Président

**M. Mehdi BADIS**

MCB, Université de Khenchela, Encadrant

**M. Hichem MAAMAR**

MCB, Université de Khenchela, Examineur

**Année Universitaire 2024/2025**



# Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Très-Haut, le Clément et le Miséricordieux, pour Ses innombrables bienfaits et pour m'avoir guidé et soutenu tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Mehdi BADIS, Maître de Conférences à l'Université Abbès Laghrour Khenchela, encadrant de ce mémoire, pour sa disponibilité, ses conseils éclairés et son soutien constant. Son accompagnement rigoureux et sa générosité dans le partage de son savoir, notamment dans l'apprentissage de la modélisation avec le logiciel *Maxent*, ont été essentiels à la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à Monsieur Mohamed Amine AICHE, Maître de Conférences à l'Université Abbès Laghrour Khenchela, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie chaleureusement Monsieur Hichem MAAMAR, Maître de Conférences à l'Université Abbès Laghrour Khenchela, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Enfin, je tiens à remercier les services sanitaires ainsi que les Directions de Santé Publique pour le partage des données relatives à l'espèce étudiée, données qui ont été indispensables à l'aboutissement de cette recherche.

## Dédicaces

À mes chers parents,  
Pour leur amour inconditionnel, leur patience, leurs sacrifices et  
leur soutien constant tout au long de ma vie.  
Ce travail est le fruit de leurs prières et de leur confiance en moi.

À ma chère épouse,  
Pour son soutien moral inébranlable, ses encouragements dans les  
moments de doute, sa patience au quotidien, et sa compréhension  
face aux longues heures de travail.  
Sa présence a été un pilier essentiel dans l'achèvement de ce  
mémoire.

À mes frères,  
Pour leur affection, leurs encouragements et leur présence  
réconfortante.

À tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenu et encouragé  
dans mon parcours universitaire.  
Cette modeste contribution scientifique vous est dédiée avec toute  
ma gratitude.

.

## Résumé

Les phlébotomes (*Phlebotomus* spp.) sont les vecteurs biologiques exclusifs de la leishmaniose, une maladie parasitaire endémique en Algérie. Leur distribution géographique dépend fortement de variables bioclimatiques, elles-mêmes influencées par les changements climatiques globaux. Ce travail vise à modéliser la distribution actuelle et future des phlébotomes vecteurs dans la wilaya de Khenchela, située dans le Nord-Est algérien, en tenant compte de l'impact du changement climatique. Les données d'occurrence (n = 62) ont été obtenues à partir de cas humains autochtones, confirmés et géoréférencés à l'aide de données hospitalières, de rapports de la Direction de la Santé et d'enquêtes épidémiologiques de terrain. La modélisation a été réalisée avec le logiciel Maxent, en utilisant un ensemble de 19 variables bioclimatiques extraites de la base WorldClim v1.4 pour le présent et le futur selon deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Le modèle présente de bonnes performances (Area Under Curve = 0,687) et révèle que l'écarte diurne des températures est le facteur déterminant pour la présence des phlébotomes. Actuellement, les zones favorables se concentrent dans la majorité du territoire de la wilaya. Les projections climatiques futures indiquent des contractions significatives de leur aire de répartition, qui seront concentrée dans l'extrême nord de la wilaya. Cette étude souligne la pertinence de la modélisation climatique comme outil prédictif pour anticiper les effets du changement global sur la dynamique vectorielle, et constitue une base stratégique pour cibler les interventions de surveillance et de lutte contre la leishmaniose.

**Mots-clés :** Phlébotomes, Leishmaniose, Changement climatique, Modélisation, Distribution géographique, Vecteurs de maladies, Algérie

## **Abstract**

Phlebotomine sand flies (*Phlebotomus spp.*) are the exclusive biological vectors of leishmaniasis, a parasitic disease endemic to Algeria. Their geographic distribution is highly dependent on bioclimatic variables, which are themselves influenced by global climate change. This study aims to model the current and future distribution of vector sand flies in the Khenchela province, located in northeastern Algeria, while considering the impact of climate change. Occurrence data (n = 62) were obtained from confirmed, autochthonous human cases, georeferenced using hospital data, reports from the Health Directorate, and field epidemiological surveys. Modeling was performed using Maxent software, based on a set of 19 bioclimatic variables from the WorldClim v1.4 database for both present and future periods under two greenhouse gas emission scenarios. The model performed well (Area Under Curve = 0.687) and revealed that the diurnal temperature range is the key factor determining sand fly presence. Currently, suitable areas are concentrated across most of the province. Future climate projections indicate significant contractions in their distribution range, which will be limited to the extreme north of the province. This study highlights the relevance of climate-based modeling as a predictive tool for anticipating the effects of global change on vector dynamics, and serves as a strategic basis for targeting surveillance and control interventions against leishmaniasis.

**Keywords:** Phlebotomine sandflies, Leishmaniasis, Climate change, Modeling, Geographic distribution, Disease vectors, Algeria.

## الملخص

تُعدّ حشرات الفاصدة (*Phlebotomus spp.*) الناقلات البيولوجية الحصرية لداء اللشمانيا، وهو مرض طفيلي متوطن في الجزائر. وتعتمد توزيعاتها الجغرافية بشكل كبير على المتغيرات المناخية البيولوجية، والتي تتأثر بدورها بالتغيرات المناخية العالمية. يهدف هذا العمل إلى نمذجة التوزيع الحالي والمستقبلي لحشرات الفاصدة الناقلة في ولاية خنشلة الواقعة في شمال شرق الجزائر، مع الأخذ في الاعتبار تأثير التغير المناخي. تم الحصول على بيانات التواجد ( $n = 62$ ) من حالات بشرية محلية مؤكدة، وتم تحديد مواقعها جغرافياً باستخدام بيانات المستشفيات، وتقارير مديرية الصحة، والتحقيقات الوبائية الميدانية. تم تنفيذ النمذجة باستخدام برنامج Maxent، بالاعتماد على مجموعة من 19 متغيراً مناخياً بيولوجياً مستخرجة من قاعدة بيانات WorldClim v1.4 للحاضر والمستقبل وفقاً لسيناريوهين لانبعثات الغازات الدفيئة. أظهر النموذج أداءً جيداً (مساحة تحت المنحنى = 0.687)، وكشف أن مدى التغير اليومي في درجات الحرارة هو العامل الحاسم في وجود الفاصدات. حالياً، تتركز المناطق المناسبة في معظم أراضي الولاية. وتشير التوقعات المناخية المستقبلية إلى انكماشات كبيرة في نطاق انتشارها، حيث ستقتصر على أقصى شمال الولاية. تؤكد هذه الدراسة على أهمية النمذجة المناخية كأداة تنبؤية للتنبؤ بتأثيرات التغير المناخي العالمي على ديناميكية النواقل، وتُعدّ أساساً استراتيجياً لتوجيه جهود المراقبة ومكافحة داء اللشمانيا

**الكلمات المفتاحية:** الفاصدات الرملية، داء اللشمانيا، التغير المناخي، النمذجة، التوزيع الجغرافي، نواقل الأمراض،

الجزائر

# Table de matières

Introduction .....	1
Synthèse Bibliographique.....	2
Chapitre I : Biologie et Écologie de Phlébotomes.....	5
1. Taxonomie.....	5
2. Cycle de vie .....	6
2.1. Stade ovulaire .....	6
2.2. Stade larvaire.....	7
2.3. Stade nymphal .....	8
2.4. Imago.....	9
2.4.1. La tête.....	9
2.4.2. Le thorax.....	11
2.4.3. L'abdomen .....	12
3. Reproduction .....	13
4. Comportement alimentaire .....	15
5. La répartition géographique et écologique .....	16
5.1. Dans le monde .....	16
5.2. En Algérie .....	17
5.3. Données régionales et observations épidémiologiques.....	18
6. Facteurs environnementaux influençant la distribution .....	19
6.1. Température .....	19
6.2. Humidité .....	19
6.3. Type de végétation .....	20
6.4. Facteurs humains.....	20
6.5. Altitude.....	20
Chapitre II : Les Phlébotomes, vecteurs de la leishmaniose .....	21
1. Introduction à la Leishmaniose .....	21
1.1 Historique et découverte.....	21
1.2 Agent étiologique : le genre <i>Leishmania</i> .....	22

2. Aspects épidémiologiques .....	22
2.1 Répartition géographique mondiale .....	22
2.2. Situation épidémiologique en Algérie .....	23
2.2.1 <i>Leishmaniose cutanée à Leishmania major</i> .....	23
2.2.2 <i>Leishmaniose cutanée à Leishmania tropica</i> .....	24
2.2.3 <i>Leishmaniose viscérale à Leishmania infantum</i> .....	24
3. Manifestations cliniques des leishmanioses .....	25
3.1. Leishmaniose viscérale (LV) .....	25
3.2. Leishmaniose cutanée (LC) .....	25
3.3. Leishmaniose cutanéomuqueuse (LCM).....	26
4. Cycle parasitaire de <i>Leishmania</i> .....	26
4.1. Phase chez le vecteur (phlébotome femelle) .....	27
4.2. Phase chez l'hôte vertébré .....	27
Chapitre III : Phlébotomes et Changement Climatique .....	29
Matériel et Méthodes.....	31
1. Zone d'étude .....	32
2. Données d'occurrences .....	33
2.1. Approche épidémiologique centrée sur les cas humains .....	33
2.2. Enquête épidémiologique ciblée .....	34
2.3 Traitement des données d'occurrence .....	35
3. Données environnementales .....	35
4. Modélisation des niches écologiques .....	38
Résultats.....	39
1. Données d'occurrence employées.....	40
2. Performances du modèle .....	42
3. Contribution climatique .....	43
4. Prédiction actuelle .....	44
4. Prévisions futures .....	45
Discussion.....	47

<b>1. Température moyenne annuelle.....</b>	<b>48</b>
<b>2. Écart diurne des températures.....</b>	<b>49</b>
<b>3. Répartition actuelle .....</b>	<b>50</b>
<b>4. Réponse au changement climatique .....</b>	<b>52</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>54</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>57</b>
<b>Sites Internet.....</b>	<b>66</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>68</b>

# Liste des Figures

<b>Figure 1</b> : Phlébotome – insecte vecteur de la leishmaniose canine .....	5
<b>Figure 2</b> : Œufs de <i>phlebotomus ssp</i> à différents niveaux de mélanisation .....	6
<b>Figure 3</b> : Larves de phlébotomes en milieu de culture : les quatre stades larvaires .....	7
<b>Figure 4</b> : Stade nymphal (pupa) de <i>Phlebotomus argentipes</i> observable .....	8
<b>Figure 5</b> : Morphologie générale d'un phlébotome adulte (femelle) .....	9
<b>Figure 6</b> : Anatomie de la tête et des pièces buccales d'un phlébotome adulte .....	10
<b>Figure 7</b> : Morphologie des sclérites cervical et thoracique d'un phlébotome .....	11
<b>Figure 8</b> : Illustration comparative des genitalia chez les phlébotomes mâle et femelle	12
<b>Figure 9</b> : Génitalia mâle et femelle chez un phlébotome adulte.....	13
<b>Figure 10</b> : Cycle biologique du phlébotome, vecteur de la leishmaniose .....	14
<b>Figure 11</b> : Cycle épidémiologique de la leishmaniose .. ..	15
<b>Figure 12</b> : Carte de distribution des principaux genres de phlébotomes .....	16
<b>Figure 13</b> : Représentation schématique <b>des</b> régions endémiques de la leishmaniose...	18
<b>Figure 14</b> : William Leishman et Charles Donovan .....	21
<b>Figure 15</b> : Les deux formes du parasite Leishmania .....	22
<b>Figure 16</b> : Transmission vectorielle mondiale de la leishmaniose .....	23
<b>Figure 17</b> : Carte de la distribution des foyers de leishmaniose en Algérie .....	24
<b>Figure 18</b> : Enfant présentant une hépatosplénomégalie caractéristique de la leishmaniose Viscérale ... ..	25
<b>Figure 19</b> : Forme ulcéro-croûteuse typique de la leishmaniose cutanée.....	26
<b>Figure 20</b> : Présentation clinique typique de leishmaniose cutanéomuqueuse .....	26
<b>Figure 21</b> : Cycle de vie de Leishmania.....	28
<b>Figure 22</b> : Photo d'une enquête avec un sujet hospitalisé.....	34
<b>Figure 23</b> : Distribution des cas de leishmaniose détectés sur les communes de la Wilaya de Khenchela .....	40
<b>Figure 24</b> : Données d'occurrences de phlébotome dans la Wilaya de Khenchela .....	41
<b>Figure 25</b> : Output de la courbe ROC mentionnant l'aire sous la courbe AUC .....	42

<b>Figure 26</b> : Probabilité de présence des phlébotomes selon l'écart diurne des températures .....	<b>43</b>
<b>Figure 27</b> : Probabilité de présence des phlébotomes selon la température annuelle ....	<b>44</b>
<b>Figure 28</b> : Prédications des niches écologiques actuelles des phlébotomes .....	<b>44</b>
<b>Figure 29</b> : Prévisions de la distribution potentielle de phlébotomes dans la wilaya de Khenchela en 2050 et en 2070 selon le scénario moyen RCP 2.6 .....	<b>45</b>
<b>Figure 30</b> : Prévisions de la distribution potentielle de phlébotomes dans la wilaya de Khenchela en 2050 et en 2070 selon le scénario moyen RCP 8.5 .....	<b>46</b>
<b>Figure 31</b> : Gondi de l'Atlas <i>Ctenodactylus gundi</i> .....	<b>52</b>

## Liste des Tableaux

**Tableau 1** : Liste des variables environnementales et bioclimatiques incluses dans la modélisation des niches écologiques des phlébotomes.....**37**

**Tableau 2** : Pourcentages des contributions des variables dans le modèle sélectionné .....**43**

## Liste des Annexes

**Annexe I** : Détails des cas de leishmaniose utilisés dans la modélisation des niches écologiques des Phlébotomes.

# Liste des Abréviations

**AICc:** Critère d'information d'Akaike corrigé pour les petits échantillons.

**Alt:** Altitude

**AUC:** Area Under the Curve.

**BCPI:** Biologie et Contrôle des Populations d'Insectes.

**Bio:** Variable Bioclimatique.

**C°:** Degré Celsius.

**CSV:** Comma-Separated Values.

**DSP:** Direction de Santé Publique.

**GPS:** Global Positioning System

**IPA :** Institut Pasteur d'Alger.

**IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change.

**L:** Larve

**LC :** Leishmaniose Cutanée

**LCM :** Leishmaniose Cutané-Muqueuse

**LV:** Leishmaniose Viscérale (kala-azar)

**ORS:** Observatoire Régional de la Santé.

**RCP:** Representative Concentration Pathway.

**ROC:** Receiver Operating Characteristic

**WHO:** World Health Organisation.

# **Introduction**

## Introduction

Les phlébotomes du genre *Phlebotomus* sont des insectes diptères hématophages jouant un rôle épidémiologique majeur dans la transmission de la leishmaniose, une affection parasitaire endémique dans la région méditerranéenne, notamment en Algérie. En tant que vecteurs biologiques de *Leishmania spp.*, leur biologie, leur écologie et leur répartition géographique sont étroitement conditionnées par des facteurs environnementaux, en particulier les variables climatiques telles que la température, l'humidité relative et les précipitations annuelles. Ces paramètres influencent de manière significative leur cycle de développement, leur densité saisonnière et leur capacité vectorielle (Depaquit et al., 2010 ; Alten et al., 2016).

Dans un contexte de changement climatique global, ces insectes apparaissent comme de véritables bioindicateurs écologiques, sensibles aux fluctuations environnementales. En effet, l'élévation des températures et la modification des régimes hydriques, observées au cours des dernières décennies, sont susceptibles d'induire des modifications profondes dans les zones d'habitat favorables aux phlébotomes, étendant potentiellement leur aire de répartition vers des régions jusque-là indemnes. Ces changements risquent de modifier la dynamique épidémiologique de la leishmaniose, tant au niveau de la distribution spatiale que de l'intensité de transmission (Ready, 2013).

La wilaya de Khenchela, située dans le nord-est algérien, constitue une zone écologiquement vulnérable aux perturbations climatiques. Les fluctuations météorologiques observées dans cette région pourraient profondément affecter l'équilibre des écosystèmes locaux, en créant de nouveaux foyers favorables au développement des vecteurs. Dès lors, la compréhension fine de l'interaction entre les facteurs bioclimatiques et la dynamique des populations de phlébotomes devient un enjeu majeur pour la santé publique (Benallal et al., 2020).

Face à cette complexité, la modélisation des niches écologiques émerge comme une approche puissante permettant d'identifier les variables environnementales les plus déterminantes dans la distribution des vecteurs. Elle permet également d'évaluer, selon différents scénarios climatiques futurs, l'évolution probable des zones à risque (El Omari et al., 2017 ; Peterson & Soberón, 2012). Ces modèles, basés sur l'analyse croisée des données entomologiques et des bases climatiques mondiales, permettent une projection spatiale des habitats potentiels, et constituent un outil d'aide à la décision pour les programmes de surveillance et de lutte anti-vectorielle.

Comme le soulignent García et al. (2019), la capacité prédictive de ces modèles écologiques est essentielle pour anticiper les risques d'émergence ou de réémergence de maladies vectorielles, dans un contexte marqué par une instabilité climatique croissante. En intégrant les connaissances scientifiques actuelles à des outils de modélisation robustes, il devient possible de délimiter précisément les zones à surveiller, et d'optimiser l'allocation des ressources en matière de prévention et d'intervention.

Par ailleurs, cette vision scientifique ne s'oppose nullement à une lecture plus philosophique et spirituelle du monde naturel. Le Coran évoque, dans la sourate Al-Baqara (2 : 26) : « **Nous vous donnons l'exemple du moustique, et même au-delà** » (« **وضربنا لكم مثلا بعوضة فما فوقها** »), soulignant ainsi la valeur intrinsèque et la complexité des plus petites créatures, qui méritent d'être étudiées avec attention, rigueur et humilité. Cette citation illustre la convergence entre les savoirs traditionnels et les exigences de la science contemporaine.

Ce travail s'inscrit dans une double démarche, à la fois scientifique et éthique. Il vise d'abord à identifier les facteurs bioclimatiques influençant la répartition des insectes du genre *Phlebotomus*, principaux vecteurs de la leishmaniose dans le nord-est de l'Algérie, en mettant particulièrement l'accent sur la wilaya de Khenchela. Ensuite, il s'agit de modéliser les niches climatiques favorables à l'implantation de ces populations vectorielles, puis de prédire leur réponse face au réchauffement climatique attendu dans les décennies à venir. L'objectif ultime de cette étude est de produire des cartes de risque permettant aux autorités sanitaires de renforcer la gestion intégrée des risques liés à la leishmaniose. Ce travail met ainsi en lumière l'intérêt de la modélisation des niches écologiques comme outil complémentaire aux campagnes de terrain et aux analyses de laboratoire (identification et dépistage), dans une stratégie de contrôle des insectes vecteurs de zoonoses.

# **Synthèse**

# **Bibliographique**

## Chapitre I : Biologie et Écologie de Phlébotomes

### 1. Taxonomie

Les phlébotomes sont un genre d'insectes défini en 1840 par les entomologistes italiens Camillo Rondani et Francesco Berté, dans le cadre d'une révision taxonomique des Diptères (Rondani & Berté, 1840). Cependant, une des espèces les plus connues de ce genre, *Phlebotomus papatasi*, avait déjà été décrite en 1786 sous le nom de *Bibiopapatasi* par Giovanni Antonio Scopoli. Ce n'est qu'à la suite de révisions plus approfondies que l'espèce a été réassignée au genre *Phlebotomus*, en raison de ses caractéristiques morphologiques spécifiques (Scopoli, 1786).

Sur le plan taxonomique, le genre *Phlebotomus* se classe de la manière suivante :  
**Règne** : *Animalia* ; **Embranchement** : *Arthropoda* ; **Classe** : *Insecta* ;  
**Ordre** : *Diptera* ; **Sous-ordre** : *Nematocera* ; **Famille** : *Psychodidae* ;  
**Sous-famille** : *Phlebotominae* ; **Genre** : *Phlebotomus* (Rondani & Berté, 1840).

Les phlébotomes sont des insectes de petite taille, mesurant généralement entre 2 et 4 mm. Leur corps est densément couvert de poils fins et leurs ailes, longues et étroites, sont portées en position verticale lorsqu'elles ne sont pas en activité (Theodor & Mesghali, 1964). Ces caractéristiques morphologiques, en particulier la structure des pièces buccales et des organes reproducteurs, permettent une identification précise des espèces au microscope (Lewis, 1982).



**Figure 1** : Phlébotome – insecte vecteur de la leishmaniose canine (Source : EmmèneTonChien.com, consulté le 11 décembre 2024).

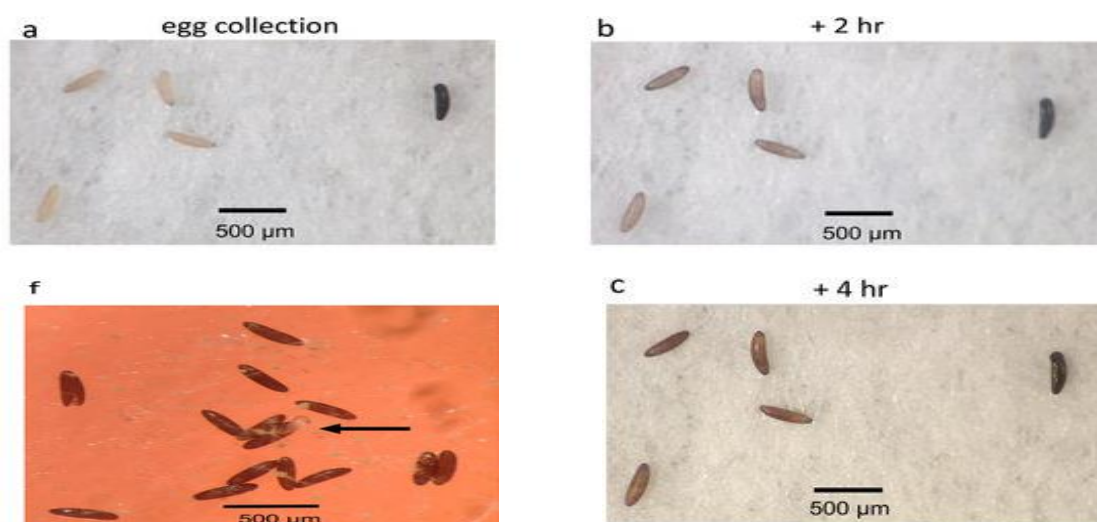
## 2. Cycle de vie

### 2.1. Stade ovulaire

En général, chaque ponte comprend entre 30 et 70 œufs, bien que ce nombre puisse varier selon l'espèce, les conditions environnementales, et la disponibilité en nourriture (Killick-Kendrick, 1999).

Les œufs sont de forme allongée ou ovale, mesurant environ 0,3 mm de long. Ils sont initialement blancs, mais prennent une teinte brun-noirâtre au fur et à mesure du durcissement de leur chorion, souvent orné de motifs caractéristiques, utiles pour l'identification des espèces (Lane, 1993). Contrairement à d'autres insectes vecteurs comme les moustiques, les phlébotomes ne déposent pas leurs œufs dans l'eau, mais plutôt dans des lieux sombres, abrités et riches en matières organiques en décomposition, comme les litières animales, les crevasses humides, ou les terriers (Alexander & Young, 1992).

La durée d'incubation dépend fortement de la température et de l'humidité ambiantes. En conditions favorables, l'éclosion intervient généralement entre 6 et 17 jours après la ponte. Les œufs de certaines espèces peuvent entrer en diapause si les conditions deviennent défavorables, retardant ainsi l'éclosion jusqu'au retour d'un environnement plus propice (Killick-Kendrick, 1990).



**Figure 2 :** Œufs de *phlebotomus ssp* à différents niveaux de mélanisation (stades a-b : œufs non/noircis, c-f : œufs mélanisés dans l'abdomen,) (Source : Jeffries et al., 2018).

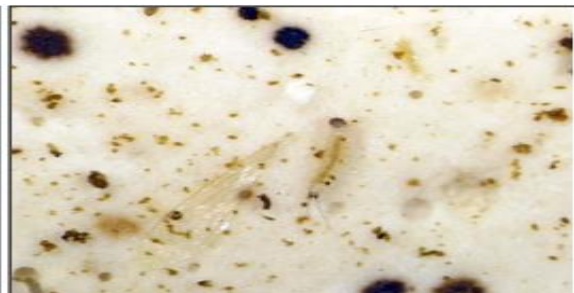
### 2.2. Stade larvaire

Morphologiquement, les larves sont vermiformes, allongées, non segmentées extérieurement mais possédant un corps divisé en tête, thorax et abdomen. Elles passent par quatre stades larvaires (L1 à L4), chacun séparé par une mue. À chaque stade, la taille augmente progressivement, atteignant jusqu'à 3 mm à L4 (Felicciangeli, 2004). La tête est bien développée, sclérifiée, et munie de pièces buccales broyeuses de type masticateur, adaptées à un régime saprophyte, principalement basé sur des microorganismes, débris végétaux et excréments (Hanson, 1968 ; Souza et al., 2005).

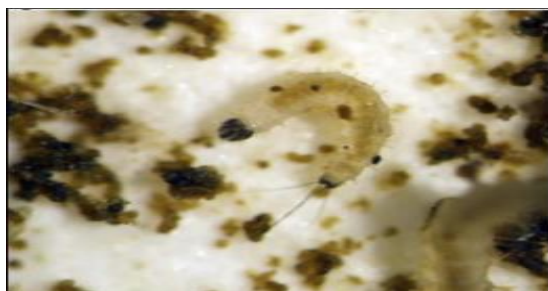
Un trait distinctif des larves de phlébotomes est la présence d'une brosse caudale, formée de longues soies terminales, utilisée pour la locomotion et la perception de l'environnement. Le tégument est recouvert de fines soies sensorielles, dont la disposition varie selon l'espèce, constituant ainsi un critère taxonomique important (Abonnenc & Léger, 1976).



Larve de phlébotome stade 1



Larve de phlébotome stade 2



Larve de phlébotome stade 3



Larve de phlébotome stade 4

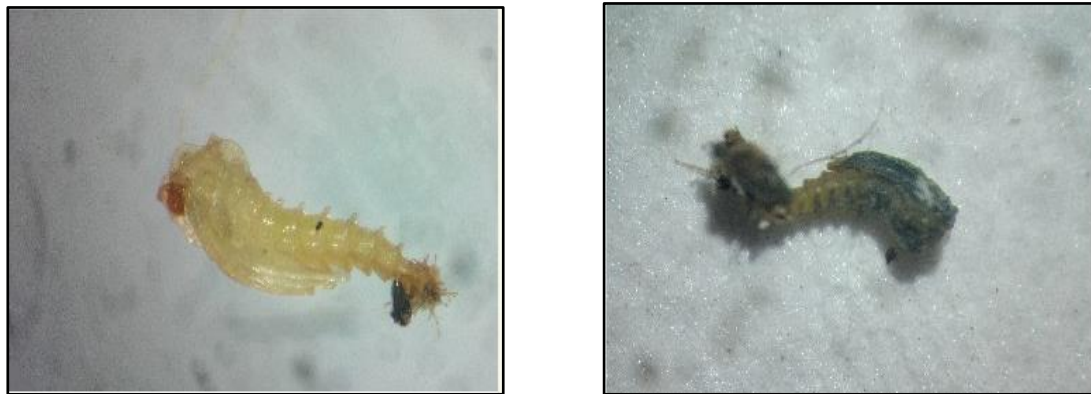
**Figure 3** : Larves de phlébotomes en milieu de culture : les quatre stade larvaires (Source : Maroli et al, 2013)

### 2.3. Stade nymphal

La nymphe est dite de type « coarctée », c'est-à-dire qu'elle reste enfermée dans la dernière exuvie larvaire qui joue un rôle protecteur pendant la transformation. La durée de ce stade est fortement influencée par des facteurs environnementaux tels que la température et l'humidité du substrat. En conditions optimales, le stade nymphal dure généralement entre 5 et 10 jours (Ready, 2013 ; Young & Duncan, 1994).

Morphologiquement, la nymphe ne se nourrit pas et présente un tégument rigide qui protège les tissus en développement. On y observe déjà la préformation des antennes, des ailes, des pattes et des pièces buccales, bien que ces structures soient encore immobiles et repliées contre le corps. L'abdomen est segmenté, et des spiracles sont visibles, indiquant une respiration toujours active au cours de cette phase (Lane, 1993).

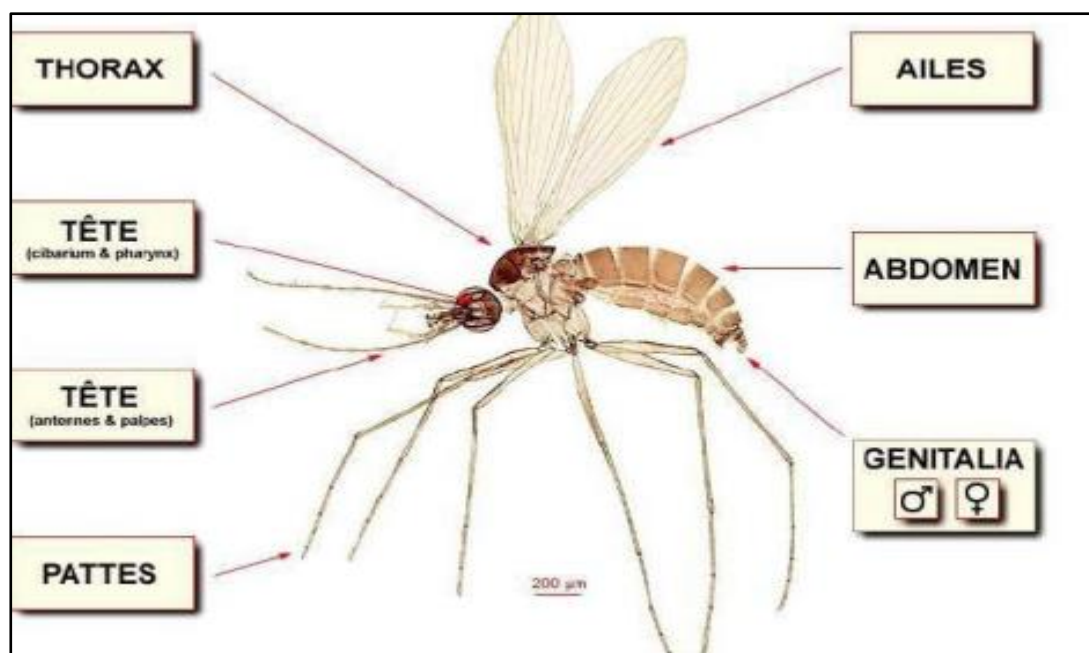
L'émergence de l'adulte se fait généralement en fin de journée ou la nuit, et elle est facilitée par la pression interne exercée par l'insecte, qui rompt la cuticule pupale au niveau du thorax. L'adulte libéré reste immobile quelques instants, le temps que ses téguments se durcissent et que ses ailes se déploient (Killick-Kendrick, 1999).



**Figure 4** : Stade nymphal (pupa) de *Phlebotomus argentipes* observable à gauche, nymphe au stade précoce ; à droite, nymphe quelques heures avant l'émergence de l'adulte. (Source : Sadlova et al., 2020)

### 2.4. Imago

Le stade adulte, ultime phase du cycle de développement des phlébotomes, est celle au cours de laquelle l'insecte devient apte à se reproduire et, pour les femelles, à assurer la transmission des agents pathogènes comme les *Leishmania*. L'émergence des adultes intervient à partir de la nymphe lorsque les conditions climatiques – notamment la température et l'humidité – sont favorables. Après l'émergence, l'adulte passe par une courte période de maturation au cours de laquelle les téguments se sclérotinisent et les ailes deviennent pleinement fonctionnelles (Alexander & Maroli, 2003).



**Figure 5 :** Morphologie générale d'un phlébotome adulte (femelle), vue latérale : antennes, ailes, thorax, abdomen, pattes et pièces buccales (Source : Acarologiste , 2016)

#### 2.4.1. La tête

La tête des phlébotomes présente une organisation morphologique caractéristique, incluant de longues antennes segmentées, de grands yeux composés, ainsi que des pièces buccales adaptées à la piqûre et à la succion du sang chez les femelles. Ces structures sont illustrées en détail dans la figure ci-dessous, extraite d'une étude menée au Brésil par Dantas-Torres et al. (2014).

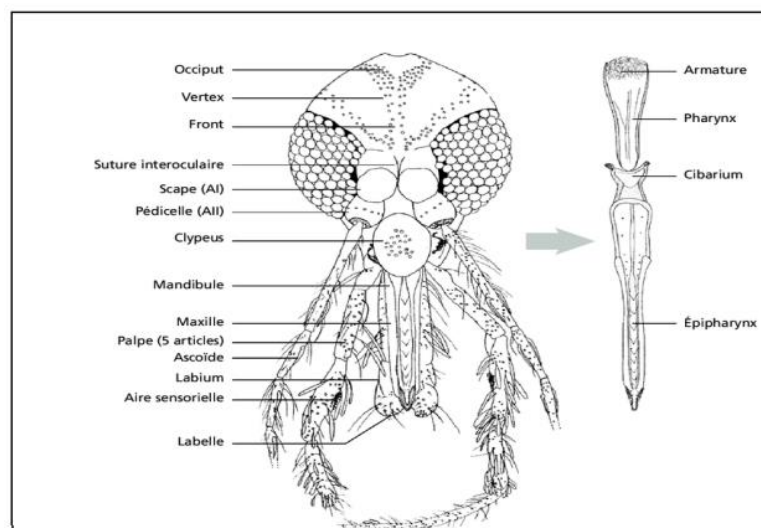
## Chapitre I : Biologie et Écologie de Phlébotomes

Les antennes, composées de 16 articles (segments), jouent un rôle essentiel dans la détection des signaux chimiques et phéromonaux. Elles sont couvertes de sensilles olfactives qui permettent la localisation des hôtes pour le repas sanguin, ainsi que celle des partenaires sexuels (Ilango,2005 ; Souza et al.,2010).

Les yeux composés, bien développés, offrent une vision adaptée aux conditions de faible luminosité, ce qui est cohérent avec leur activité nocturne ou crépusculaire.

Les palpes maxillaires, constitués de cinq segments, sont également riches en sensilles, notamment gustatives. Leur longueur relative par rapport aux antennes, ainsi que la disposition des soies sensorielles, constituent des critères taxonomiques importants pour l'identification spécifique (Gebre-Michael & Lane, 1996). Les pièces buccales, de type piqueur-suceur chez la femelle, comprennent un labre, un hypopharynx et deux mandibules acérées permettant la perforation de la peau et la succion du sang. Chez le mâle, ces structures sont atrophiées ou absentes, en lien avec leur régime exclusivement basé sur les sucres (Ready, 2013 ; Basimike & Mutinga, 1995).

L'examen microscopique de la tête est fondamental pour la systématique des phlébotomes. Par exemple, le rapport entre la longueur du palpe et celle des articles antennaires, ou la présence de papilles sur certains segments, sont utilisés dans les clés dichotomiques pour différencier les espèces vectrices (Killick-Kendrick et al., 1984 ; Depaquit et al., 2010).



**Figure 6 :** Anatomie de la tête et des pièces buccales d'un phlébotome adulte.

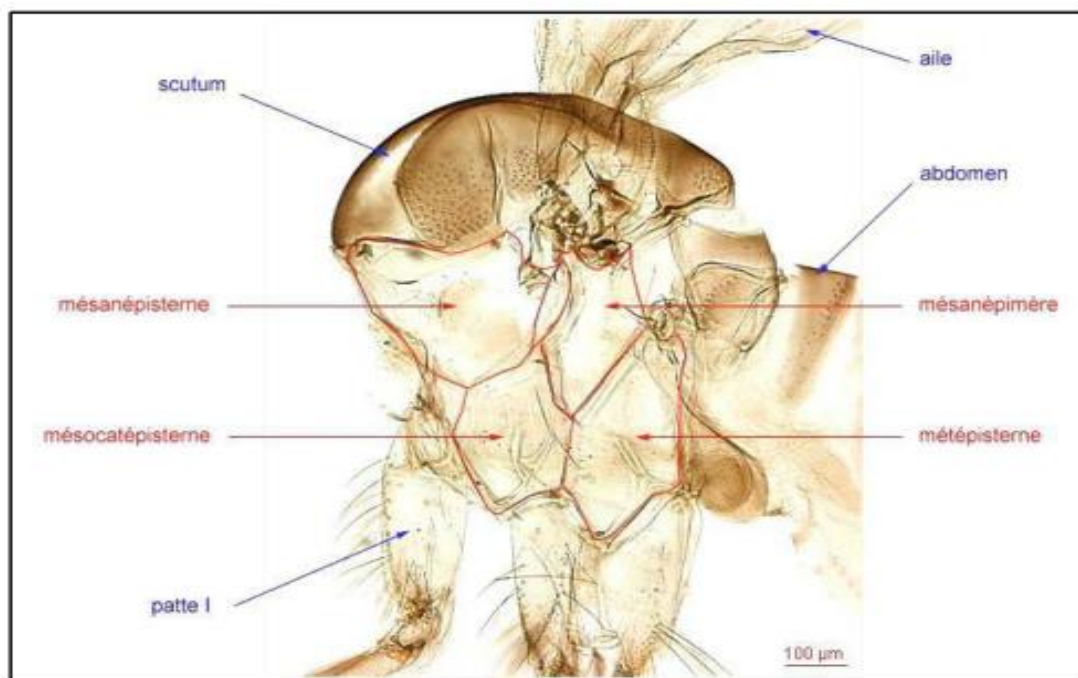
(Source : Dantas-Torres et al. 2014)

### 2.4.2. Le thorax

Le thorax est une structure centrale dans l'organisation anatomique, car il porte à la fois les appendices locomoteurs et les muscles responsables du vol. Il est constitué, comme chez tous les insectes, de trois segments : le prothorax, le mésothorax et le métathorax, chacun portant une paire de pattes, tandis que les deux dernières sections supportent les ailes (Lane, 1993).

Chaque patte est composée des segments classiques : coxa, trochanter, fémur, tibia et tarse. Les tarsi sont longs et grêles, adaptés à la marche et au maintien sur les surfaces verticales comme les murs ou les troncs d'arbres. Leur morphologie particulière permet à l'insecte de rester immobile pendant de longues périodes, ce qui facilite la discrétion de la femelle pendant le repas sanguin (Felicciangeli, 2004).

Le thorax contient également le système respiratoire trachéen, avec plusieurs spiracles latéraux visibles, ainsi que le début de la chaîne nerveuse ventrale. Enfin, c'est dans cette région que se situe le ganglion thoracique, qui coordonne la locomotion et le vol de l'insecte (Rangel & Lainson, 2009).



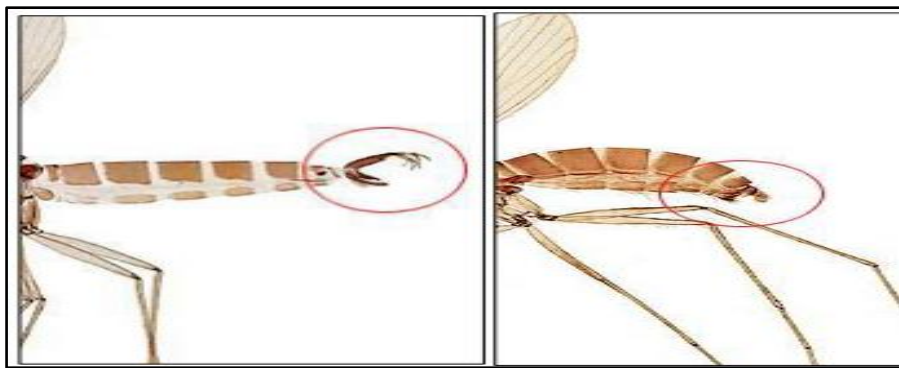
**Figure 7 :** Morphologie des sclérites cervical et thoracique d'un phlébotome (*Phlebotominae*), annotée avec les principales régions (Source : Galati et al., 2017).

### 2.4.3. L'abdomen

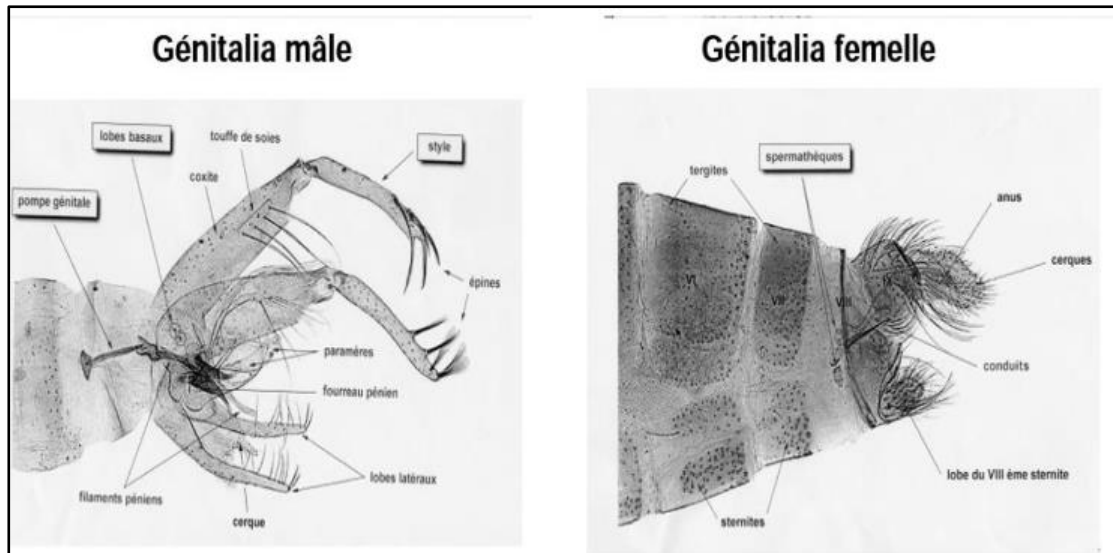
L'abdomen des phlébotomes adultes est un segment clé à la fois dans la physiologie de la digestion, la reproduction et la respiration. Il est formé de 10 segments visibles (chez la femelle) dont huit sont pleinement développés et facilement observables. Chaque segment est recouvert de sclérites chitineux qui confèrent une certaine rigidité tout en maintenant la flexibilité nécessaire aux mouvements, notamment lors de la prise de repas sanguin ou de la ponte (Lewis, 1982 ; Lane, 1993).

Les segments postérieurs portent les structures génitales, qui diffèrent de manière significative entre mâles et femelles. Chez la femelle, on observe un oviscapte, formé de lobes pairs facilitant la ponte dans les habitats propices (matière organique humide, crevasses, etc.). Chez le mâle, les structures terminales comprennent les cerci et les gonostyles, qui sont des critères taxonomiques déterminants pour l'identification des espèces (Theodor & Mesghali, 1964 ; Artemiev, 1991).

L'abdomen est également impliqué dans la respiration à travers la présence de stigmates ou spiracles latéraux, situés sur les segments abdominaux. Ces structures trachéennes participent à l'échange gazeux, en lien avec l'activité métabolique du vol ou de la digestion (Rangel & Lainson, 2009).



**Figure 8 :** Illustration comparative des genitalia chez les phlébotomes mâle (gauche) et femelle (droite). (Source : IRD / programme Identiciels – Phlébotomes de la région afrotropicale, consulté le 12 mars 2025)



**Figure 9 :** Génitalia mâle (à gauche) et femelle (à droite) chez un phlébotome adulte, servant à l'identification du sexe par observation morphologique (Source : Prudhomme, 2012)

### 3. Reproduction

La reproduction chez les phlébotomes constitue un processus clé dans leur cycle biologique, directement lié à leur rôle vectoriel. Comme chez la majorité des diptères, la reproduction est sexuée, et la copulation précède la maturation des œufs. Le comportement reproducteur, la sélection des partenaires, ainsi que les caractéristiques morphologiques des organes génitaux varient d'une espèce à l'autre, influençant la dynamique des populations (Killick-Kendrick, 1999 ; Ready, 2013).

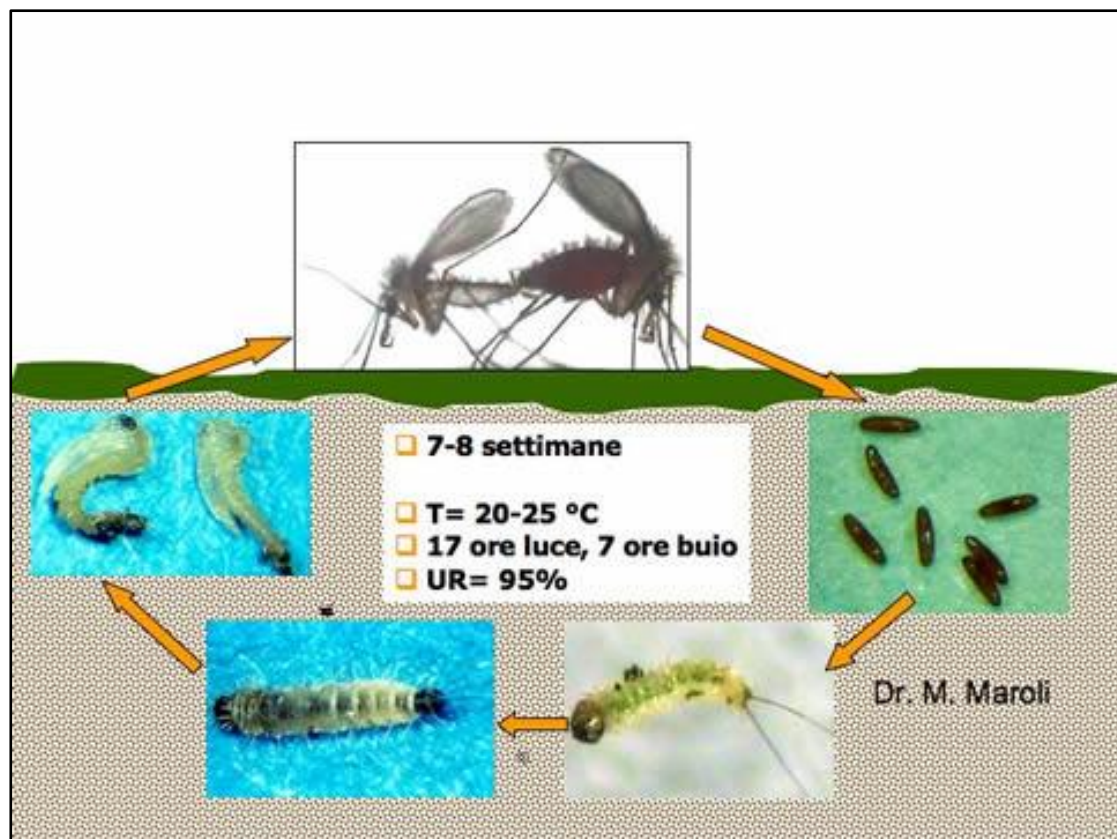
La copulation se déroule peu de temps après l'émergence des adultes. Chez certaines espèces, le mâle peut adopter un comportement territorial ou de parade pour attirer les femelles. Les structures terminales de l'abdomen mâle, notamment les gonostyles et les gonocoxites, sont adaptées à l'accrochage et à la transmission du sperme via un spermatophore. Chez la femelle, les spermathèques, souvent segmentées et chitinisées, permettent le stockage du sperme en vue de fécondations successives (Lane, 1993 ; Theodor & Mesghali, 1964).

La maturation des œufs est déclenchée par la prise d'un repas sanguin, indispensable pour les femelles. Ce phénomène, appelé anautogénie, est contrôlé par des interactions hormonales internes, où la vitellogénine est produite en réponse à l'ingestion du sang et permet la croissance des ovocytes (Ribeiro, 2000 ; Maroli et

## Chapitre I : Biologie et Écologie de Phlébotomes

Feliciangeli, 2004). En général, une femelle peut pondre entre 30 et 70 œufs par cycle gonotrophique, selon l'espèce et la disponibilité des ressources.

La ponte a lieu dans des microhabitats humides, riches en matière organique décomposée, comme les fissures de murs, les terriers d'animaux, ou les abris sombres. Les œufs sont déposés en amas ou de manière dispersée, en fonction de l'espèce et des conditions environnementales (Alexander & Maroli, 2003). La fécondité et la fréquence des cycles de ponte varient également selon les conditions climatiques, la densité de population, et la qualité des hôtes vertébrés.



**Figure 10** : Cycle biologique du phlébotome, vecteur de la leishmaniose.

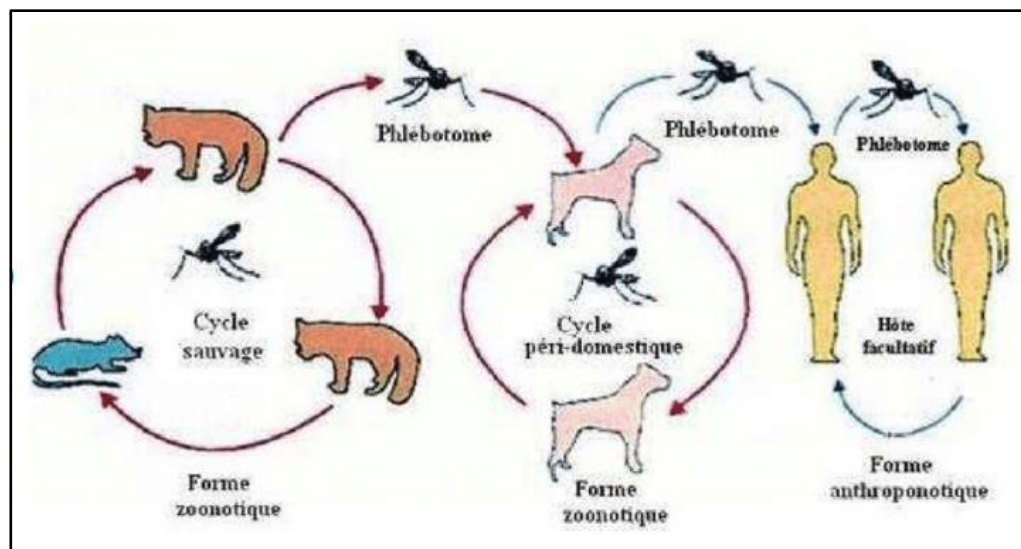
(Source : Gruppo Leishmania (<https://www.gruppoleishmania.org>), consulté le 10 juin 2024).

### 4. Comportement alimentaire

Seules les femelles, ayant besoin de sang pour la maturation de leurs œufs, sont hématophages, tandis que les mâles se nourrissent principalement de nectar et d'autres substances végétales (Killick-Kendrick, 1990).

Le processus alimentaire commence par l'insertion du stylet buccal, qui pénètre dans la peau de l'hôte et traverse les couches tissulaires pour atteindre les vaisseaux sanguins. Durant le repas sanguin, les phlébotomes injectent des salives anticoagulantes, permettant une prise de sang plus facile en empêchant la coagulation (Killick-Kendrick, 1999). Les éléments anticoagulants contenus dans la salive sont également responsables de la transmission des agents pathogènes, comme les parasites *Leishmania* (Lane, 1993).

Le cycle de prise de sang est souvent étroitement lié au cycle gonotrophique, et une femelle peut se nourrir plusieurs fois avant de compléter son cycle de reproduction. La prise de sang induit la maturation des œufs et permet ainsi la reproduction des phlébotomes. Ces comportements sont donc essentiels à la fois pour leur survie et pour leur rôle dans la transmission des maladies.

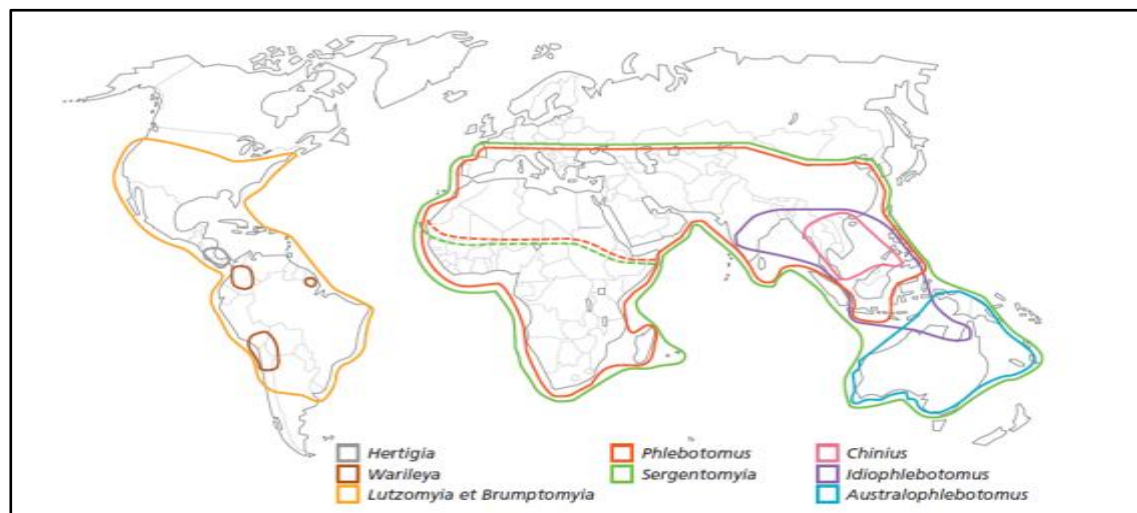


**Figure 11** : Cycle épidémiologique de la leishmaniose, illustrant l'interaction entre vecteurs, hôtes vertébrés et l'environnement (Source : Monzote, 2008).

### 5. La répartition géographique et écologique

#### 5.1. Dans le monde

Les phlébotomes, vecteurs biologiques des parasites du genre *Leishmania*, sont largement répartis à travers les régions tropicales, subtropicales et tempérées chaudes du globe. On les retrouve en Afrique du Nord (notamment au Maghreb), en Afrique de l'Est, au Moyen-Orient, en Asie centrale et méridionale, dans le sud de l'Europe (Espagne, Italie, Grèce, Turquie), ainsi que dans les Amériques, où les espèces du genre *Lutzomyia* prédominent (Killick-Kendrick, 1990 ; Ready, 2013). Leur répartition géographique est fortement influencée par des facteurs écologiques tels que la température (optimum entre 20 et 30°C), l'humidité, la disponibilité de matières organiques en décomposition et la présence de refuges sombres et humides pour le développement larvaire. Ils évitent la lumière directe et sont souvent retrouvés dans les crevasses murales, les terriers, les étables, les zones boisées, ou encore les recoins des habitats humains (WHO, 2022 ; Alten et al., 2016).



**Figure 12 :** Carte de distribution des principaux genres de phlébotomes (Phlebotominae), d'après Depaquit & Léger (2017).

### 5.2. En Algérie

De par sa diversité climatique et géographique, offre un large éventail d'habitats favorables au développement des phlébotomes. Ces derniers sont présents dans presque toutes les régions du pays, depuis les zones littorales humides jusqu'aux zones arides du Sahara, en passant par les régions steppiques et montagneuses.

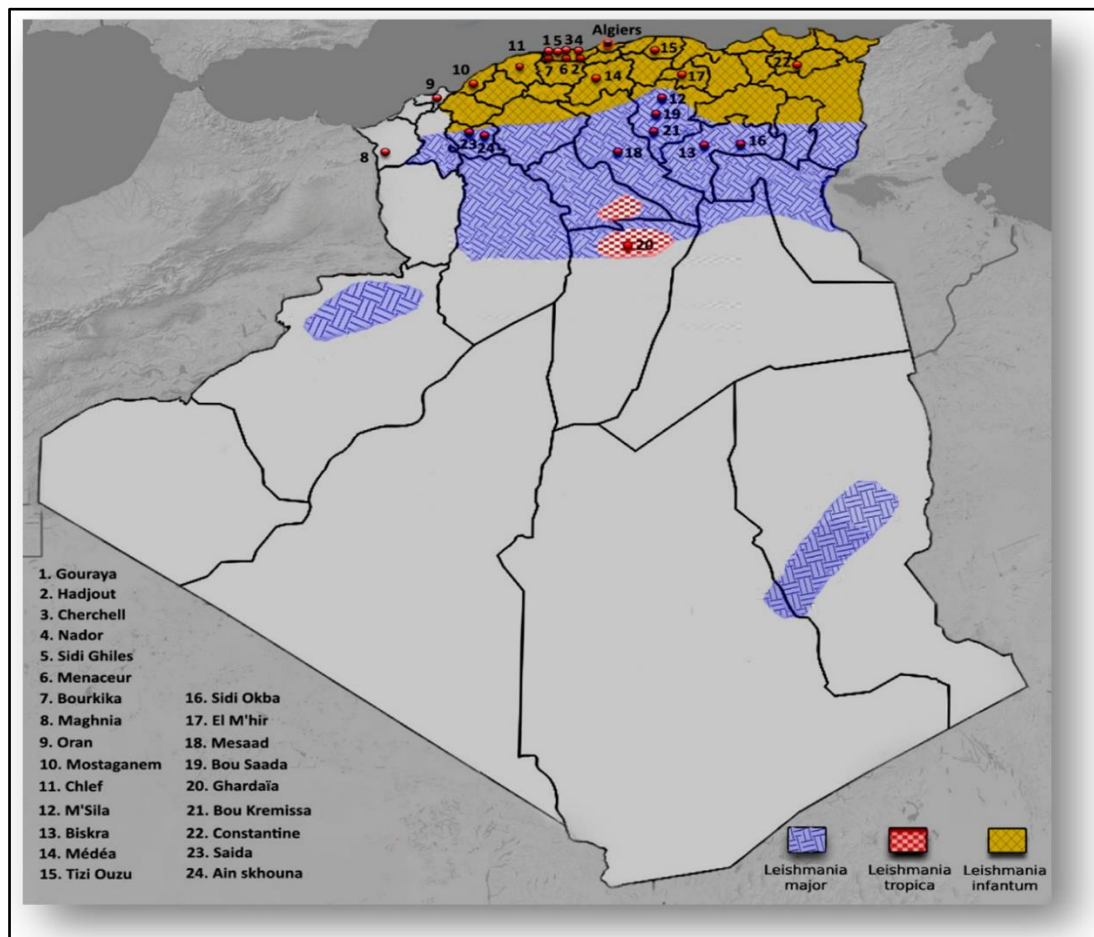
- **Dans le nord du pays** (zones telliennes et littorales à climat méditerranéen), les conditions climatiques (température modérée, humidité relative plus élevée, végétation plus dense) sont particulièrement favorables à une grande diversité d'espèces. On y trouve notamment *Phlebotomus perniciosus*, *P. perfiliewi* et *P. ariasi*, vecteurs de *Leishmania infantum*, responsable de la leishmaniose viscérale (Izri et al., 2008 ; Harrat et al., 2014).
- **Dans les Hauts Plateaux et les zones steppiques**, les conditions deviennent plus arides, mais certaines espèces comme *P. papatasi* et *P. sergenti* y sont bien adaptées. Ces régions sont souvent associées à des foyers de leishmaniose cutanée à *L. major* ou *L. tropica* (Boubidi et al., 2011).
- **Dans les régions sahariennes**, malgré des conditions climatiques extrêmes, plusieurs espèces comme *P. papatasi* y persistent, notamment dans les oasis ou autour des zones d'habitat humain, où l'humidité résiduelle et la présence d'hôtes assurent leur survie (Benallal et al., 2013).

L'Algérie compte plus de 20 espèces de phlébotomes, réparties principalement dans les genres *Phlebotomus* (vecteurs de la leishmaniose) et *Sergentomyia* (non vecteurs humains connus) (Harrat et al., 2014). Parmi les espèces d'importance épidémiologique :

- *Phlebotomuspapatasi* : Très largement distribué, surtout dans les zones arides et semi-arides ; vecteur principal de *L. major*.
- *Phlebotomusergenti* : Présent dans les zones semi-arides et montagneuses, notamment les Aurès et l'Atlas saharien ; vecteur de *L. tropica*.
- *Phlebotomusperniciosus* et *P. perfiliewi* : Abondants dans les zones humides du nord ; vecteurs de *L. infantum*.
- *Sergentomyiaspp.* : Bien que très répandus, leur rôle dans la transmission humaine n'est pas confirmé.

### 5.3. Données régionales et observations épidémiologiques

- Dans la wilaya de Biskra, plusieurs études ont confirmé la forte prévalence de *P. papatasi* dans les zones périurbaines, en lien avec des foyers de leishmaniose cutanée (Boudrissa et al., 2012).
- Dans les Aurès (Khenchela, Batna, Oum El Bouaghi), *P. sergenti* est dominant et coexiste parfois avec *P. perniciosus* dans les zones de transition, expliquant la diversité des formes cliniques rencontrées.
- Dans les régions côtières comme Tizi Ouzou, Béjaïa ou Alger, la leishmaniose viscérale à *L. infantum* est corrélée à la présence de *P. perniciosus* et *P. perfiliewi*, bien adaptés aux milieux boisés et humides.



**Figure 13 :** Représentation schématisée des régions endémiques de la leishmaniose dues à *L. major*, *L. tropica* et *L. infantum*, ainsi que de l'origine géographique des échantillons cutanés traités dans la présente étude (points rouges).

### 6. Facteurs environnementaux influençant la distribution

La distribution des phlébotomes, en tant que vecteurs de la leishmaniose, est fortement influencée par divers facteurs environnementaux, notamment le climat, l'humidité, la température et la disponibilité d'hôtes. Ces éléments jouent un rôle essentiel non seulement dans la survie des phlébotomes, mais aussi dans leur capacité à transmettre le parasite *Leishmania*.

#### 6.1. Température

La température est l'un des facteurs les plus déterminants dans la distribution géographique des phlébotomes. En effet, ces insectes sont particulièrement sensibles aux variations de température, qui influencent directement leur cycle de développement, leur activité de piquûre et leur durée de vie. Les phlébotomes se développent mieux dans des températures modérées, généralement comprises entre 20 et 30 °C (Lane, 1993). Au-delà de ces températures optimales, leur survie et leur reproduction peuvent être compromises. Par exemple, les températures extrêmes peuvent ralentir ou arrêter le développement des stades immatures, tandis que des températures trop élevées peuvent entraîner la mort des adultes (Kuhn et al., 2011).

#### 6.2. Humidité

L'humidité est également un facteur clé pour la survie des phlébotomes, particulièrement pendant les stades larvaire et nymphal. Les larves de phlébotomes nécessitent un environnement humide pour se développer correctement, et des conditions sèches peuvent entraîner leur dessèchement et leur mort. Les adultes, quant à eux, sont plus actifs dans des environnements relativement humides et préfèrent les habitats tels que les forêts, les grottes ou les zones agricoles, où l'humidité est relativement élevée (Alexander & Maroli, 2003).

Les pluies abondantes peuvent également avoir un impact significatif sur la distribution des phlébotomes. En effet, ces précipitations favorisent la reproduction et la disponibilité d'habitats favorables aux larves, comme les flaques d'eau ou les sols humides. Cependant, des sécheresses prolongées peuvent réduire la disponibilité de ces sites, limitant ainsi la population de phlébotomes (Killick-Kendrick, 1990).

### 6.3. Type de végétation

La végétation joue un rôle crucial en fournissant des micro-habitats propices à la survie des phlébotomes. Les zones avec une végétation dense, comme les forêts ou les buissons, sont particulièrement favorables aux phlébotomes adultes, qui s'y réfugient durant la journée pour échapper à la chaleur et à la déshydratation. De plus, certaines plantes servent de sources de nectar pour les mâles, tandis que d'autres peuvent attirer les femelles en raison de leur proximité avec des hôtes (Ready, 2013).

### 6.4. Facteurs humains

Les activités humaines, telles que l'urbanisation, la déforestation et l'agriculture, peuvent également influencer la distribution des phlébotomes. Les modifications du paysage, comme la création de réservoirs d'eau ou l'aménagement de zones urbaines, peuvent offrir de nouveaux habitats pour ces insectes. Par exemple, les zones urbaines, bien que généralement plus sèches, peuvent constituer des habitats propices si des conditions locales, telles que des zones d'ombre et des réservoirs d'eau stagnante, sont présentes (Killick-Kendrick, 1999). De plus, les hôtes domestiques comme les chiens, souvent abondants dans les environnements urbains et périurbains, favorisent la présence de phlébotomes dans ces zones (Rangel & Lainson, 2009).

### 6.5. Altitude

L'altitude joue également un rôle dans la distribution des phlébotomes. Ces insectes sont souvent observés dans les zones de basse altitude où les températures sont plus clémentes, mais certaines espèces sont également capables de survivre et de se reproduire à des altitudes plus élevées, notamment dans les régions montagneuses de l'Asie, du Moyen-Orient et d'Amérique du Sud (Ribeiro et al., 2001). Cependant, les populations des zones montagneuses sont souvent moins abondantes, car les températures fraîches et la faible humidité limitent leur prolifération.

## Chapitre II : Les Phlébotomes, vecteurs de la leishmaniose

### 1. Introduction à la Leishmaniose

Les phlébotomes femelles, en raison de leur hématophagie, jouent un rôle central dans la transmission de plusieurs maladies infectieuses, dont certaines zoonoses affectant l'homme. Ces insectes sont notamment vecteurs de pathogènes bactériens (comme *Bartonella bacilliformis*), viraux (comme les phlébovirus responsables de la fièvre Papatasi) et surtout protozoaires, en particulier ceux du genre *Leishmania* (Depaquit, 2018 ; Akhoundi et al., 2016).

La transmission survient lorsqu'une femelle phlébotome infectée injecte les formes infectantes du parasite (promastigotesmétacycliques) dans la peau de l'hôte au cours du repas sanguin. Les espèces responsables de la transmission varient selon la région géographique et l'espèce de *Leishmania* impliquée (Ready, 2013 ; Maroli et al., 2013).

#### 1.1 Historique et découverte

La leishmaniose fut décrite pour la première fois à la fin du XIXe siècle. En 1903, *William Leishman* et *Charles Donovan* identifièrent indépendamment l'agent pathogène dans la rate de patients atteints de fièvre dum-dum (la leishmaniose viscérale) en Inde. Plus tard, Ronald Ross proposa le nom de *Leishmania donovani* en hommage aux deux découvreurs (Desjeux, 2001).



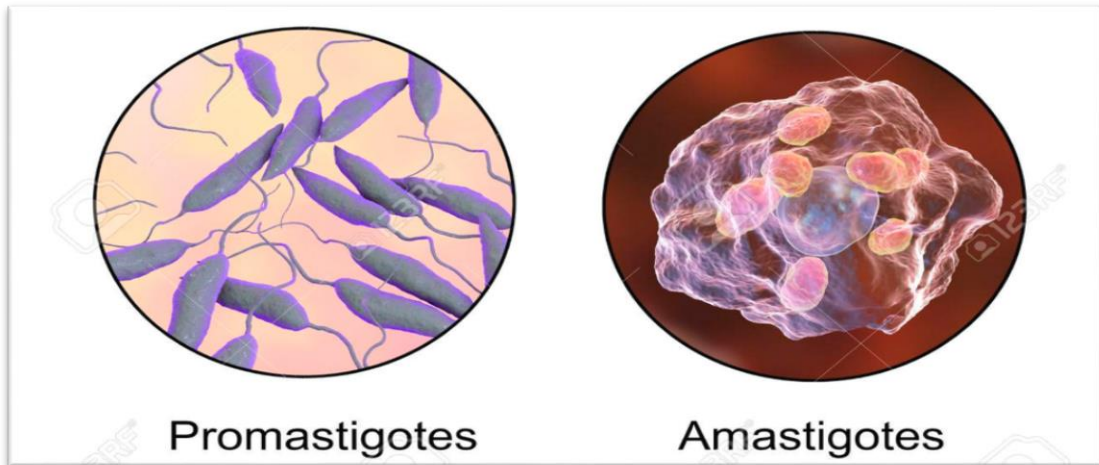
**Figure 14 :** William Leishman et Charles Donovan

(Source : site web :[www.medarus.org](http://www.medarus.org))

### 1.2 Agent étiologique : le genre *Leishmania*

Le genre *Leishmania* appartient à la famille des Trypanosomatidae, ordre des Kinetoplastida. Ce protozoaire présente deux formes principales dans son cycle biologique :

- **Promastigote** : forme flagellée, extracellulaire, présente dans le tube digestif du phlébotome.
- **Amastigote** : forme aflagellée, intracellulaire, retrouvée dans les cellules mononucléées de l'hôte vertébré.



**Figure 15** : Les deux formes du parasite *Leishmania* : promastigote flagellé (forme infectieuse dans le phlébotome) et amastigote non flagellé (forme intracellulaire chez l'hôte) (source : Dreamstime, 2017).

## 2. Aspects épidémiologiques

### 2.1 Répartition géographique mondiale

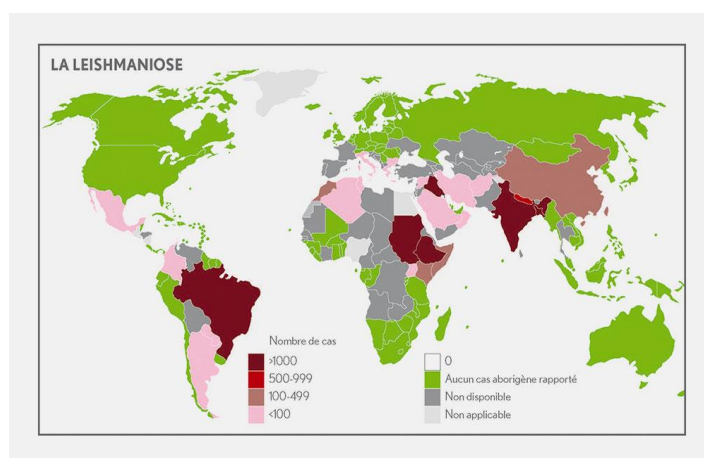
La leishmaniose est endémique dans 98 pays, principalement dans les régions tropicales et subtropicales, mais aussi dans le bassin méditerranéen. On estime que plus de 1 milliard de personnes vivent dans des zones à risque, et que 700 000 à 1 million de nouveaux cas de leishmaniose cutanée et 50 000 à 90 000 cas de leishmaniose viscérale sont déclarés chaque année (WHO, 2023).

La répartition mondiale se divise en deux grands foyers épidémiologiques :

## Chapitre II : Les Phlébotomes, vecteurs de la leishmaniose

- **Le Vieux Monde** (*Old World*) : comprend l’Afrique, le pourtour méditerranéen, le Moyen-Orient, l’Asie centrale et le sous-continent indien. Les principales espèces pathogènes sont *L. major*, *L. tropica* et *L. infantum*.
- **Le Nouveau Monde** (*New World*) : concerne l’Amérique latine (Brésil, Pérou, Colombie, Bolivie) où les espèces les plus fréquentes sont *L. braziliensis*, *L. mexicana* et *L. amazonensis*.

Ces maladies sont souvent sous-déclarées, car elles affectent les populations rurales éloignées, ce qui rend difficile une estimation exacte du fardeau global (Alvar et al., 2012).



**Figure 16** : Illustration issue du site d'information sanitaire *Cinq sur Cinq*, présentant la transmission vectorielle mondiale de la leishmaniose (source : *Cinq sur Cinq*, s.d.).

### 2.2. Situation épidémiologique en Algérie

L’Algérie est l’un des pays les plus touchés par la leishmaniose dans le bassin méditerranéen, avec une co-endémicité des trois formes principales : cutanée zoonotique (*L. major*), cutanée anthroponotique (*L. tropica*) et viscérale zoonotique (*L. infantum*).

#### 2.2.1 Leishmaniose cutanée à *Leishmania major*

Cette forme est la plus fréquente en Algérie. Elle est zoonotique et transmise par *Phlebotomus papatasi*. Les principaux réservoirs sont des rongeurs sahariens comme *Meriones shawi* et *Psammomys obesus*. Les régions touchées sont Biskra,

## Chapitre II : Les Phlébotomes, vecteurs de la leishmaniose

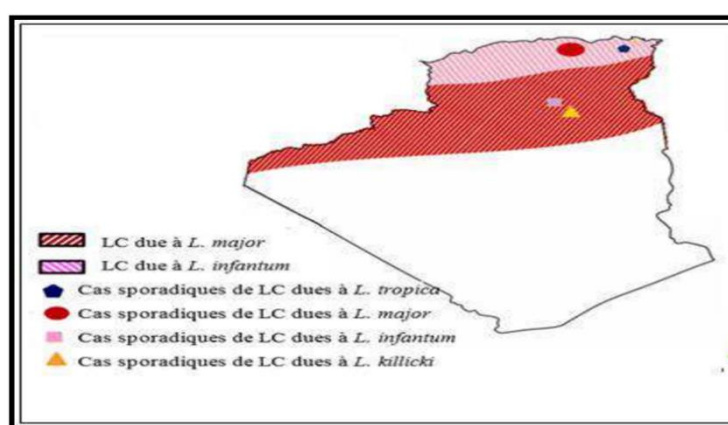
M'Sila, Djelfa, El Oued, Ghardaïa, et Naâma. Les cas sont généralement enregistrés entre septembre et mars, après l'augmentation de l'activité des phlébotomes en été. Environ 20 000 à 30 000 cas par an sont notifiés par l'Institut Pasteur d'Algérie, bien que ce chiffre soit probablement sous-estimé.

### 2.2.2 Leishmaniose cutanée à *Leishmania tropica*

Forme anthroponotique, transmise par *Ph. sergenti*. Elle évolue de manière plus lente, causant des lésions cutanées sèches, souvent difficiles à diagnostiquer. Les zones concernées sont la Kabylie (Tizi Ouzou, Béjaïa), l'Aurès (Batna, Khenchela), et Constantine. La transmission est souvent périurbaine, liée à une promiscuité humaine et à une urbanisation mal planifiée.

### 2.2.3 Leishmaniose viscérale à *Leishmania infantum*

Connue localement sous le nom de fièvre noire, cette forme touche principalement les enfants de moins de 5 ans et les immunodéprimés. Elle est transmise principalement par *Ph. perniciosus*, *Ph. longicuspis*. Le chien domestique est le principal réservoir de *L. infantum*. Elle touche le nord algérien (Alger, Tlemcen, Constantine), ainsi que zones boisées et humides. La LV est potentiellement mortelle si elle n'est pas traitée. Entre 100 et 300 cas sont notifiés annuellement, avec une létalité pouvant atteindre 5 à 10 % en l'absence de traitement rapide (Ouali et al., 2021).



**Figure 17:** Carte schématique de la distribution des foyers de leishmaniose en Algérie  
(Graphical Abstract), extraite de Chaara et al., Acta Tropica. 2014

### 3. Manifestations cliniques des leishmanioses

#### 3.1. Leishmaniose viscérale (LV)

Aussi appelée kala-azar, la LV est la forme la plus sévère affectant les organes internes (rate, foie, moelle osseuse). Elle se manifeste par une fièvre prolongée, une anémie, une splénomégalie, et peut entraîner la mort en l'absence de traitement. Elle est principalement causée par *L. donovani* (Afrique, Asie) et *L. infantum* (Méditerranée, Amérique latine). Plus de 90 % des cas se concentrent dans quelques pays : Brésil, Éthiopie, Inde, Kenya, Somalie et Soudan (WHO, 2023 ; Singh et al., 2021). En Afrique du Nord (Algérie, Maroc, Tunisie), la LV est endémique, affectant principalement les jeunes enfants. Elle a aussi émergé comme maladie opportuniste chez les personnes immunodéprimées en Europe (Antinori et al., 2012 ; Dujardin et al., 2018).



**Figure 18 :** Enfant présentant une hépatosplénomégalie caractéristique de la leishmaniose viscérale (source : *ClinicalPub*, 2023)

#### 3.2. Leishmaniose cutanée (LC)

La LC est la forme la plus répandue. Elle se manifeste par des ulcères cutanés auto-guérisants ou chroniques. Environ un million de nouveaux cas sont signalés chaque année, principalement dans huit pays : Afghanistan, Algérie, Arabie saoudite, Iran, Irak, Syrie, Brésil et Pérou (Alvar et al., 2012 ; WHO, 2023). En Algérie, les principales espèces impliquées sont *L. major* (forme humide zoonotique) et *L. tropica* (forme sèche, souvent anthroponotique) (Boudrissa et al., 2020).



**Figure 19** : Forme ulcéro-croûteuse typique de la leishmaniose cutanée (Hijra et al, 2014)

### 3.3. Leishmaniose cutanéomuqueuse (LCM)

La LCM est principalement observée en Amérique du Sud, causée par des espèces comme *L. braziliensis*, *L. panamensis* et *L. guyanensis*, transmises par des phlébotomes du genre *Lutzomyia* (Ramírez & Cossio, 2021). Les formes muqueuses peuvent survenir plusieurs mois après une LC et entraîner des destructions sévères des muqueuses naso-buccales (Van Griensven et al., 2016).



**Figure 20** : Présentation clinique typique de leishmaniose *cutanéomuqueuse* (Olafsson et al., 2020)

## 4. Cycle parasitaire de *Leishmania*

Le cycle parasitaire de *Leishmania* est dixénique, c'est-à-dire qu'il implique deux hôtes : un hôte vertébré (humain ou animal réservoir) et un insecte vecteur hématophage (phlébotome femelle). Le parasite alterne entre deux formes morphologiques principales : l'amastigote (forme intracellulaire chez le vertébré) et le promastigote (forme flagellée dans le vecteur).

## Chapitre II : Les Phlébotomes, vecteurs de la leishmaniose

### 4.1. Phase chez le vecteur (phlébotome femelle)

Lorsque la femelle phlébotome prend un repas sanguin sur un hôte infecté, elle ingère des macrophages contenant des amastigotes. Ces derniers se transforment en promastigotes procycliques dans le tube digestif moyen du vecteur. Ils se multiplient, migrent vers la partie antérieure du tube digestif, où ils deviennent des promastigotesmétacycliques, stade infectant pour l'hôte vertébré (Sacks & Kamhawi, 2001 ; Bates, 2018).

La transmission survient lors du repas sanguin suivant, par régurgitation des promastigotesmétacycliques présents dans les glandes salivaires du phlébotome, avec la salive contenant des molécules immunomodulatrices facilitant l'infection (Rogers et al., 2014 ; Dostalova & Volf, 2012).

### 4.2. Phase chez l'hôte vertébré

Une fois injectés dans la peau, les promastigotes sont phagocytés par les macrophages du système immunitaire de l'hôte. À l'intérieur des phagolysosomes, ils se transforment en amastigotes, formes non flagellées, capables de résister à l'environnement intracellulaire acide. Les amastigotes se multiplient par scission binaire, lysent les cellules hôtes, puis infectent d'autres cellules (Ponte-Sucre, 2017).

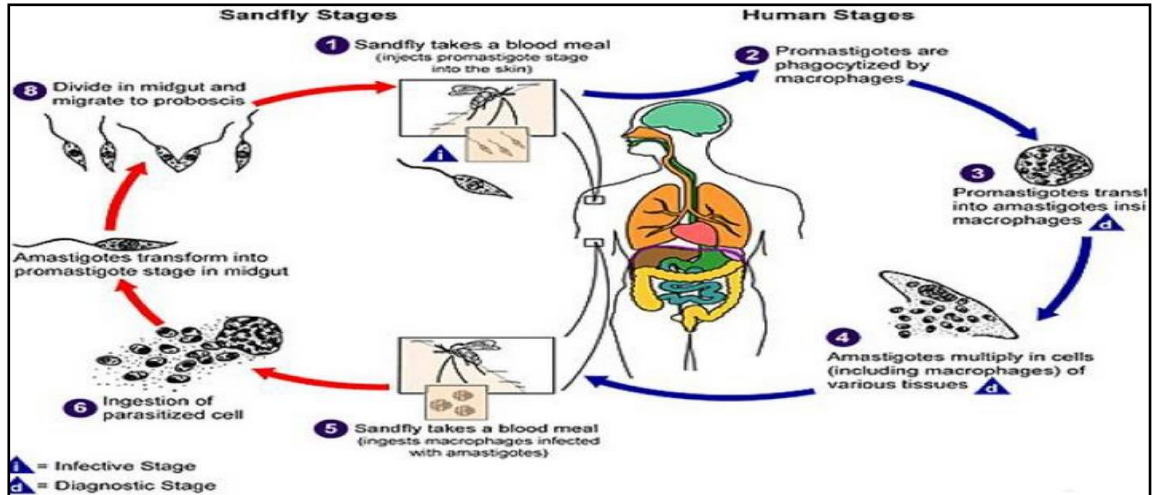
Le parasite peut rester localisé dans la peau (leishmaniose cutanée) ou se disséminer vers les organes profonds riches en macrophages (rate, foie, moelle osseuse) dans la leishmaniose viscérale (Kaye & Scott, 2011).

Résumé schématique du cycle:

1. **Injection** des promastigotesmétacycliques par le phlébotome.
2. **Phagocytose** par les macrophages → transformation en amastigotes.
3. **Multiplication** intracellulaire → propagation de l'infection.
4. **Ingestion** d'amastigotes par un autre phlébotome lors d'un repas sanguin.
5. **Transformation** en promastigotes dans le tube digestif du vecteur.

## Chapitre II : Les Phlébotomes, vecteurs de la leishmaniose

6. **Migration** et maturation en promastigotesmétacycliques → nouvelle transmission.



**Figure 21 :** Cycle de vie de *Leishmania*, mettant en évidence les promastigotes infectieux injectés par le phlébotome et les amastigotes intracellulaires (DPDx Image Library, CDC, 2013)

### Chapitre III : Phlébotomes et Changement Climatique

Le changement climatique représente aujourd'hui un défi environnemental majeur, modifiant de manière significative les équilibres écologiques mondiaux. Il se traduit par des altérations durables de paramètres climatiques fondamentaux tels que la température, les précipitations et l'humidité relative. Ces changements, largement attribués aux activités anthropiques intensives et à l'émission massive de gaz à effet de serre, influencent directement la biologie, la distribution et les interactions entre les organismes vivants, y compris les vecteurs de maladies comme les phlébotomes (IPCC, 2021).

Les insectes ectothermes, dont les phlébotomes, sont particulièrement sensibles aux variations climatiques, leur physiologie dépendant étroitement de la température ambiante. Une hausse des températures peut favoriser leur développement, raccourcir leurs cycles de vie, et étendre leur période d'activité saisonnière, entraînant ainsi une augmentation du risque de transmission des agents pathogènes qu'ils véhiculent (Kilpatrick & Randolph, 2012). Par ailleurs, les modifications du régime des précipitations influencent la disponibilité des microhabitats larvaires, notamment dans les sols humides riches en matière organique, contribuant à une expansion potentielle des populations de phlébotomes dans des zones nouvellement favorables (Ready, 2013).

Dans la région méditerranéenne, plusieurs études ont mis en évidence une corrélation entre le réchauffement climatique et l'expansion géographique des espèces du genre *Phlebotomus*, traditionnellement limitées aux zones chaudes. L'augmentation des températures hivernales, la réduction des jours de gel et les hivers plus secs facilitent désormais leur établissement dans des régions auparavant trop froides (Fischer et al., 2011). En Algérie, ces dynamiques climatiques coïncident avec une recrudescence de la leishmaniose cutanée dans certaines wilayas, notamment celle de Khenchela, où l'on observe une intensification des cas humains corrélée à des modifications environnementales (Ministère de la Santé, 2022).

Les projections régionales basées sur les scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) anticipent un réchauffement accéléré au Maghreb, avec des étés plus longs et plus chauds, et des hivers plus secs. Ces conditions climatiques

### Chapitre III : Phlébotomes et Changement Climatique

favorisent la persistance et la reproduction des phlébotomes, en particulier dans les zones semi-arides comme les Hautes Plaines, où la végétation clairsemée, la faible humidité et les sols meubles offrent des conditions optimales pour leur développement (Elnaiem, 2011).

Dans ce contexte, les outils de modélisation écologique deviennent essentiels pour anticiper les variations de distribution des vecteurs en fonction des paramètres climatiques. Parmi ces outils, le modèle MaxEnt (Maximum Entropy Modeling) permet d'établir des cartes de répartition potentielle à partir des occurrences connues et de variables bioclimatiques. Cette approche a démontré son efficacité dans l'identification des habitats favorables aux phlébotomes et à d'autres vecteurs sensibles au climat, offrant des perspectives précieuses pour la planification sanitaire (Phillips et al., 2006 ; Benavides-Varela et al., 2020).

L'application de cette modélisation à la wilaya de Khenchela permettrait ainsi de projeter la distribution potentielle des phlébotomes dans différents scénarios climatiques, et d'orienter les stratégies de prévention, de surveillance et de lutte antivectorielle. Cette démarche s'avère d'autant plus pertinente dans une région où la transition écologique est marquée et où les dynamiques climatiques récentes influencent directement l'écologie vectorielle.

En somme, le changement climatique redéfinit les conditions de distribution des vecteurs de la leishmaniose, notamment les phlébotomes. Une connaissance approfondie de leurs interactions avec les paramètres climatiques est indispensable pour anticiper les risques épidémiologiques à venir (Caminade et al., 2019). L'étude de la wilaya de Khenchela, fondée sur des outils de modélisation prédictive, s'inscrit pleinement dans cette logique d'adaptation des politiques de santé publique face aux mutations climatiques rapides.

# **Matériel et Méthodes**

### 1. Zone d'étude

La présente étude se concentre sur la wilaya de Khenchela, située dans le Nord-Est de l'Algérie, entre latitudes 35,112° et 35,665° N, et longitudes 6,529° et 7,222° E. Cette région fait partie des Hauts Plateaux orientaux et se caractérise par une diversité écologique marquée, en lien avec sa topographie accidentée et son climat de transition entre zones méditerranéennes au nord et steppiques au sud.

La wilaya de Khenchela est délimitée au nord par la wilaya d'Oum El Bouaghi, à l'est par Tébessa, au sud par El oued, et à l'ouest par Batna et Biskra. Elle s'étend sur une superficie d'environ 9 811 km<sup>2</sup> et comprend 21 communes. L'altitude varie considérablement sur l'ensemble de son territoire, allant d'environ 800 m dans les plaines du sud jusqu'à plus de 2 300 m dans les régions montagneuses du massif de l'Aurès, où se trouve notamment le mont Chelia, le point culminant du nord de l'Algérie (2 328 m).

Le relief de la wilaya est dominé par les chaînes de l'Aurès, entrecoupées de plaines et de vallées fertiles telles que la vallée d'Oued El Arab. Ce contexte géographique confère à Khenchela une grande hétérogénéité climatique. Le nord de la wilaya bénéficie d'un climat subhumide à hiver froid, avec des précipitations atteignant parfois 600 mm par an, tandis que le sud adopte un caractère semi-aride avec des précipitations plus faibles et une évapotranspiration élevée. Cette variabilité climatique, conjuguée à la diversité des altitudes, génère des habitats potentiels favorables à différents arthropodes vecteurs, notamment les phlébotomes.

Par ailleurs, la wilaya de Khenchela appartient au bassin hydrographique constantinois, où plusieurs oueds temporaires assurent l'humidité saisonnière, facteur favorable à la reproduction des insectes hématophages. Cette région a enregistré ces dernières années une recrudescence des cas humains de leishmaniose cutanée, ce qui renforce l'intérêt d'une analyse spatiale et écologique de la dynamique des vecteurs dans ce territoire spécifique.

### 2. Données d'occurrences

Les données d'occurrences utilisées dans cette étude proviennent principalement des cas humains autochtones de leishmaniose, lesquels sont considérés comme des indicateurs indirects pertinents de la présence et de l'activité des phlébotomes vecteurs dans l'environnement. Cette approche épidémiologique est justifiée par les difficultés techniques liées à la capture directe des phlébotomes, qui sont des insectes de petite taille, nocturnes, à densité souvent faible et fluctuante, et pour lesquels les analyses moléculaires nécessaires à la confirmation de l'infection représentent un coût et une complexité importants. Par conséquent, la survenue d'un cas autochtone est fortement corrélée à la présence locale du vecteur porteur de *Leishmania* spp. (Peterson, 2014 ; Escobar et al., 2016).

#### 2.1. Approche épidémiologique centrée sur les cas humains

Les données sanitaires ont été collectées auprès de différentes sources dans la wilaya de Khenchela, notamment :

- Les dossiers médicaux des patients hospitalisés ou suivis dans les établissements de santé locaux, tels que les hôpitaux de Khenchela, Kaïs, et El Hamma ;
- Les rapports hebdomadaires et mensuels de la Direction de la Santé (DDS), en particulier ceux du service de prévention et d'épidémiologie ;
- Les fiches de notification obligatoire des cas de leishmaniose, dans le cadre du système national de surveillance des maladies transmissibles.

Seuls les cas autochtones confirmés cliniquement et/ou biologiquement ont été retenus. Les formes cutanées ont été diagnostiquées sur la base d'un examen clinique associé à un examen parasitologique (frottis ou culture), tandis que les formes viscérales ont été identifiées selon des critères cliniques, biologiques et sérologiques.

2.2. Enquête épidémiologique ciblée

Une fiche d'enquête standardisée (Annexe I) a été mise en place pour chaque patient tout d'abord afin de reconstituer le parcours d'exposition probable au vecteur, puis pour identifier les facteurs de risque environnementaux, comportementaux et domestiques, et enfin, pour recueillir des données géolocalisées approximatives sur le lieu probable de contamination.

Les rubriques interrogées incluaient les caractéristiques sociodémographiques (âge, sexe, profession, niveau d'instruction), les conditions d'habitat (type de construction, fissures, humidité, présence d'animaux domestiques ou sauvages), les habitudes de vie (sommeil en extérieur, usage de moustiquaire, activités nocturnes), les déplacements récents en zones rurales ou forestières, ainsi que l'historique des symptômes (date d'apparition, nature et évolution des lésions). Les enquêtes ont été réalisées en face-à-face, après obtention du consentement éclairé, dans le respect strict de la confidentialité. Les données collectées ont été géoréférencées manuellement à partir d'adresses connues ou à l'aide de coordonnées GPS relevées sur le terrain. (Annexe I).



SEMEP KAIS

**ENQUETE EPIDEMIOLOGIQUE  
LEISHMANIOSES**

**I) CARACTERISTIQUES :**

Nom : ..... Prénom : .....  
 Age : ..... Ans ..... Sexe : .....  
 Adresse : ..... Commune : .....  
 Profession : .....

**II) RESULTATS DU LABORATOIRE :**

Date de prélèvement : ..... Date d'examen : .....  
 -Présence du corps de leishmania : .....

**III) SIEGE DE LESIONS :**

Nombre de lésions : .....

**IV) RENSEIGNEMENTS EPIDEMIOLOGIQUES :**

- Leishmaniose viscérale ( KALA- AZAR ) - Leishmaniose cutanée

**ORIGINE DE LA CONTAMINATION**

Contamination probable région de .....

-Dernier déplacement de malade ( voyage):  
 - Lieu du voyage : à ..... Date : .....  
 Y'a t-il d'autre cas dans l'entourage ? :  OUI  NON  
 Si oui préciser le nom et prénom : .....

**V) - CONDITION D'HYGIENE :**

- L'habitation est favorable aux rongeurs  OUI  NON  
 - Nature de point d'eau d'alimentation : .....  
 - Etat de salubrité de cette eau : .....

**VI) -ENVIRONNEMENT IMMEDIAT**

- Présence d'eau stagnante :  OUI  NON  
 - Evacuation des eaux usées a ciel ouvert  OUI  NON  
 - Système d'évacuation des eaux usées : .....  
 - Nature de décharge publique : .....  
 - Etat du vide sanitaire (bâtiment): .....

Date : .....

Figure 1 : photo d'une enquête avec un sujet hospitalisé (Menzer, 2024)

### 2.3 Traitement des données d'occurrence

Les points d'occurrence issus des cas humains géolocalisés ont été traités conformément aux meilleures pratiques pour la modélisation écologique. Afin d'assurer la qualité des données, les doublons, données manquantes ou incertaines ont été éliminés. Pour réduire l'autocorrélation spatiale, susceptible de biaiser les résultats, une raréfaction des données a été appliquée en imposant une distance minimale d'un kilomètre entre les points d'occurrence, à l'aide du package *spThin* sous R Studio v1.1.463 (R Core Team, 2020), selon les recommandations de Brown et al. (2017).

Les données finales ont été organisées dans un fichier CSV structuré en colonnes distinctes : date, âge, sexe, région, longitude, latitude, et source des données (dossiers médicaux, DDS, enquêtes épidémiologiques) (Annexe I).

## 3. Données environnementales

La modélisation écologique menée dans le cadre de cette étude repose sur un ensemble de 19 variables bioclimatiques (Tableau 1) extraites de la base de données WorldClim v1.4, à une résolution spatiale de 2,5 arc-minutes (Hijmans et al., 2005). Ces variables, classiquement désignées de BIO1 à BIO19, se rapportent respectivement aux conditions thermiques (BIO1 à BIO11) et pluviométriques (BIO12 à BIO19) caractérisant les régimes climatiques régionaux. Les données correspondent à la période 1960–1990, reconnue comme la période de référence actuelle dans de nombreuses études de modélisation, en raison de l'indisponibilité en libre accès des séries climatiques plus récentes couvrant 1990–2020. Les projections climatiques futures, quant à elles, ont été intégrées pour les périodes 2040-2060 centrées sur l'année 2050, et la période 2060-2080 correspondant à une moyenne centrée sur l'année 2070, selon deux scénarios représentatifs d'émission de gaz à effet de serre (Representative Concentration Pathways – RCP) : RCP 2.6, et 8.5, traduisant respectivement des hypothèses optimiste et pessimiste en matière de réchauffement climatique.

Les couches environnementales ainsi obtenues ont été soumises à une extraction spatiale ciblée, en restreignant leur étendue géographique à la région d'étude

représentée par la wilaya de Khenchela. Cette zone se distingue par une forte hétérogénéité écologique, conditionnée par des gradients d'altitude, de température et de précipitations, qui peuvent influencer directement la répartition potentielle des phlébotomes vecteurs. Les opérations de projection spatiale et de découpage géographique ont été réalisées à l'aide de la boîte à outils SDM Toolbox intégrée dans le logiciel ArcGIS v10.4.

Dans un souci de rigueur méthodologique, quatre variables bioclimatiques ont été exclues de l'analyse finale : BIO8, BIO9, BIO18 et BIO19. Ces variables, relatives aux moyennes de température et de précipitation des trimestres extrêmes (les plus chauds, les plus froids, les plus secs et les plus humides), présentent des discontinuités spatiales marquées entre pixels adjacents. Comme le soulignent Escobar et al. (2014), de telles irrégularités peuvent générer des artefacts dans les prédictions et nuire à la stabilité des modèles.

La délimitation de l'aire accessible (zone M) s'est appuyée sur les distances maximales de dispersion des phlébotomes documentées dans la littérature. Sur la base des travaux de Marini et al. (2010), Brave et al. (2011) et Marini et al. (2019), une distance de 200 mètres a été retenue comme rayon tampon autour des points d'occurrence, cette valeur reflétant les capacités de déplacement observées dans divers contextes épidémiologiques et écologiques.

L'identification et l'exclusion des variables redondantes ont été assurées par une analyse de la colinéarité basée sur des seuils de corrélation variant de 0,6 à 0,9. Cette étape a été réalisée au moyen du package « usdm » sous R Studio v1.1.463 (Naïmi, 2017), et les résultats ont été systématiquement croisés avec les outils de diagnostic disponibles dans SDM Toolbox. Cette approche a permis de retenir un sous-ensemble de variables faiblement corrélées, maximisant la robustesse statistique des modèles tout en assurant leur interprétabilité écologique.

**Tableau 1:** Liste des variables environnementales et bioclimatiques incluses dans la modélisation des niches écologiques des phlébotomes

<b>Variable</b>	<b>Explication</b>	<b>Unité</b>	<b>Echelle</b>
Bio1	Température moyenne annuelle	C°	Annuelle
Bio2	Ecart diurne moyen (moyennes mensuelles)	C°	Variation
Bio3	Isothermalité (Bio2*100/Bio7)	%	Variation
Bio4	Saisonnalité des températures (Ecart type*100)	C°	Variation
Bio5	Température maximale du mois le plus chaud	C°	Mensuelle
Bio6	Température minimale du mois le plus froid	C°	Mensuelle
Bio7	Ecart annuel de températures (Bio5 – Bio6)	C°	Annuelle
Bio8	Température moyenne du trimestre le plus humide	C°	Trimestrielle
Bio9	Température moyenne du trimestre le plus sec	C°	Trimestrielle
Bio10	Température moyenne du trimestre le plus chaud	C°	Trimestrielle
Bio11	Température moyenne du trimestre le plus froid	C°	Trimestrielle
Bio12	Précipitations annuelles	mm	Annuelle
Bio13	Précipitations du mois le plus humide	mm	Mensuelle
Bio14	Précipitations du mois le plus sec	mm	Mensuelle
Bio15	Saisonnalité des précipitations (coefficient de	%	Variation
Bio16	Précipitations du trimestre le plus humide	mm	Trimestrielle
Bio17	Précipitations du trimestre le plus sec	mm	Trimestrielle
Bio18	Précipitations du trimestre le plus chaud	mm	Trimestrielle
Bio19	Précipitations du trimestre le plus froid	mm	Trimestrielle

#### 4. Modélisation des niches écologiques

Afin de croiser les données d'occurrence des phlébotomes porteurs de leishmanies avec les informations bioclimatiques de la wilaya de Khenchela, nous avons utilisé le logiciel Maxent (version 3.4.4). Ce programme repose sur le principe de l'entropie maximale, ce qui présente l'avantage de ne pas nécessiter de données d'absence (Phillips et al., 2006).

Dans cette modélisation, nous avons exploré 17 valeurs différentes du multiplicateur de régularisation (allant de 0,1 à 10), en testant toutes les combinaisons possibles des types de fonctions (linéaire, quadratique, produit, charnière et seuil). Nous avons également appliqué quatre seuils de corrélation entre les variables bioclimatiques (0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 0,9) pour éviter les redondances.

L'évaluation des modèles a été faite selon plusieurs critères : le taux d'omission à un seuil de présence de 5 %, l'analyse ROC partielle, ainsi que l'AICc (Critère d'information d'Akaike corrigé) tel que proposé par Hurvich et Tsai (1989), et utilisé par Peterson et al. (2011). Le meilleur modèle est celui avec la plus faible valeur d'AICc. Sa performance a ensuite été vérifiée grâce à l'AUC (aire sous la courbe ROC), selon l'échelle suivante (Hosmer & Lemeshow, 2000) :

- AUC = 0,5 : absence de discrimination.
- 0,5 à 0,6 : discrimination faible mais acceptable.
- 0,6 à 0,7 : bonne.
- 0,7 à 0,8 : très bonne.
- 0,8 à 0,9 : excellente.
- 0,9 : exceptionnelle.

Pour les projections climatiques futures, nous avons appliqué les caractéristiques du modèle sélectionné à des données climatiques projetées selon deux scénarios de réchauffement climatique : l'un optimiste, l'autre pessimiste.

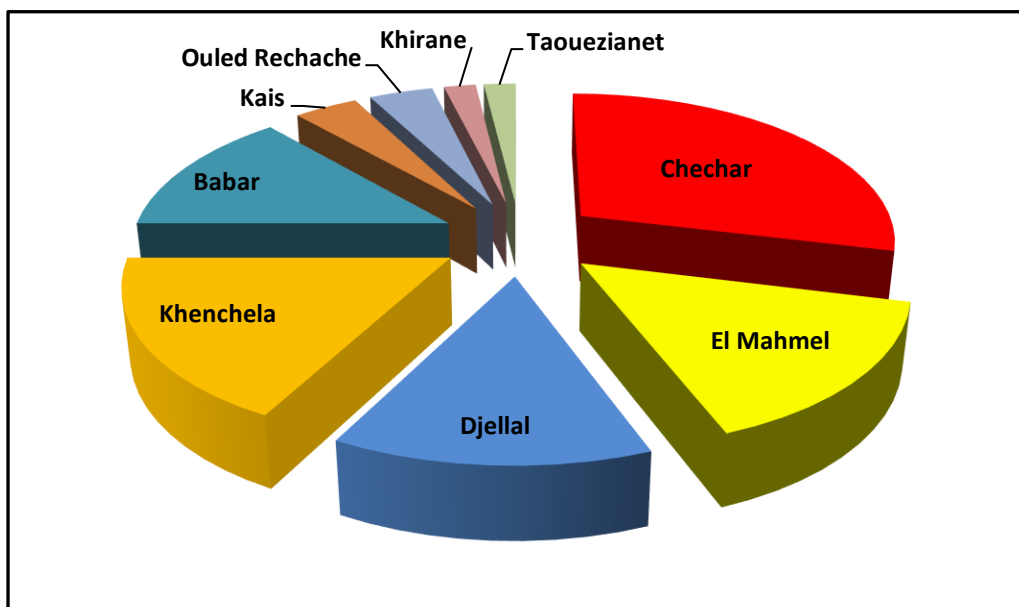
Enfin, comme le suggèrent Escobar et al. (2018), nous avons converti les résultats obtenus par Maxent en cartes binaires de présence/absence, jugées plus faciles à interpréter que les cartes continues. Cette transformation a été réalisée sous QGIS, en utilisant un seuil logistique de présence de 10 centiles.

# Résultats

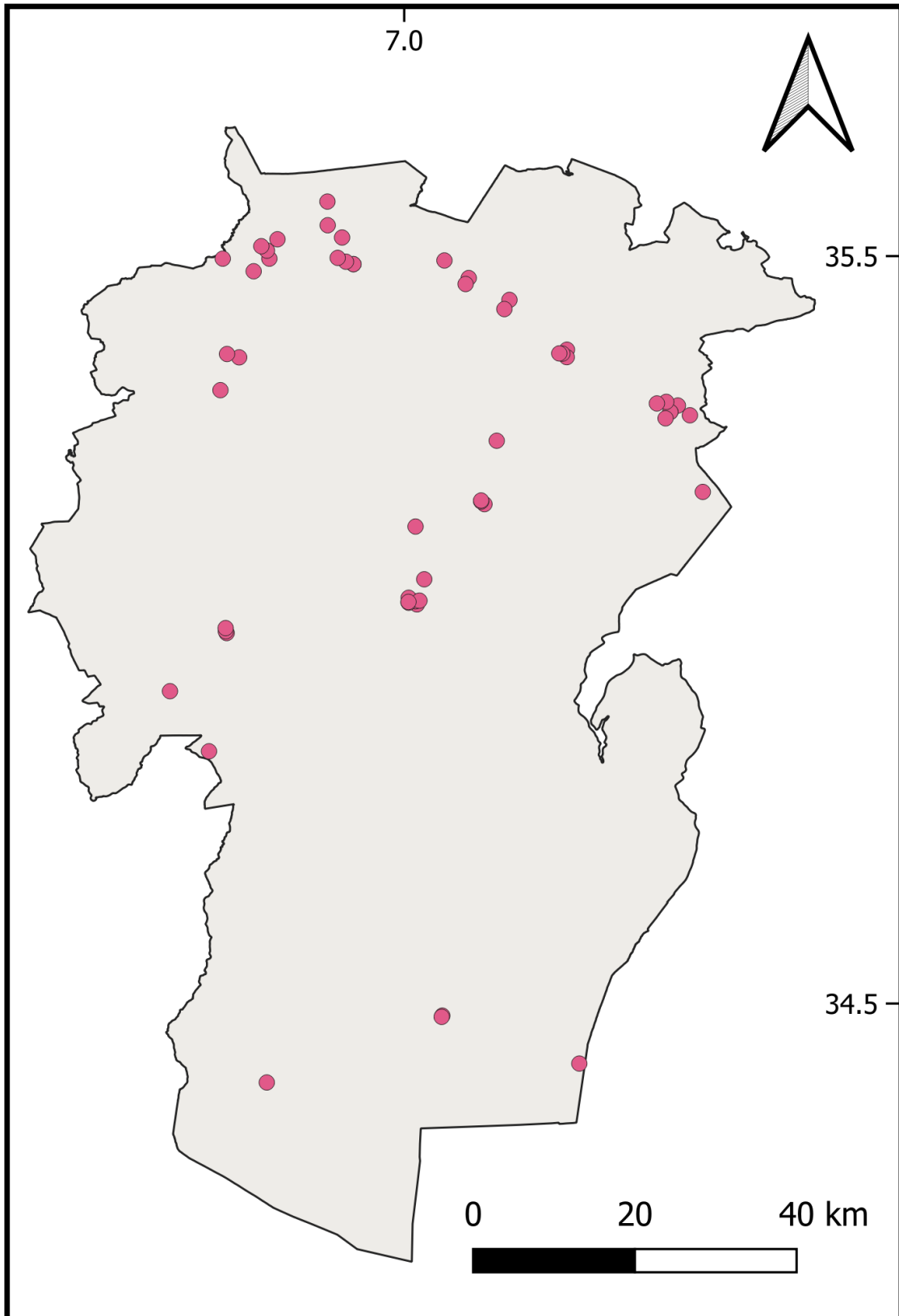
Pour les études de la distribution potentielle du phlébotome dans le Nord-Est de l'Algérie (Khenchela), et de l'effet du changement climatique futur sur cette distribution, plusieurs modèles écologiques ont été développés sur la base d'une combinaison de données d'occurrences et de variables bioclimatiques.

### 1. Données d'occurrence employées

La compilation de différentes sources de données précédemment citées a permis d'obtenir plus de 52 points d'occurrence de phlébotome. Après la suppression des données manquantes et incertaines, et l'application d'un filtre d'1 km de distance minimale entre les points, 54 points ont été retenus pour l'analyse. Ces points sont distribués sur 15 localités (généralement commune) à savoir : Khenchela, Chechar, Babar, Khirane, Ain Djarbouàa, EL Maita, Ain touila, El Mahmal, Ouled Rechache, Kais, Taouziant, Remila, Chelia, Bouhmama, EL Hamma et EL Oualdja. Les localités les plus représentées étaient : Chechar, Ouled Rechache et Taouzianet avec 7 points, puis Babar, El Maita et Kais avec 4 points, ensuite, Rémila, Khirane et El Hamma avec 3 points chacune, Khenchela et Chelia avec 2 points. Les autres communes (Ouledja, Ain Djarbouà, et Bouhmama) ont contribué avec un seul point (Figure 23 ; Figure 24).



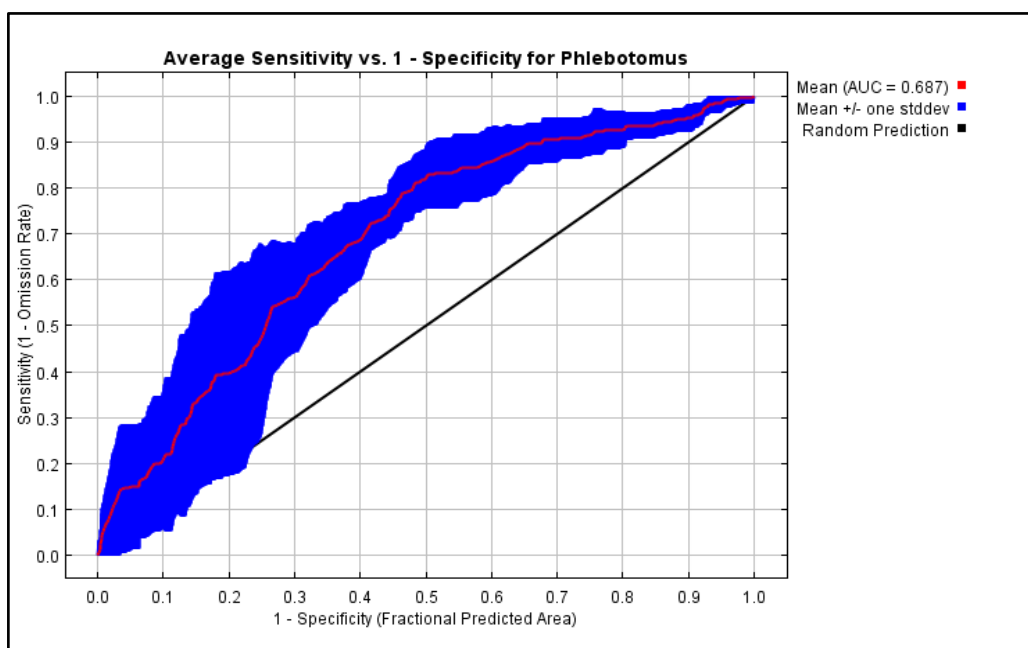
**Figure 23** : Distribution des cas de leishmaniose détectée sur les communes de la Wilaya de Khenchela



**Figure 24 :** Données d'occurrences de phlébotome dans la Wilaya de Khenchela

## 2. Performances du modèle

Lors de l'analyse des réponses des populations du phlébotome face au changement climatique, un total de 1581 modèles candidats ont été testés. Parmi cet ensemble, 1490 modèles ont été statistiquement significatives. Au final, 53 modèles ont répondu aux critères AICc. Le modèle final sélectionné avait un multiplicateur de régularisation égale à 2 et la combinaison des classes d'entité Linéaire et Quadratique (LQ), avec un seuil de corrélation de 0,8 entre les variables bioclimatiques. La valeur AUC issue de ces projections était supérieur à la prédiction aléatoire (AUC de  $0,687 \pm 0,093$ ) (Figure 25). Cette valeur indique que le modèle climatique est considéré comme bon à très bon et ses résultats pourront être exploités. Ces résultats nous permettent aussi d'accéder aux projections futures en adoptant les paramètres de ce modèle (M\_2\_F\_LQ\_080).



**Figure 25 :** Output de la courbe ROC mentionnant l'aire sous la courbe AUC

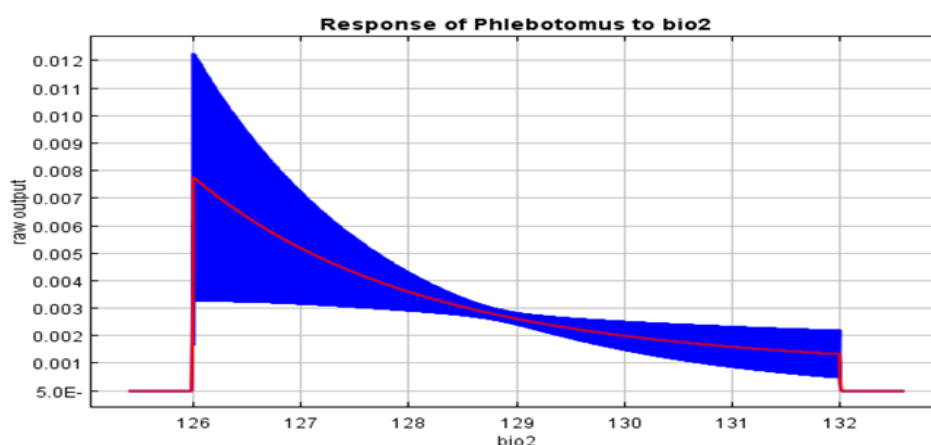
### 3. Contribution climatique

Parmi les 19 variables environnementales utilisées pour cette modélisation (Tableau 1), 15 ont été présents lors du lancement de la modélisation cela après la suppression des quatre variables bioclimatiques Bio 8, Bio 9, Bio 18, et Bio 19. Après la projection des données bioclimatique sur la Wilaya de Khenchela, le modèle sélectionné qui appliquait un seuil de corrélation de 0,8 entre les variables bioclimatiques, était composé seulement de deux variables bioclimatiques à savoir : la Température moyenne annuelle (Bio 1), l’Ecart diurne des températures (Bio 2). La contribution majeure était celle de l’Ecart diurne des températures (Bio 2) avec un pourcentage de contribution de 82,1%. La Température moyenne annuelle (Bio 1) a complété le reste avec une contribution de 17,9 (Tableau 2).

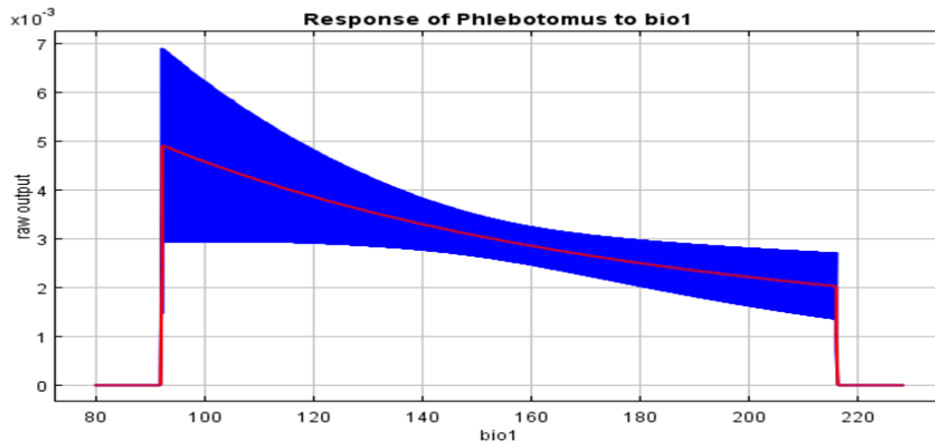
**Tableau 2:** Pourcentages des contributions des variables dans le modèle sélectionné.

Variable bioclimatique	Pourcentage de contribution (%)	Importance de permutation (%)
Bio 2	82,1	76,1
Bio 1	17,9	23,9

Les courbes de contribution ont révélé des corrélations négatives entre la probabilité de présence de phlébotomes porteurs de leishmania et ces deux variables (Figure 25 ; Figure 26).



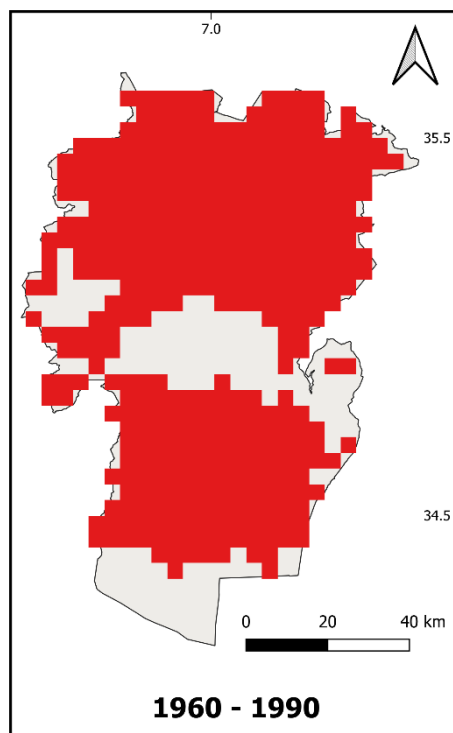
**Figure 26 :** Probabilité de présence des phlébotomes selon l’écart diurne des températures.



**Figure 27 :** Probabilité de présence des phlébotomes selon la température annuelle.

#### 4. Prédiction actuelle

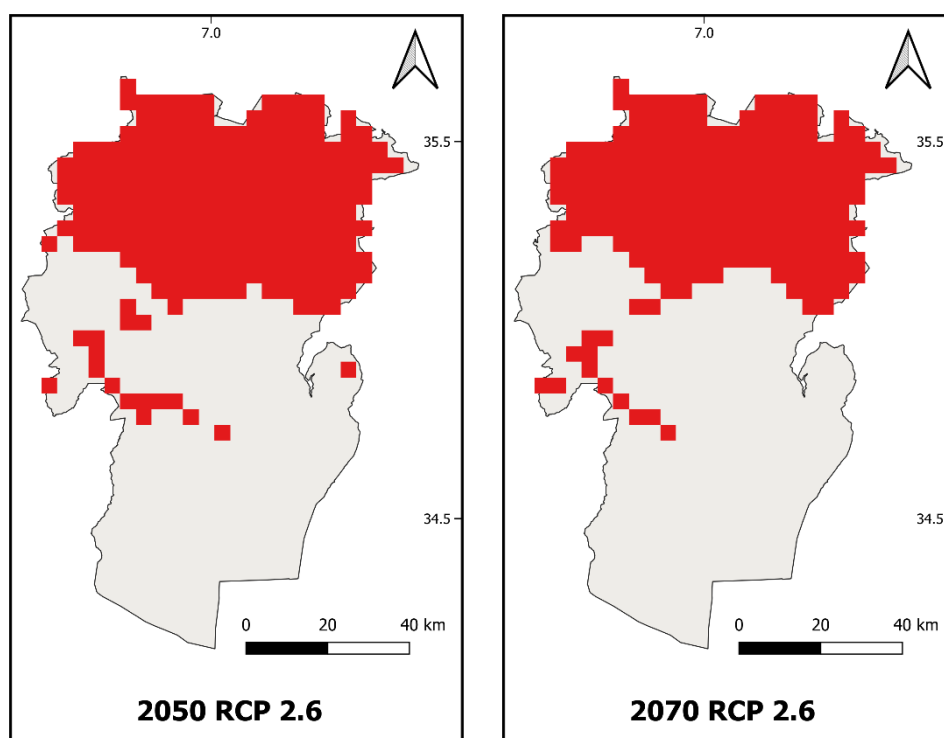
Les prédictions actuelles du modèle bioclimatique sont compatibles avec les points de présence phlébotomes vecteurs de leishmaniose dans la Wilaya de Khenchela. Ce qui indique que ces populations sont en équilibre avec les conditions climatiques actuelles. Les régions concernées couvrent la majorité de la Wilaya y compris le nord et le sud, avec des niches non favorables à l'accueil des phlébotomes au niveau du centre et de l'extrême sud (Figure 26).



**Figure 28 :** Prédications des niches écologiques actuelles des phlébotomes

## 5. Prévisions futures

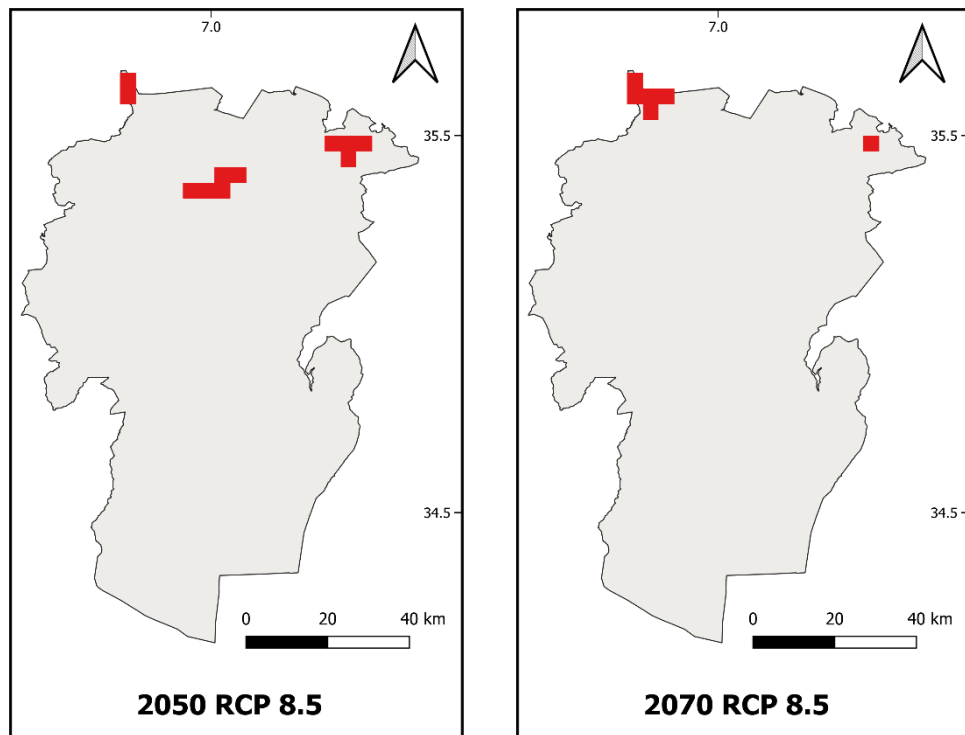
Lors des prochaines décennies, et sous tous les scénarios en relation avec le dégagement des gaz à effet de serre, les niches climatiquement favorables à l'accueil des populations des phlébotomes connaîtront une contraction corrélée avec le taux du réchauffement climatique qui va toucher la wilaya de Khenchela. En effet, selon le scénario optimiste RCP 2.6, dans lequel le taux du forçage radiatif ne dépassera pas  $2.6\text{w/m}^2$ , les prédictions de 2050 puis celles de 2070 indiquent que la totalité du sud de la Wilaya de Khenchela n'abritera plus de populations de phlébotomes porteurs de leishmania. C'est seulement le nord de la wilaya qui demeurera concerné par cette infection avec quelques petites niches isolées à Djelal et El Oueldja (Figures 28).



**Figure 29 :** Prévisions de la distribution potentielle de phlébotomes dans la wilaya de Khenchela en 2050 et en 2070 selon le scénario moyen RCP 2.6

Plus gravement, le scénario pessimiste de RCP 8,5 relatif à un réchauffement terrestre extrême, les niches écologiques des phlébotomes connaîtront un rétrécissement notable. En effet, en 2050, seulement les communes de Rémila, Khenchela et Ain Touila pourront présenter des conditions favorables à ces insectes. Plus loin, en 2070, la région de Rémila et un petit foyer à Ain Touila constitueront les seuls endroits à contrôler dans le cadre de la maîtrise de la

leishmaniose (Figure 29).



**Figure 30** : Prévisions de la distribution potentielle de phlébotomes dans la wilaya de Khenchela en 2050 et en 2070 selon le scénario moyen RCP 8.5

# **Discussion**

Le présent travail s'intéresse aux facteurs environnementaux influençant la répartition des phlébotomes dans la wilaya de Khenchela, à l'identification des zones écologiquement favorables à leur présence, ainsi qu'à l'évaluation de leurs réponses face aux scénarios de changement climatique projetés pour les prochaines décennies. Les modèles obtenus ont permis d'apporter des éléments de réponse à ces problématiques. Ainsi, la présence des phlébotomes dans la région est fortement corrélée à des écarts diurnes de températures modérés. Les zones les plus favorables à leur établissement se situent dans la majorité des territoires de la Wilaya. En revanche, le centre et l'extrême sud présentent des conditions climatiques moins propices. Enfin, sous l'effet du réchauffement climatique, les niches écologiques favorables aux phlébotomes devraient connaître des régressions importantes, surtout dans le scénario pessimiste RCP 8.5, traduisant une réduction des habitats viables avec l'augmentation du forçage radiatif.

### 1. Température moyenne annuelle

Selon les résultats de notre modélisation, la température moyenne annuelle apparaît comme l'un des facteurs déterminants de la distribution spatiale des phlébotomes dans la wilaya de Khenchela. Une corrélation négative a été observée entre cette variable bioclimatique et la probabilité de présence des espèces vectrices, suggérant que des conditions thermiques relativement stables et modérément élevées favorisent leur développement, leur survie et leur reproduction. Cette observation est en accord avec plusieurs études ayant démontré que la température influence de manière significative les traits biologiques et comportementaux des phlébotomes, notamment les espèces du genre *Phlebotomus*, vecteurs de la leishmaniose (Killick-Kendrick, 1999 ; Gálvez et al., 2010).

La température agit à différents niveaux du cycle biologique de ces insectes. Des températures moyennes plus élevées, dans une fourchette optimale, accélèrent le développement embryonnaire, raccourcissent la durée des stades larvaires et nymphaux, et augmentent la fréquence des cycles gonotrophiques chez les femelles adultes (Ready, 2013). Par ailleurs, ces conditions thermiques améliorent la survie des adultes, allongent leur durée de vie et accroissent leur capacité vectorielle, en réduisant

notamment la période d'incubation extrinsèque du parasite *Leishmania* dans le tube digestif du vecteur (Casanova et al., 2013 ; Alten et al., 2016).

L'association identifiée dans cette étude est donc probablement liée à ces effets cumulatifs de la température sur les paramètres de développement, de reproduction et de compétence vectorielle. Les zones de la wilaya présentant une température moyenne annuelle comprise entre 15 et 20°C, comme certaines localités du nord (Ouled Rechache, Bouhmama, El Mahmel, Kais), semblent particulièrement favorables à l'établissement durable des populations de phlébotomes. Toutefois, il convient de souligner que cette relation n'est pas strictement linéaire. Des températures excessives peuvent altérer la survie des larves, dessécher les gîtes larvaires et réduire le taux de fécondité, notamment dans les régions plus arides ou méridionales (Maroli et al., 2013). Enfin, d'autres facteurs abiotiques tels que l'humidité relative, la couverture végétale et la disponibilité des hôtes vertébrés sont également susceptibles d'interagir avec la température pour moduler la répartition réelle des populations de phlébotomes (Kamhawi, 2006 ; Tabbabi, 2019).

## 2. Écart diurne des températures

L'écart diurne des températures, défini comme la différence entre les températures maximales et minimales au cours d'une même journée, constitue la variable bioclimatique la plus déterminante dans la distribution écologique des phlébotomes. Dans le contexte de la wilaya de Khenchela, nos résultats suggèrent une relation négative entre cet écart thermique et la probabilité de présence des phlébotomes, ce qui signifie que des amplitudes thermiques quotidiennes trop élevées tendent à limiter leur développement et leur implantation durable. Ce constat est en accord avec les travaux antérieurs ayant montré que les phlébotomes sont particulièrement sensibles aux variations brutales de température, surtout dans les environnements à climat continental marqué, comme ceux de l'intérieur algérien (Alten et al., 2016 ; Azizi et al., 2017).

Les phlébotomes, en tant que diptères de petite taille et à cuticule fine, présentent une forte vulnérabilité aux stress thermiques, notamment lorsque les variations de température entre le jour et la nuit dépassent certains seuils physiologiques. Une trop grande amplitude diurne peut affecter négativement leur

métabolisme, compromettre le développement des stades immatures dans le sol et réduire le taux de survie des adultes (Ready, 2013). De plus, les fluctuations extrêmes de température peuvent ralentir la maturation du parasite *Leishmania* dans le tube digestif du vecteur, ce qui diminue leur compétence vectorielle (Gálvez et al., 2010 ; Maroli et al., 2013).

Dans les communes du sud et du centre de la wilaya, telles que Djellal, El Ouedja, ou le sud de Babar, l'écart diurne des températures dépasse souvent 15°C en période estivale, ce qui pourrait expliquer la faible probabilité d'y trouver des niches climatiques favorables pour les phlébotomes lors de cette saison. À l'inverse, les zones du nord-ouest de Khenchela, comme Chelia, Bouhmama ou Remila, bénéficient de conditions thermiques plus modérées et d'un écart diurne réduit, créant ainsi un microclimat plus stable et propice à la survie et à l'activité des vecteurs.

Ainsi, l'écart diurne des températures apparaît non seulement comme un facteur limitant la répartition géographique des phlébotomes, mais aussi comme un indicateur indirect de la stabilité climatique des habitats potentiels. Cette variable doit donc être intégrée de manière prioritaire dans les modèles de distribution écologique, notamment dans les contextes semi-arides et montagnards du nord-est algérien.

### 3. Répartition actuelle

La prédiction actuelle reflète une hétérogénéité écologique marquée, largement conditionnée par les caractéristiques topographiques, climatiques et anthropiques propres à chaque commune. Les zones les plus favorables à la présence des phlébotomes se localisent principalement dans la moitié nord de la wilaya, notamment dans des communes telles que Ouled Rechache, El Mahmel, Bouhmama, Chelia, Yabous, Taouzient, Kais, Remila, Tamza, Ensigna, Baghai, M'toussa, Aïn Touila et certaines portions du sud de Babar et de Khirane. Ces territoires sont généralement caractérisés par un relief accidenté à moyenne altitude, une couverture végétale encore partiellement conservée, et un climat plus tempéré avec des étés modérément chauds et des hivers froids mais non extrêmes, offrant ainsi des conditions favorables à la survie et à la reproduction des phlébotomes (Gálvez et al., 2010 ; Maroli et al., 2013).

Ces régions présentent en outre une densité modérée d'habitat humain dispersé, souvent de type rural ou semi-rural, associé à une présence animale constante (chiens,

ovins, bovins) à proximité des habitations, ce qui constitue un environnement propice au maintien des cycles zoonotiques de *Leishmania* (Depaquit et al., 2008). L'humidité relative, bien que modeste, y reste suffisante grâce à la végétation naturelle, aux points d'eau (sources, oueds) et aux pratiques agricoles traditionnelles. L'ensemble de ces facteurs combinés crée un microclimat et un écosystème favorables à l'établissement de populations stables de phlébotomes vecteurs, notamment les espèces du complexe *Phlebotomus perniciosus* ou *Phlebotomus papatasi*, connues pour leur rôle épidémiologique en Méditerranée (Ready, 2013 ; Tabbabi, 2019).

En revanche, une bande centrale, s'étendant approximativement entre les latitudes 35.10°N et 35.30°N, constitue une zone peu favorable à l'implantation des phlébotomes. Cette bande traverse des communes comme El Ouedja, Djellal, Chechar, ainsi que l'est de Babar, M'Sara, et le sud-ouest de Babar. Elle est dominée par un climat aride à semi-aride, avec des écarts diurnes de température importants, une végétation clairsemée, des sols peu humides, et une altitude soit trop élevée soit trop variable, limitant ainsi la stabilité des microhabitats nécessaires au développement larvaire des phlébotomes (Alten et al., 2016). L'habitat y est souvent très dispersé ou désertique, et les conditions d'hygiène autour des habitations ne favorisent pas la formation de gîtes de ponte adaptés.

Un facteur biotique entre en jeu. Bien que le sud de la wilaya ne représente pas des conditions optimales pour la prolifération de ces insectes, nous pensons que le nombre de cas élevé enregistré dans ce secteur est lié principalement à la présence de grandes populations d'un rongeur endémique : le Gondi de l'Atlas *Ctenodactylus gundi*. En effet, cet animal pourrait constituer un réservoir majeur des parasites *Leishmania*.



**Figure 31** : Gondi de l'Atlas *Ctenodactylus gundi* (Source : Benmokhtar, 2020)

#### 4. Réponse au changement climatique

Les prévisions climatiques issues de la modélisation écologique réalisée dans le cadre de cette étude suggèrent une contraction significative des niches écologiques favorables aux phlébotomes vecteurs de la leishmaniose dans la région de Khenchela, et ce, selon tous les scénarios climatiques testés (RCP 2.6 et 8.5). Cette tendance souligne la complexité des interactions entre le changement climatique et la dynamique spatiale des vecteurs de maladies vectorielles comme les phlébotomes, en particulier dans les zones semi-arides du nord-est Algérien.

Contrairement aux prédictions d'expansion de certaines espèces de vecteurs sous un réchauffement climatique modéré (El Omari et al., 2023), nos résultats indiquent que des niveaux élevés de forçage radiatif pourraient au contraire réduire l'étendue géographique favorable à ces espèces, notamment en altitude et dans les zones forestières de l'Aurès. Cette contraction peut être attribuée à plusieurs facteurs écophysiologiques. En premier lieu, les températures excessives peuvent dépasser les seuils de tolérance thermique des phlébotomes, affectant négativement leur survie, leur reproduction et leur capacité de dispersion (Casanova et al., 2013). Les stades immatures, particulièrement sensibles à la dessiccation, pourraient voir leur développement compromis par des étés plus longs, plus chauds et plus secs.

Ensuite, la rareté croissante des microhabitats humides et ombragés – essentiels à la reproduction des phlébotomes – pourrait résulter de la diminution des précipitations et de la dégradation de la couverture végétale. Ces habitats, comme les terriers de rongeurs, les litières végétales ou les fissures ombragées du sol, sont particulièrement vulnérables aux événements climatiques extrêmes (sécheresses prolongées, feux de forêts, crues soudaines) induits par le réchauffement (Kuhlow, 1987 ; Alten et al., 2016).

Enfin, les modifications attendues de la phénologie des hôtes réservoirs, notamment les populations du Gondi de l'Atlas ou canidés, pourraient altérer l'équilibre hôte-vecteur-parasite. Une réduction ou un déplacement des populations de réservoirs dans des zones refuges non affectées pourrait compromettre la persistance locale des cycles de transmission de *Leishmania* (Ready, 2013 ; Tabbabi, 2019). Ces changements combinés indiquent une vulnérabilité accrue de l'écosystème entomologique local face aux projections climatiques futures, avec des conséquences directes sur la dynamique de la leishmaniose cutanée dans la wilaya de Khenchela.

# **Conclusion**

Ce travail s'inscrit dans une démarche de compréhension et d'anticipation des effets du changement climatique sur la distribution géographique des phlébotomes, vecteurs de la leishmaniose, dans la wilaya de Khenchela située au nord-est de l'Algérie. En mobilisant la modélisation des niches écologiques à l'aide du logiciel Maxent, nous avons élaboré des modèles prédictifs visant à identifier les zones climatiquement favorables à la présence actuelle et future de ces vecteurs en fonction de différents scénarios climatiques futurs (Elith et al., 2011 ; Phillips et al., 2006).

Les résultats obtenus suggèrent que la répartition actuelle des phlébotomes est particulièrement sensible à l'écart diurne des températures. À l'horizon 2050 - 2070, sous l'effet du réchauffement global, les zones écologiquement favorables à leur persistance dans la wilaya de Khenchela pourraient se contracter significativement. Les simulations indiquent une concentration progressive de ces habitats potentiels vers certaines localités telles que Rémila et Aïn Touila, qui demeureraient compatibles avec les exigences écologiques de ces diptères dans un contexte climatique futur.

Il convient toutefois de souligner une limite importante à cette étude : le nombre restreint de données d'occurrence disponibles, qui a pu réduire la précision spatiale des prédictions. Un échantillonnage plus dense aurait permis une cartographie plus fine et plus robuste, et pourrait améliorer les performances du modèle pour que la valeur AUC dépasse 0,9 (Merow et al., 2013).

Ce constat appelle à intensifier les efforts de surveillance entomologique dans la région, notamment dans les zones rurales encore sous-investiguées. Au-delà de la simple présence des phlébotomes, les recherches futures gagneraient à intégrer des données sur l'abondance et la dynamique saisonnière des populations, afin de mieux cerner les risques épidémiologiques. En effet, la densité vectorielle est un facteur clé dans la transmission de la leishmaniose, comme le souligne l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2017). Les zones à forte vulnérabilité climatique pourraient devenir des foyers épidémiologiques si les conditions bioclimatiques favorables sont réunies de manière prolongée. Par ailleurs, des études longitudinales s'avèrent essentielles pour documenter l'évolution spatio-temporelle des populations de phlébotomes face aux changements climatiques. Une telle approche permettrait de mieux comprendre les processus d'établissement, d'adaptation et de dispersion de ces vecteurs en lien avec les mutations environnementales (Kraemer et al., 2019). L'intégration de données socioéconomiques – telles que les scénarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways)

et de modèles de comportement humain enrichirait également les prédictions écologiques, en capturant les interactions complexes entre le climat, les vecteurs et les dynamiques humaines (Soberón & Peterson, 2015).

Il sera aussi d'intérêt de réaliser des modélisations sur les réservoirs du parasite leishmania, notamment la dynamique des populations du gondi de l'Atlas et leurs réponses face aux changements touchants leurs environnements notamment ceux en relation avec le climat et les activités anthropiques.

En définitive, ce travail met en évidence l'intérêt des outils de modélisation écologique dans la gestion anticipée des risques sanitaires liés aux vecteurs, et souligne la nécessité de stratégies de veille et d'intervention adaptées au contexte climatique en mutation de la wilaya de Khenchela.

# **Références**

# **Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

- Abonnenc, E., & Léger, N. (1976). *Les phlébotomes de la région éthiopienne (Diptera: Psychodidae)* (Mémoires ORSTOM, No. 55, pp. 1–289).
- Addadi, K., Boubidi, S. C., Aoun, K., Harrat, Z., & Chahed, M. K. (2021). Impact des facteurs écologiques sur la dynamique des phlébotomes vecteurs de la leishmaniose en Algérie. *Annales de l'Institut Pasteur de Tunis*, 98(1), 27–38.
- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson, R. P. (2015). spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38(5), 541–545.
- Akhoundi, M., Kuhls, K., Cannet, A., Votýpka, J., Marty, P., Delaunay, P., et al. (2016). A historical overview of the classification, evolution, and dispersion of *Leishmania* parasites and sandflies. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 10(3), e0004349. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0004349>
- Alexander, B., & Maroli, M. (2003). Control of phlebotomine sandflies. *Medical and Veterinary Entomology*, 17(1), 1–18.
- Alexander, B., & Young, D. G. (1992). Biology of phlebotomine sand flies (Diptera: Psychodidae) in relation to leishmaniasis. *Annual Review of Entomology*, 37, 197–217.
- Alexander, B. (2000). Sampling methods for phlebotomine sandflies. *Medical and Veterinary Entomology*, 14(2), 109–122.
- Alten, B., Maia, C., Afonso, M. O., Campino, L., Jiménez, M., González, E., et al. (2016). Seasonal dynamics of *Phlebotomus sergenti* and *P. papatasi* (Diptera: Psychodidae) in southern Europe: Ecological and epidemiological implications. *Acta Tropica*, 164, 259–276.
- Alten, B., Maia, C., Afonso, M. O., Campino, L., Jiménez, M., González, E., et al. (2016). Seasonal dynamics of *Phlebotomus perniciosus* and *P. ariasi* (Diptera: Psychodidae), proven vectors of *Leishmania infantum* in the Mediterranean basin. *Journal of Medical Entomology*, 53(2), 385–393.
- Alten, B., Maia, C., Afonso, M. O., Campino, L., Jiménez, M., González, E., et al. (2016). Seasonal dynamics of *Phlebotomus perniciosus* (Diptera: Psychodidae) and detection of *Leishmania infantum* in southern Europe. *Parasites & Vectors*, 9, 118. <https://doi.org/10.1186/s13071-016-1400-1>
- Alvar, J., Vélez, I. D., Bern, C., Herrero, M., Desjeux, P., Cano, J., et al. (2012). Leishmaniasis worldwide and global estimates of its incidence. *PLoS ONE*, 7(5), e35671. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035671>
- Antinori, S., Schifanella, L., & Corbellino, M. (2012). Leishmaniasis: New insights from an old and neglected disease. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 31(2), 109–118. <https://doi.org/10.1007/s10096-011-1276-0>

## Références Bibliographiques

- Artemiev, M. M. (1991). A revision of sandflies of the subgenus *Larrousius* Nitzulescu, 1931 (Diptera: Phlebotominae, *Phlebotomus*). *Meditinskaya Parazitologiya*, 3, 41–45.
- Azizi, K., Khoramian-Ghadikolaei, K., & Akhavan, A. A. (2017). Effects of environmental variables on distribution and abundance of sand flies (Diptera: Psychodidae) in Iran. *Journal of Arthropod-Borne Diseases*, 11(4), 612–624.
- Basimike, M., & Mutinga, M. J. (1995). The role of *Phlebotomus martini* and *Phlebotomus celiae* (Diptera: Phlebotominae) as vectors of visceral leishmaniasis in Kenya. *Annals of Tropical Medicine & Parasitology*, 89(5), 467–475.
- Bates, P. A. (2018). Transmission of *Leishmania* metacyclic promastigotes by phlebotomine sand flies. *International Journal for Parasitology*, 48(7), 455–463.
- Benallal, K. E., Harrat, Z., Bendjaballah, N., Bouiba, L., & Parola, P. (2020). New data on the presence and distribution of *Phlebotomus* spp. (Diptera: Psychodidae) in Algeria. *Parasites & Vectors*, 13(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s13071-020-04203-2>
- Benallal, K. E., Harrat, Z., Hakkour, M., Abdi, A. M., Abdi, R., Brahimi, K., et al. (2013). Distribution des phlébotomes (Diptera: Psychodidae) et risque de transmission de la leishmaniose dans les zones sahariennes de l'Algérie. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 106(1), 28–33.
- Benavides-Varela, C., Ferro, C., & Gómez-Palacio, A. (2020). Ecological niche modeling of three sand fly species of medical importance in Colombia. *Parasites & Vectors*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s13071-020-04067-6>
- Boubidi, S. C., Chelbi, I., Kaouech, E., Cherni, S., Derbali, M., & Zhioua, E. (2011). Spatial and temporal dynamics of *Phlebotomus papatasi*, the vector of *Leishmania major*, in Tunisia and implications for control. *Parasites & Vectors*, 4, 195. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-4-195>
- Boudrissa, A., Baba Hamed, H., Aoun, K., & Harrat, Z. (2020). Current status of cutaneous leishmaniasis in Algeria: A review. *Infectious Diseases in Clinical Practice*, 28(4), 193–199.
- Boudrissa, A., Boutekdjiret, L., Benbetka, S., Bouiba, L., Ait Belkacem, R., & Harrat, Z. (2012). Étude entomologique sur les phlébotomes (Diptera: Psychodidae) dans un foyer de leishmaniose cutanée à *Leishmania major* à Biskra (Algérie). *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 105(3), 180–187.
- Bravo-Barriga, D., Parreira, R., Maia, C., Afonso, M. O., Blanco-Ciudad, J., Serrano, F. J., et al. (2011). *Phlebotomus perniciosus* (Diptera: Psychodidae) dispersal and *Leishmania infantum* detection in rural environments of south-western Spain. *Parasites & Vectors*, 4, 75. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-4-75>
- Brown, J. L., Bennett, J. R., & French, C. M. (2017). SDMtoolbox 2.0: The next generation Python-based GIS toolkit for ecology, evolution, and conservation. *PeerJ*, 5, e4095. <https://doi.org/10.7717/peerj.4095>

## Références Bibliographiques

- Brown, J. L., Bennett, J. R., & French, C. M. (2017). SDMtoolbox: A Python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(5), 694–700. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12760>
- Caminade, C., McIntyre, K. M., & Jones, A. E. (2019). Impact of recent and future climate change on vector-borne diseases. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1), 157–173. <https://doi.org/10.1111/nyas.13950>
- Casanova, C., Andrighetti, M. T. M., Sampaio, S. M. P., Marcoris, M. L. G., Colla-Jacques, F. E., & Prado, A. P. (2013). Larval development sites of Phlebotominae (Diptera: Psychodidae) in urban areas of southeastern Brazil. *Journal of Vector Ecology*, 38(1), 115–118.
- Dantas-Torres, F., Coutinho, M. T. Z., & Brandão-Filho, S. P. (2014). Phlebotomine sand flies (Diptera: Psychodidae) in the municipality of Bonito, state of Pernambuco, Brazil. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, 47(3), 369–372.
- Depaquit, J., Grandadam, M., Fouque, F., Andry, P., & Peyrefitte, C. (2010). Arthropod-borne viruses transmitted by phlebotomine sandflies in Europe: A review. *Eurosurveillance*, 15(10), 19507.
- Depaquit, J., Léger, N., Ferté, H., et al. (2008). Ecology and vectorial importance of *Phlebotomus papatasi* and other sand fly species in North Africa. *Parasite*, 15(2), 105–112.
- Depaquit, J., Léger, N., & Robert, V. (2010). Les phlébotomes de France (Diptera: Psychodidae): Identification et répartition géographique. *Parasite*, 17(2), 113–125.
- Depaquit, J. (2018). Phlébotomes et leishmanioses : épidémiologie et lutte. *Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France*, 171(2), 106–112. <https://doi.org/10.4267/2042/70042>
- Desjeux, P. (2001). Leishmaniasis: Current situation and new perspectives. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases*, 24(5–6), 305–318.
- Dostalova, A., & Volf, P. (2012). *Leishmania* development in sand flies: Parasite-vector interactions overview. *Parasites & Vectors*, 5, 276. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-5-276>
- Dujardin, J. C., Campino, L., Cañavate, C., Dedet, J. P., Gradoni, L., Soteriadou, K., et al. (2018). Spread of vector-borne diseases and climate change: The example of leishmaniasis. *Acta Tropica*, 190, 329–341. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2018.01.015>
- El Omari, H., Lemrani, M., Mounaji, K., Echchakery, C., Mazzoni, C. J., Kuhls, K., et al. (2017). Predicting environmental suitability and mapping potential risk areas for *Leishmania major* using ecological niche modeling in Morocco. *Acta Tropica*, 170, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2017.02.005>

## Références Bibliographiques

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. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>

Elnaiem, D. A. (2011). Ecology and control of the sand fly vectors of *Leishmania donovani* in East Africa, with special emphasis on *Phlebotomus orientalis*. *Journal of Vector Ecology*, *36*(Suppl 1), S23–S31.

Escobar, L. E., Romero-Alvarez, D., Leon, R., Lepe-Lopez, M. A., Craft, M. E., Borbor-Cordova, M. J., et al. (2016). Declining prevalence of disease vectors under climate change. *Scientific Reports*, *6*, 39150. <https://doi.org/10.1038/srep39150>

Feliciangeli, M. D. (2004). Natural breeding places of phlebotomine sandflies. *Medical and Veterinary Entomology*, *18*(1), 71–80. <https://doi.org/10.1111/j.0269-283X.2004.00421.x>

Fischer, D., Thomas, S. M., Suk, J. E., Sudre, B., Hess, A., Tjaden, N. B., et al. (2011). Climate change effects on Chikungunya transmission in Europe: Geospatial analysis of vector's climatic suitability and virus' temperature requirements. *International Journal of Health Geographics*, *10*, 34. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-10-34>

Gálvez, R., Descalzo, M. A., Miró, G., Jiménez, M. I., Martín, O., Dos Santos-Brandao, F., et al. (2010). Seasonal trends and spatial relations between environmental/meteorological factors and leishmaniasis sand fly vector abundances in Central Spain. *Acta Tropica*, *115*(1–2), 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2010.02.009>

García, A. L., Parrado, R., Rojas, E., Delgado, R., & Dujardin, J. C. (2019). Climate change and the re-emergence of leishmaniasis in the Bolivian Andes: A preliminary assessment using ecological niche modeling. *Acta Tropica*, *191*, 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2018.12.026>

Gebre-Michael, T., & Lane, R. P. (1996). The roles of *Phlebotomus martini* and *P. celiae* (Diptera: Phlebotominae) as vectors of visceral leishmaniasis in the Aba Roba focus, southern Ethiopia. *Medical and Veterinary Entomology*, *10*(1), 53–62. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2915.1996.tb00037.x>

Hanson, W. J. (1968). The immature stages of the subfamily Phlebotominae (Diptera: Psychodidae). *Journal of Medical Entomology*, *5*(Suppl 1), 1–19. [https://doi.org/10.1093/jmedent/5.supplement\\_1.1](https://doi.org/10.1093/jmedent/5.supplement_1.1)

Harrat, Z., Belkaid, M., Aït-Oudhia, K., Guernaoui, S., Guernou, N., Bouiba, L., et al. (2014). Leishmaniasis in Algeria: Current knowledge and future directions. In D. Claborn (Ed.), *Leishmaniasis – Trends in Epidemiology, Diagnosis and Treatment* (pp. 89–118). InTech. <https://doi.org/10.5772/57343>

Harrat, Z., Belkaid, M., Ouerghi, A., Benikhlef, R., & Guernaoui, S. (2018). Leishmaniasis in Algeria: Current status and future prospects. In *Proceedings of the International Congress on Leishmaniasis*. Tunis: Pasteur Institute of Tunis.

## Références Bibliographiques

- Hjira, N., Ait Ourhroui, M., Chiheb, S., Moustadil, F. Z., & Benchikhi, H. (2014). Cutaneous leishmaniasis: About 25 cases. *Pan African Medical Journal*, 17, 272. <https://doi.org/10.11604/pamj.2014.17.272.3586>
- Ilango, K. (2005). Phlebotomine sandflies (Diptera: Psychodidae) of the Indian subcontinent: Infrageneric classification and species group concept. *Oriental Insects*, 39(1), 1–20. <https://doi.org/10.1080/00305316.2005.10417373>
- Institut Pasteur d'Algérie. (2022). *Rapport annuel de surveillance épidémiologique de la leishmaniose en Algérie*. Alger : Institut Pasteur d'Algérie.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Izri, A., Belazzoug, S., Pratlong, F., & Rioux, J. A. (2008). *Phlebotomus ariasi* et *Phlebotomus perniciosus*, vecteurs de la leishmaniose viscérale dans le nord de l'Algérie: Données entomologiques. *Parasite*, 15(1), 73–74. <https://doi.org/10.1051/parasite/2008151073>
- Kamhawi, S. (2006). Phlebotomine sand flies and *Leishmania* parasites: Friends or foes? *Trends in Parasitology*, 22(9), 439–445. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2006.07.004>
- Kaye, P., & Scott, P. (2011). Leishmaniasis: Complexity at the host-pathogen interface. *Nature Reviews Microbiology*, 9(8), 604–615. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2608>
- Killick-Kendrick, R., Leaney, A. J., & Peters, W. (1984). Studies on the biology and control of phlebotomine sandflies in southern France. *Annals of Tropical Medicine & Parasitology*, 78(2), 143–151. <https://doi.org/10.1080/00034983.1984.11811865>
- Killick-Kendrick, R. (1990). Phlebotomine vectors of the leishmaniasis: A review. *Medical and Veterinary Entomology*, 4(1), 1–24. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2915.1990.tb00255.x>
- Killick-Kendrick, R. (1999). The biology and control of phlebotomine sand flies. *Clinics in Dermatology*, 17(3), 279–289. [https://doi.org/10.1016/S0738-081X\(99\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0738-081X(99)00046-2)
- Killick-Kendrick, R. (1990). The life-cycle of *Leishmania* in the sandfly with special reference to the form infective to the vertebrate host. *Annales de Parasitologie Humaine et Comparée*, 65(Suppl. 1), 37–42.
- Kilpatrick, A. M., & Randolph, S. E. (2012). Drivers, dynamics, and control of emerging vector-borne zoonotic diseases. *The Lancet*, 380(9857), 1946–1955. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61151-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61151-9)
- Kraemer, M. U. G., Reiner, R. C., Jr., Brady, O. J., Messina, J. P., Gilbert, M., Pigott, D. M., et al. (2019). Past and future spread of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and

## Références Bibliographiques

*Aedes albopictus*. *Nature Microbiology*, 4(5), 854–863. <https://doi.org/10.1038/s41564-019-0376-y>

Kuhn, K. G., Campbell-Lendrum, D. H., & Davies, C. R. (2011). A continental risk map for leishmaniasis in Africa based on climate. *Geospatial Health*, 6(1), 23–28. <https://doi.org/10.4081/gh.2011.211>

Lane, R. P. (1993). Sandflies (*Phlebotominae*). In R. P. Lane & R. W. Crosskey (Eds.), *Medical insects and arachnids* (pp. 78–119). London: Chapman & Hall.

Lawyer, P. G., & Killick-Kendrick, M. (2002). Morphology and morphometry of *Phlebotomus papatasi* (Diptera: Psychodidae) from Turkey. *Journal of Medical Entomology*, 39(5), 851–856. <https://doi.org/10.1603/0022-2585-39.5.851>

Le Coran. (n.d.). *Sourate Al-Baqara, verset 26*. « Dieu ne dédaigne pas de prendre pour exemple un moustique, voire quelque chose de plus petit encore. » (traduction rapprochée).

Lewis, D. J. (1982). A taxonomic review of the genus *Phlebotomus* (Diptera: Psychodidae). *Bulletin of the British Museum (Natural History) Entomology*, 45(2), 121–209.

Lewis, D. J. (1971). The phlebotomine sandflies (Diptera: Psychodidae) of the Oriental Region. *Bulletin of the British Museum (Natural History) Entomology*, 25(3), 1–76.

Marini, F., Bongiorno, G., Houry, C., Maroli, M., Capelli, G., Bianchi, R., et al. (2019). Seasonal dynamics, spatial distribution and host preferences of *Phlebotomus perniciosus* (Diptera: Psychodidae) in a leishmaniasis endemic area of southern Italy. *Acta Tropica*, 193, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2019.02.006>

Marini, F., Caputo, B., Pombi, M., Tarsitani, G., & Della Torre, A. (2010). Study of *Phlebotomus papatasi* (Diptera: Psychodidae) dispersal in a rural area of central Italy using mark-release-recapture method. *Acta Tropica*, 115(3), 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2010.04.009>

Maroli, M., Feliciangeli, M. D., Bichaud, L., Charrel, R. N., & Gradoni, L. (2013). Phlebotomine sandflies and the spreading of leishmaniasis and other diseases of public health concern. *Medical and Veterinary Entomology*, 27(2), 123–147. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2915.2012.01034.x>

Maroli, M., & Feliciangeli, M. D. (2004). Bionomics of phlebotomine sandflies: An overview. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 99(1), 3–7. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762004000100002>

Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058–1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>

## Références Bibliographiques

Ministère de la Santé. (2022). *Rapport annuel de surveillance épidémiologique des maladies transmissibles en Algérie*. Alger : Direction de la Prévention et de la Promotion de la Santé.

Naimi, B. (2017). *usdm: Uncertainty analysis for species distribution models* (R package version 1.1–18) [Computer software]. <https://cran.r-project.org/package=usdm>

Ouali, I., Belkaid, M., Khelifi, L., Chaouch, M., & Harrat, Z. (2021). La leishmaniose en Algérie : situation épidémiologique actuelle, distribution géographique et perspectives de lutte. *Revue Algérienne des Sciences Médicales*, 57(3), 179–188.

Peterson, A. T., & Soberón, J. (2012). *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton: Princeton University Press.

Peterson, A. T. (2014). *Mapping disease transmission risk: Enriching models using biogeography and ecology*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>

Ponte-Sucre, A. (2017). An overview of *Leishmania* and leishmaniasis. In A. Ponte-Sucre (Ed.), *Drug resistance in Leishmania parasites* (pp. 1–16). Cham: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47512-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47512-5_1)

R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing* [Computer software]. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

Ramírez, J. D., & Cossio, A. (2021). Cutaneous and mucocutaneous leishmaniasis: Clinical characteristics, transmission dynamics and impact on public health. *Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo*, 63, e33. <https://doi.org/10.1590/S1678-9946202163033>

Rangel, E. F., & Lainson, R. (2009). Proven and putative vectors of American cutaneous leishmaniasis in Brazil: Aspects of their biology and vector competence. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 104(7), 937–954. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762009000700001>

Ready, P. D. (2013a). Biology of *Phlebotomine* sand flies as vectors of disease agents. *Annual Review of Entomology*, 58, 227–250. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120811-153557>

Ready, P. D. (2013b). Biology of phlebotomine sand flies as vectors of disease agents. In M. Maroli, M. D. Feliciangeli, & L. Bichaud (Eds.), *Phlebotomine sandflies: Biology and control* (pp. 35–76). Dordrecht: Springer.

Ribeiro, A. L., Missawa, N. A., & Zeilhofer, P. (2001). Distribution of phlebotomine sand flies (Diptera: Psychodidae) in a leishmaniasis transmission area in central-

## Références Bibliographiques

western Brazil. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 96(8), 1141–1147. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762001000800014>

Ribeiro, J. M. (2000). Blood-feeding arthropods: Live syringes or invertebrate pharmacologists? *Infectious Agents and Disease*, 9(2), 65–73.

Rioux, J. A., Lanotte, G., & Serres, E. (1984). Epidemiology and distribution of cutaneous leishmaniasis in the Mediterranean Basin. *Archives de l'Institut Pasteur de Tunis*, 61(1–2), 5–21.

Rogers, M. E., Ilg, T., Nikolaev, A. V., Ferguson, M. A., & Bates, P. A. (2004). Transmission of cutaneous leishmaniasis by sand fly bite is enhanced by regurgitation of fPPG. *Nature*, 430(6998), 463–467. <https://doi.org/10.1038/nature02675>

Rondani, C., & Berté, F. (1840). *Dipterologiae Italicae Prodromus*. Milan: Typographia Paravia.

Sacks, D., & Kamhawi, S. (2001). Molecular aspects of parasite-vector and vector-host interactions in leishmaniasis. *Annual Review of Microbiology*, 55, 453–483. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.55.1.453>

Scopoli, G. A. (1786). *Entomologia Carniolica exhibens insecta Carnioliae indigena*. Vienne: Trattner.

Singh, O. P., & Sundar, S. (2021). Developments in diagnosis and treatment of visceral leishmaniasis in the elimination era. *Journal of Parasitology Research*, 2021, 8812340. <https://doi.org/10.1155/2021/8812340>

Soberón, J., & Peterson, A. T. (2015). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 10, 1–10. <https://doi.org/10.17161/bi.v10i0.4906>

Souza, N. A., Andrade-Coelho, C. A., Vigoder, F. M., & Ward, R. D. (2010). Reproductive isolation and cuticular hydrocarbons of *Lutzomyia intermedia* and *Lutzomyia whitmani* (Diptera: Psychodidae). *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 105(5), 611–618. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762010000500018>

Souza, N. A., Andrade-Coelho, C. A., Vilela, M. L., & Rangel, E. F. (2005). The biology of *Lutzomyia intermedia* and *L. whitmani* (Diptera: Psychodidae) in a focus of cutaneous leishmaniasis in Mesquita, Rio de Janeiro, Brazil. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 100(2), 229–232. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762005000200025>

Tabbabi, A. (2019). Review of leishmaniasis in the Middle East and North Africa. *African Health Sciences*, 19(1), 1329–1337. <https://doi.org/10.4314/ahs.v19i1.40>

Theodor, O., & Mesghali, A. (1964). On the Phlebotominae of Iran. *Journal of Medical Entomology*, 1(3), 285–300. <https://doi.org/10.1093/jmedent/1.3.285>

Van Griensven, J., & Diro, E. (2016). Visceral leishmaniasis. *Infectious Disease Clinics of North America*, 30(1), 111–129. <https://doi.org/10.1016/j.idc.2015.10.006>

## Références Bibliographiques

Young, D. G., & Duncan, M. A. (1994). *Guide to the identification and geographic distribution of Lutzomyia sand flies in Mexico, the West Indies, Central and South America (Diptera: Psychodidae)*. Gainesville: American Entomological Institute.

## Sites Internet

EmmèneTonChien.com. Leishmaniose et phlébotome : maladie mortelle chez le chien [Internet]. [s.d.] [cité 11 juin 2025]. Disponible sur : <https://emmenetonchien.com/conseils/leishmaniose-canine-maladie-chien-phlebotome/>

Gruppo Leishmania. Biological cycle of phlebotomine [Internet]. Italy: GruppoLeishmania.org; [cited 2024 Jun 10]. Available from: <https://www.gruppoleishmania.org/en/biological-cycle-phlebotomine>

Dreamstime. Two forms of Leishmania parasites [Internet]. 2017 [consulté le 11 juin 2025]. Disponible sur : <https://www.dreamstime.com/stock-illustration-two-forms-leishmania-parasites-flagellated-promastigotes-found-sandfly-laboratory-media-non-flagellated-amastigotes-image94261924>

Cinq sur Cinq. Leishmaniose : comment se protéger ? [Internet]. France : Cinq sur Cinq ; [date inconnue] [consulté le 11 juin 2025]. Disponible sur : <https://cinq-cinq.fr/preparez-votre-voyage/maladies/leishmaniose/>

<https://www.clinical-medicine.panafrican-med-journal.com/content/article/2/71/pdf/71.pdf>

Centers for Disease Control and Prevention. DPDx-Laboratory Identification of Parasites of Public Health Concern – Life Cycle of Leishmania [Internet]. Atlanta (GA): CDC; 2013 Nov 29 [consulté le 12 Avril 2025]. Disponible sur : <https://www.cdc.gov/dpdx/leishmaniasis/index.html>

Cycle biologique du phlébotome, vecteur de la leishmaniose. Source : Gruppo Leishmania. Available from: <https://www.gruppoleishmania.org> (consulté le 10 juin 2024)

Cycle épidémiologique de la leishmaniose. Source : Monzote L. *Université Paris Descartes*. 2008. Image extraite de : <https://www.researchgate.net/publication/46300964> (consulté le 10 juin 2024)

## Références Bibliographiques

Carte de distribution des principaux genres de phlébotomes (Phlebotominae)  
Source : Galati EAB, Marassá AM, Depaquit J, Léger N. Global distribution of Phlebotominae. In: *Parasite*. 2017;24:Article 30. Disponible sur : <https://www.researchgate.net> (consulté le 11 juin 2025)

World Health Organization (WHO). *Global vector control response 2017–2030*. Geneva: WHO; 2017. Available from: <https://www.who.int/vector-control/publications/global-control-response-2017-2030>

WHO Regional Office for the Eastern Mediterranean. *Country profile: Algeria - Leishmaniasis*. Cairo: World Health Organization; 2020. Disponible sur : <https://www.emro.who.int/neglected-tropical-diseases/countries/algeria.html>

World Health Organization (WHO). *Leishmaniasis*. Geneva: WHO; 2022. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/leishmaniasis>

World Health Organization (WHO). *Leishmaniasis: Epidemiological Update 2023*. Geneva: WHO; 2023. Disponible sur : <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/leishmaniasis>

# **Annexe**

**Annexe I : Détails des cas de leishmaniose utilisés dans la modélisation des niches  
écologiques des Phlébotomes**

Date	Sexe	Age	Latitude	Longitude	Région
14/11/2024	H	17	35,033888	7,016944	ششار
/	H	23	35,002222	6,761111	خيران
18/09/2024	H	33	35,302777	7,337777	أولاد رشاش
27/12/2023	F	17	35,200833	7,466666	بجن
27/12/2023	H	17	35,067499	7,026666	ششار
27/12/2023	H	56	35,3	7,365833	ولاد رشاش
27/12/2023	H	37	35,042777	7,005833	ششار
2023	H	33	34,48361	7,050833	المبيطة
08/12/2024	H	21	34,722499	6,291944	المزيرة
11/11/2024	H	35	34.554722	6.063333	الحوش
24/11/2024	H	23	34.418611	7.248889	المبيطة
23/12/2024	H	61	34.394167	6.816111	واد المبيطة
12/01/2025	F	28	34.481944	7.05	المبيطة
01/01/2025	H	54	34.818611	6.705	خنقة سيدي ناجي
06/10/2024	H	26	35.038889	7.020278	ششار
12/01/2025	F	27	34.917778	6.686667	الولجة
/	H	25	35.286944	7.381944	ولاد رشاش
/	H	35	35.168056	7.107222	بابار
28/01/2024	H	15	35.036111	7.005833	ششار
/	H	34	35.364722	7.217222	المحمل
12/02/2024	H	35	35.038056	7.014722	ششار
29/02/2024	H	30	35.364444	6.779167	شلية
08/02/2024	H	18	35.138055	7.015	بابار
08/02/2024	H	34	35.374722	7.2175	المحمل
18/04/2024	H	17	35.369444	7.211389	المحمل
18/09/2024	H	20	35.037222	7.005556	ششار

Date	Sexe	Age	Latitude	Longitude	Région
28/08/2024	H	36	35.291389	7.355833	أولاد رشاش
/	H	27	35.291389	7.355833	أولاد رشاش
07/03/2010	H	14	35.479645	6.798571	تاويزيانت
20/05/2010	H	37	35.513134	6.808802	تاويزيانت
10/10/2010	H	45	35.507353	6.816349	تاويزيانت
12/10/2010	H	37	35.470592	7.086152	الحامة
28/12/2010	H	45	35.492436	6.921950	قايس
18/01/2011	H	39	35.496517	6.819541	تاويزيانت
18/01/2011	H	51	35.368943	6.762952	شلية
02/02/2011	H	51	35.441342	7.140623	خنشلة
10/12/2012	F	54	35.572890	6.897192	الرميلة
14/01/2013	H	47	35.320545	6.754131	بوحمامة
30/01/2013	H	33	35.462524	7.081974	الحامة
17/02/2013	H	24	35.429028	7.133813	خنشلة
13/06/2013	H	14	35.496550	6.757253	تاويزيانت
14/07/2013	H	61	35.522457	6.830400	تاويزيانت
05/09/2013	H	46	35.494083	7.053653	الحامة
15/04/2014	H	38	35.510965	6.085063	تاويزيانت
05/06/2014	H	64	35.171667	7.102799	بابار
20/11/2016	H	34	35.489174	6.931957	قايس
31/12/2016	H	31	35.489113	6.932012	قايس
09/01/2017	H	15	35.524827	6.916798	الرميلة
08/06/2017	H	39	35.541204	6.897590	الرميلة
11/12/2017	H	9	35.497576	6.910962	قايس
09/10/2024	H	24	34.997954	6.761329	خيران
11/11/2024	F	24	35.172934	7.102713	بابار
17/12/2024	H	37	35.252870	7.123578	عين جربوع
29/12/2024	H	26	34.995514	6.762444	خيران
18/09/2024	H	35	35.304904	7.350315	أولاد رشاش

Date	Sexe	Age	Latitude	Longitude	Région
27/12/2023	H	71	35.282875	7.349339	أولاد رشاش
18/04/2024	H	18	35.369718	7.207227	المحمل
16/07/2024	H	44	35.440996	7.464165	عين الطويلة
05/01/2025	H	49	35.436097	7.352457	بلقيطان
12/02/2025	F	32	35.523716	7.113855	بغاي
15/02/2025	H	24	35.235016	6.575830	مصارة
23/09/2023	F	39	35.409858	6.643690	يابوس



## Abstract

Phlebotomine sand flies (*Phlebotomus spp.*) are the exclusive biological vectors of leishmaniasis, a parasitic disease endemic to Algeria. Their geographic distribution is highly dependent on bioclimatic variables, which are themselves influenced by global climate change. This study aims to model the current and future distribution of vector sand flies in the Khenchela province, located in northeastern Algeria, while considering the impact of climate change. Occurrence data (n = 62) were obtained from confirmed, autochthonous human cases, georeferenced using hospital data, reports from the Health Directorate, and field epidemiological surveys. Modeling was performed using Maxent software, based on a set of 19 bioclimatic variables from the WorldClim v1.4 database for both present and future periods under two greenhouse gas emission scenarios. The model performed well (Area Under Curve = 0.687) and revealed that the diurnal temperature range is the key factor determining sand fly presence. Currently, suitable areas are concentrated across most of the province. Future climate projections indicate significant contractions in their distribution range, which will be limited to the extreme north of the province. This study highlights the relevance of climate-based modeling as a predictive tool for anticipating the effects of global change on vector dynamics, and serves as a strategic basis for targeting surveillance and control interventions against leishmaniasis.

## ملخص

تُعدّ حشرات الفاصدة (*Phlebotomus spp.*) الناقلات البيولوجية الحصرية لداء اللشمانيا، وهو مرض طفيلي متوطن في الجزائر. وتعتمد توزيعاتها الجغرافية بشكل كبير على المتغيرات المناخية البيولوجية، والتي تتأثر بدورها بالتغيرات المناخية العالمية. يهدف هذا العمل إلى نمذجة التوزيع الحالي والمستقبلي لحشرات الفاصدة الناقلة في ولاية خنشلة الواقعة في شمال شرق الجزائر، مع الأخذ في الاعتبار تأثير التغير المناخي. تم الحصول على بيانات التواجد (n = 62) من حالات بشرية محلية مؤكدة، وتم تحديد مواقعها جغرافيًا باستخدام بيانات المستشفيات، وتقارير مديرية الصحة، والتحقيقات الوبائية الميدانية. تم تنفيذ النمذجة باستخدام برنامج Maxent، بالاعتماد على مجموعة من 19 متغيرًا مناخيًا بيولوجيًا مستخرجة من قاعدة بيانات WorldClim v1.4 للحاضر والمستقبل وفقًا لسيناريوهين لانبعاثات الغازات الدفينة. أظهر النموذج أداءً جيدًا (مساحة تحت المنحنى = 0.687)، وكشف أن مدى التغير اليومي في درجات الحرارة هو العامل الحاسم في وجود الفاصدات. حاليًا، تتركز المناطق المناسبة في معظم أراضي الولاية. وتشير التوقعات المناخية المستقبلية إلى انكماشات كبيرة في نطاق انتشارها، حيث ستقتصر على أقصى شمال الولاية. تؤكد هذه الدراسة على أهمية النمذجة المناخية كأداة تنبؤية للتنبؤ بتأثيرات التغير المناخي العالمي على ديناميكية النواقل، وتُعدّ أساسًا استراتيجيًا لتوجيه جهود المراقبة ومكافحة داء اللشمانيا.