



Laboratoire d'écologie des systèmes terrestres et aquatiques



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة باجي مختار - عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE

THESE

Présentée en vue de l'obtention d'un diplôme de doctorat

LMD Filière : Ecologie et environnement.

Spécialité : Bioinformatique et Santé environnementale

Intitulé

Changement climatique et Maladies transmissibles Etude et Modélisation

Présentée par : *Mlle Sâadene Yasmine*

Directrice de thèse : *Pr. Mesbahi-Salhi Amina - UBMA*

Co-directrice de thèse : *Dr. Mliki Ferial - UBMA*

Devant un jury composé de :

| | | |
|-----------------------------|--------------|---------------------------------------|
| <i>Pr. Sakraoui Ferial</i> | Présidente | Université Badji Mokhtar – Annaba |
| <i>Pr. Boumendjel Amel</i> | Examinatrice | Université Badji Mokhtar – Annaba |
| <i>Pr. Zeghdoudi Mourad</i> | Examineur | Université Chadli Bendjedid – El Tarf |
| <i>Pr. Raouf Boulahbal</i> | Examineur | Université Chadli Bendjedid – El Tarf |

2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

« وَلَقَدْ آتَيْنَا دَاوُودَ وَسُلَيْمَانَ عِلْمًا وَقَالَا الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي فَضَّلَنَا عَلَى كَثِيرٍ مِّنْ عِبَادِهِ الْمُؤْمِنِينَ »

{سورة النمل، آية : 15}

Remerciement

Avant tout je remercie Dieu de m'avoir donné la chance, le courage et la force de terminer un parcours universitaire aussi riche et honorable.

Mes sincères remerciements vont à la femme de ma vie, mon bras droit, ma raison d'être, Maman j'espère te rendre fière jusqu'à ma mort.

Papa, j'espère que tu es fière de ta fille.

Je remercie également ma chère directrice de thèse Pr.Salhi Amina qui a été plus qu'un guide pour mon parcours, une amie sans frontière, une conseillère et sur tout une croyante en mes compétences et valeurs, je ne serais oublier votre empreinte dans mon parcours académique.

Je remercie également ma co-directrice de thèse Dr.Mliki Feriel pour ces remarques et directions précieuses.

Je remercie ma chère Sœur Imene et ma belle-Sœur Fatima.

A mes frères Lyes, Yacine, Mohamed et Younes.

Je remercie également Ma famille et Mes amis.

Je suis reconnaissante pour toutes les personnes qui m'ont soutenue dans mes recherches et études, notamment le Pr. Slimane de l'institut pasteur de Tunis et la Pr. Valérie d'Acremont de Unisanté à Lausanne pour avoir illuminer ma perception envers cet axe de recherche crucial.

Enfin, Merci au membre du jury d'avoir accepté d'évaluer mes travaux et de me gratifié avec votre expertise.

Résumé

Le changement climatique et la pollution atmosphérique représentent des menaces croissantes pour la santé publique, particulièrement en ce qui concerne les maladies infectieuses vectorielles et respiratoires. Ce travail de recherche a exploré l'impact des facteurs environnementaux sur la leishmaniose cutanée (LC) en Algérie et l'influence de la qualité de l'air sur la transmission et la mortalité liées à la COVID-19 à Alger.

La première étude s'est concentrée sur l'incidence de la LC dans la province de Ghardaïa, Algérie, ainsi que sur la prédiction de sa distribution future en Afrique du Nord sous l'effet du changement climatique. À l'aide de 252 observations mensuelles entre 2000 et 2020, nous avons analysé l'influence des variables climatiques, incluant la température, l'humidité relative, la vitesse du vent, les précipitations et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), sur l'incidence de la LC dans cette région en utilisant un modèle additif généralisé. Nos résultats ont identifié l'humidité relative, la vitesse du vent et le NDVI comme les facteurs environnementaux les plus significatifs. Les projections climatiques régionales basées sur le scénario RCP 2.6 ont également révélé une augmentation attendue des cas de LC dans les zones côtières de l'Algérie, de la Tunisie et du Maroc, avec des pics d'incidence différenciés : à court terme pour l'Algérie (2025), à moyen terme pour le Maroc (2065) et à long terme pour la Tunisie (2085).

La seconde étude a porté sur l'incidence et la mortalité liées à la COVID-19 dans 26 villes algériennes, ainsi que sur la distribution des facteurs climatiques représentatifs de ces villes entre 2020 et 2022. Nous avons examiné la relation entre les niveaux de pollution atmosphérique (PM2.5 et l'index de qualité de l'air [AQI]) et les taux de transmission et de mortalité de la COVID-19 à l'aide d'une régression linéaire multiple valorisé par des simulations monte Carlo. L'analyse a révélé une corrélation positive entre les niveaux de pollution et l'augmentation des cas de COVID-19 et des décès. Par ailleurs, les périodes de confinement ont montré une amélioration temporaire de la qualité de l'air, avec une réduction significative de l'incidence et de la mortalité. Le modèle a confirmé que l'AQI et les niveaux de PM2.5 étaient des prédicteurs significatifs du taux de reproduction effectif R_t , de la COVID-19 avec un R^2 ajusté de 0,58.

En conclusion, ces travaux démontrent que les facteurs environnementaux, tels que le changement climatique et la pollution de l'air, jouent un rôle clé dans l'émergence et la propagation des maladies infectieuses en Algérie. La compréhension de ces interactions est essentielle pour le développement de stratégies efficaces de santé publique, permettant de mieux anticiper et gérer les futures épidémies et pandémies.

Mots clés : Changement climatique, Santé publique, Modélisation, Epidémiologie, Maladies infectieuses, Maladies transmissibles, Leishmaniose cutanée, Covid_19, Algérie, Ghardaïa, Maghreb.

Abstract

Climate change and air pollution pose increasing threats to public health, particularly concerning vector-borne and respiratory infectious diseases. This research work explored the impact of environmental factors on cutaneous leishmaniasis (CL) in Algeria and the influence of air quality on the transmission and mortality associated with COVID-19 in Algiers.

The first study focused on the incidence of CL in the Ghardaïa province of Algeria, as well as on predicting its future distribution in North Africa under climate change effects. Utilizing 252 monthly observations from 2000 to 2020, we analyzed the influence of climatic variables, including temperature, relative humidity, wind speed, precipitation, and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), on the incidence of CL in this region using a generalized additive model. Our results identified relative humidity, wind speed, and NDVI as the most significant environmental factors. Regional climate projections based on the RCP 2.6 scenario also indicated an expected increase in CL cases in the coastal areas of Algeria, Tunisia, and Morocco, with differentiated peaks of incidence: in the short term for Algeria (2025), in the medium term for Morocco (2065), and in the long term for Tunisia (2085).

The second study examined the incidence and mortality related to COVID-19 in 26 Algerian cities, as well as the distribution of representative climatic factors in these cities between 2020 and 2022. We investigated the relationship between air pollution levels (PM_{2.5} and Air Quality Index [AQI]) and the rates of transmission and mortality from COVID-19 using multiple linear regression enhanced by Monte Carlo simulations. The analysis revealed a positive correlation between pollution levels and the increase in COVID-19 cases and deaths. Furthermore, the lockdown periods demonstrated a temporary improvement in air quality, with a significant reduction in incidence and mortality. The model confirmed that AQI and PM_{2.5} levels were significant predictors of the effective reproduction rate R_t , of COVID-19, with an adjusted R^2 of 0.58.

In conclusion, this work demonstrates that environmental factors, such as climate change and air pollution, play a key role in the emergence and spread of infectious diseases in Algeria. Understanding these interactions is essential for developing effective public health strategies to better anticipate and manage future epidemics and pandemics.

Keywords: Climate change, Public health, Modeling, Epidemiology, Infectious diseases, Communicable diseases, Cutaneous leishmaniasis, Covid_19, Algeria, Ghardaïa, Maghreb.

ملخص

يمثل تغير المناخ وتلوث الهواء تهديدات متزايدة للصحة العامة، وخاصة فيما يتعلق بالأمراض المعدية المنقولة بواسطة في الجزائر (LC) الحشرات والأمراض التنفسية. استكشفت هذه الدراسة البحثية تأثير العوامل البيئية على الليشمانيا الجلدية وتأثير جودة الهواء على انتقال ووفاة مرض كوفيد-19 في الجزائر العاصمة.

ركزت الدراسة الأولى على معدل الإصابة بالليشمانيا الجلدية في محافظة غرداية بالجزائر، بالإضافة إلى التنبؤ بتوزيعها المستقبلي في شمال إفريقيا تحت تأثير تغير المناخ. باستخدام 252 ملاحظة شهرية بين عامي 2000 و2020، قمنا بتحليل تأثير المتغيرات المناخية، بما في ذلك درجة الحرارة، والرطوبة النسبية، وسرعة الرياح، والهطول، ومؤشر الفرق النباتي على معدل الإصابة بالليشمانيا الجلدية في هذه المنطقة باستخدام نموذج عام للتجميع. وقد حددت نتائجنا أن (NDVI) العادي كانت العوامل البيئية الأكثر أهمية. كما أظهرت التوقعات المناخية الإقليمية المستندة إلى NDVI الرطوبة النسبية وسرعة الرياح و زيادة متوقعة في حالات الليشمانيا الجلدية في المناطق الساحلية من الجزائر وتونس والمغرب، مع RCP 2.6 إلى سيناريو قمم متفاوتة في معدل الإصابة: على المدى القصير للجزائر (2025)، وعلى المدى المتوسط للمغرب (2065)، وعلى المدى الطويل لتونس (2085).

تناولت الدراسة الثانية معدل الإصابة والوفاة المرتبطة بكوفيد-19 في 26 مدينة جزائرية، فضلاً عن توزيع العوامل المناخية ومؤشر (PM2.5) التمثيلية في هذه المدن بين عامي 2020 و2022. قمنا بالتحقيق في العلاقة بين مستويات تلوث الهواء ومعدلات انتقال ووفاة كوفيد-19 باستخدام تحليل الانحدار الخطي المتعدد معززاً بمحاكاة مونت كارلو. ([AQI] جودة الهواء كشفت التحليل عن وجود ارتباط إيجابي بين مستويات التلوث وزيادة حالات كوفيد-19 والوفيات. علاوة على ذلك، أظهرت فترات الإغلاق تحسناً مؤقتاً في جودة الهواء، مع انخفاض كبير في معدل الإصابة والوفيات. وأكد النموذج أن مؤشر جودة ومستويات PM2.5 الهواء كانت مؤشرات مهمة لمعدل التكاثر الفعال R_t لكوفيد مع معدل قدره $R^2 = 0.58$

في الختام، تثبت هذه الدراسة أن العوامل البيئية، مثل تغير المناخ وتلوث الهواء، تلعب دوراً رئيسياً في ظهور وانتشار الأمراض المعدية في الجزائر. إن فهم هذه التفاعلات أمر ضروري لتطوير استراتيجيات فعالة للصحة العامة، مما يسمح بالتنبؤ وإدارة الأوبئة والجوائح المستقبلية بشكل أفضل.

الكلمات المفتاحية: التغير المناخي، الصحة العامة، النمذجة، علم الأوبئة، الأمراض المعدية، الأمراض المنقولة، داء الليشمانيا الجلدية، كوفيد_19، الجزائر، غرداية، المغرب العربي.

Remercîments

Résumé

Table des matières

| | |
|---|-----|
| I) Objectifs et Plan de la thèse | 17 |
| II) Introduction Générale..... | 19 |
| III) Leishmaniose Cutanée en Algérie : Modélisation et Prédications | 25 |
| III.1 Introduction..... | 25 |
| III.2 Généralités sur la leishmaniose en Algérie | 28 |
| III.2.1 Historique..... | 28 |
| III.2.2 L'agent pathogène | 33 |
| III.2.3 Vecteur de la leishmaniose | 39 |
| III.2.4 Réservoirs de la Leishmaniose | 46 |
| III.2.5 Impacts Anthropiques et Environnementaux sur les Leishmanioses | 51 |
| III.3 Matériel et Méthode..... | 55 |
| III.3.1 Calibration et évaluation du Modèle « GAM » sur un jeu de données réelles 55 | |
| III.3.2 Prédiction de l'évolution de la Leishmaniose Cutanée dans le Nord-Ouest de l'Afrique | 60 |
| III.4 Résultats | 63 |
| III.4.1 Incidence de la Leishmaniose cutanée | 63 |
| III.4.2 Analyse de corrélation | 66 |
| III.4.3 Résultats du modèle GAM | 67 |
| III.4.4 Prédications des cas de Leishmaniose Cutanée dans le Maghreb..... | 77 |
| III.5 Discussion | 92 |
| III.6 Conclusion..... | 99 |
| IV) Covid-19 en Algérie : Analyse Spatio-Temporelle et Relationnelle des Facteurs Climatiques et de la Qualité de l'Air avec la pandémie. | 101 |
| IV.1 Introduction..... | 101 |
| IV.2 Généralité sur la pandémie Covid-19 | 103 |
| IV.2.1 Origine | 104 |
| IV.2.2 Les vagues de Covid-19 dans le monde..... | 105 |

| | | |
|--------|--|-----|
| IV.2.3 | Les vagues de Covid-19 en Algérie | 105 |
| IV.2.4 | Classification..... | 106 |
| IV.2.5 | Cycle viral | 107 |
| IV.2.6 | Symptômes..... | 108 |
| IV.2.7 | Transmission..... | 108 |
| IV.2.8 | Effets réciproques entre le climat et la COVID-19..... | 109 |
| IV.3 | Matériels et Méthodes | 111 |
| IV.3.1 | Analyse Descriptive et Corrélations entre les Facteurs Climatiques et Épidémiologiques de la Covid-19 en Algérie..... | 111 |
| IV.3.2 | Analyse de la Qualité de l'Air et de l'Impact du Confinement sur la Dynamique de la Covid-19 à Alger | 116 |
| IV.4 | Résultats | 122 |
| IV.4.1 | Distribution spatio-temporelle des variables climatiques en Algérie 2020- 2022. | 122 |
| IV.4.2 | Distribution spatio-temporelle des variables épidémiologiques..... | 130 |
| IV.4.3 | Corrélation entre Climat et Covid-19 en Algérie..... | 131 |
| IV.4.4 | Analyse de l'effet de la Qualité de l'air et du confinement sur la Pandémie Covid-19 à Alger. | 133 |
| IV.5 | Discussion..... | 144 |
| IV.5.1 | Climat et Covid-19 en Algérie | 145 |
| IV.5.2 | Pollution atmosphérique et Covid-19 à Alger..... | 149 |
| IV.5.3 | Régression Linéaire multiple..... | 152 |
| IV.5.4 | Régression Linéaire multiple avec Simulations de Monte Carlo | 153 |
| IV.5.5 | Implications des Polluants Atmosphériques sur les cas de Covid-19 à Alger 154 | |
| IV.6 | Conclusion..... | 156 |
| | Conclusion générale..... | 157 |
| | Perspective..... | 159 |
| | Références | 161 |
| | Annexes..... | 0 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| FIGURE 1 CARTE DE L'ENDEMICITE DE LA LEISHMANIOSE VISCERALE DANS LE MONDE EN 2022 - PUBLIE EN NOVEMBRE 2023 – (OMS, 2023) [28] | 29 |
| FIGURE 2 CARTE DE L'ENDEMICITE DE LA LEISHMANIOSE CUTANEE DANS LE MONDE EN 2022 - PUBLIE EN NOVEMBRE 2023 – (OMS, 2023) [36] | 30 |
| FIGURE 3 INCIDENCE DE LA LEISHMANIOSE CUTANEE EN ALGERIE 2000-2020 (INSP 2020) | 31 |
| FIGURE 4 INCIDENCE DE LA LEISHMANIOSE VISCERALE EN ALGERIE 2000-2017 (INSP 2017) [37] | 32 |
| FIGURE 5 REPARTITION MONDIALE DE DIFFERENTES ESPECES DE LEISHMANIA, DE PHLEBOTOMES ET D'HOTES. AKHOUNDI ET AL. (2016)[39] | 33 |
| FIGURE 6 FORME PROMASTIGOTE DES PARASITES LEISHMANIA [51] | 37 |
| FIGURE 7 FORME AMASTIGOTE DES PARASITES LEISHMANIA [52] | 37 |
| FIGURE 8 CYCLE DE VIE DU PARASITE LEISHMANIA A TRAVERS LES DEUX STADES [55] | 39 |
| FIGURE 9 PHLEBOTOME [57] | 40 |
| FIGURE 10 MORPHOLOGIE D'UN PHLEBOTOME. [59] | 41 |
| FIGURE 11 REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU CYCLE DE VIE DES PHLEBOTOMES. [68] | 43 |
| FIGURE 12 INFECTION PAR LA FORME AMASTIGOTE DE LEISHMANIA [74] | 47 |
| FIGURE 13 DIFFERENTS CYCLES DE TRANSMISSION DE LA LEISHMANIOSE EN FONCTION DE L'ESPECE DU PARASITE, HOTE [77]. | 48 |
| FIGURE 14 RAT DES SABLES-PSAMMOMYS OBESUS [81]. | 50 |
| FIGURE 15 CARTE GEOGRAPHIQUE DE GHARDAÏA ALGERIE 2023 (QGIS) | 55 |
| FIGURE 16 SCHEMA D'APPLICATION DES RESULTATS DU MODEL GAM SUR LES DONNEES DE PREVISIONS CLIMATIQUES (SAADENE 2024) | 62 |
| FIGURE 17 INCIDENCE DE LA LEISHMANIOSE CUTANEE EN ALGERIE PAR ANNEE 2000-2020 | 63 |
| FIGURE 18 INCIDENCE DE LA LEISHMANIOSE CUTANEE A GHARDAÏA PAR ANNEE 2000-2020 | 64 |
| FIGURE 19 INCIDENCE MENSUELLE DE LA LEISHMANIOSE CUTANEE A GHARDAÏA 2000-2020 | 65 |
| FIGURE 20 RELATION ENTRE LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES ET L'INCIDENCE DE LA LEISHMANIOSE CUTANEE SUR LA BASE DU GAM_01 | 70 |
| FIGURE 21 RELATION ENTRE LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES ET L'INCIDENCE DE LA LEISHMANIOSE CUTANEE SUR LA BASE DE GAM_02 | 71 |
| FIGURE 22 GRAPHIQUES DES FONCTIONS D'AUTOCORRELATION ET D'AUTOCORRELATION PARTIELLE POUR GAM_01 | 72 |
| FIGURE 23 GRAPHIQUES DES FONCTIONS D'AUTOCORRELATION ET D'AUTOCORRELATION PARTIELLE POUR GAM_02 | 73 |
| FIGURE 24 GRAPHIQUES DES RESIDUS DU MODELE AJUSTE GAM_01 | 73 |
| FIGURE 25 GRAPHIQUES DES RESIDUS DU MODELE AJUSTE GAM_02 | 74 |
| FIGURE 26 GRAPHIQUES DE PREDICTION DES CAS LC POUR GAM_01 AVEC UN INTERVALLE DE PREDICTION DE 95 % EN UTILISANT DE NOUVELLES DONNEES (20 % DES DONNEES D'ORIGINE) | 75 |

| | |
|---|-----|
| FIGURE 27 GRAPHIQUES DE PREDICTION DES CAS LC POUR GAM_02 AVEC UN INTERVALLE DE PREDICTION DE 95 % EN UTILISANT DE NOUVELLES DONNEES (20 % DES DONNEES D'ORIGINE) | 76 |
| FIGURE 28 RELATIONS ESTIMEES PAR GAM ENTRE LES CAS MOYENS MENSUELS DE LEISHMANIOSE CUTANEE ET LES VALEURS MENSUELLES MOYENNES DE TEMPERATURE MOYENNE (AT), HUMIDITE RELATIVE (HM), VITESSE DU VENT (WS) ET LES PRECIPITATIONS (PRC_LAG6), AVEC UN RETARD DE 6 MOIS. | 78 |
| FIGURE 29 SOMME DES CAS DE LEISHMANIOSE CUTANEE EN ALGERIE AVEC UN CYCLE DE 5 ANS. | 82 |
| FIGURE 30 SOMME DES CAS DE LEISHMANIOSE CUTANEE AU MAROC AVEC UN CYCLE DE 5 ANS. | 83 |
| FIGURE 31 SOMME DES CAS DE LEISHMANIOSE CUTANEE EN TUNISIE AVEC UN CYCLE DE 5 ANS. | 83 |
| FIGURE 32 NOMBRE DE CAS DE LC PREDITS PAR VILLE ET PAR MOIS (2021-2050) – ALGERIE | 84 |
| FIGURE 33 NOMBRE DE CAS DE LC PREDITS PAR VILLE ET PAR MOIS (2050-2100) – ALGERIE | 85 |
| FIGURE 34 NOMBRE DE CAS DE LC PREDITS PAR VILLE ET PAR MOIS (2021-2050) – TUNISIE | 86 |
| FIGURE 35 NOMBRE DE CAS DE LC PREDITS PAR VILLE ET PAR MOIS (2050-2100) – TUNISIE | 87 |
| FIGURE 36 NOMBRE TOTAL DE CAS PREDITS PAR VILLE (2021-2050) – MAROC | 88 |
| FIGURE 37 NOMBRE TOTAL DE CAS PREDITS PAR VILLE (2050-2100) – MAROC | 89 |
| FIGURE 38 PREDICTION DE L'EVOLUTION SPATIOTEMPORELLE DE LA LEISHMANIOSE CUTANEE (LC) EN AFRIQUE DU NORD-OUEST 2021-2100 | 90 |
| FIGURE 39 ORIGINE DU VIRUS COVID-19 (SELON L'OMS MARS 2021) | 104 |
| FIGURE 40 CYCLE VIRAL DE SARS-CoV2 DANS LA CELLULE HOTE [176] | 107 |
| FIGURE 41 LOCALISATION DES WILAYAS PRISES EN COMPTE POUR L'ANALYSE DU COVID-19 ET DU CLIMAT EN ALGERIE. (QGIS) | 111 |
| FIGURE 42 LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE "CAPITALE ALGER" (QGIS) | 116 |
| FIGURE 43 DISTRIBUTION DES TEMPERATURES MAXIMALE (C°) DANS LES VILLES D'ALGERIE 2020-2022 | 122 |
| FIGURE 44 DISTRIBUTION DES TEMPERATURES MINIMALES (C°) EN ALGERIE 2020-2022 | 124 |
| FIGURE 45 DISTRIBUTION DES TEMPERATURES MOYENNES(C°) EN ALGERIE 2020-2022 | 125 |
| FIGURE 46 DISTRIBUTION DES PRECIPITATIONS (MM) EN ALGERIE 2020-2022 | 126 |
| FIGURE 47 DISTRIBUTION DE L'HUMIDITE (%) EN ALGERIE 2020-2022 | 128 |
| FIGURE 48 DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT (KM/H)) EN ALGERIE 2020-2022 | 129 |
| FIGURE 49 NOMBRE DE CAS CUMULES DE COVID-19 DANS 26 VILLES D'ALGERIE 2020-2022 | 130 |
| FIGURE 50 NOMBRE DE DECES CUMULES DE COVID-19 DANS 26 VILLES D'ALGERIE | 131 |
| FIGURE 51 TEMPERATURES (C°) A ALGER PAR ANNEE 2020-2022 | 133 |
| FIGURE 52 PRECIPITATIONS (MM) A ALGER PAR ANNEE 2020-2022 | 134 |
| FIGURE 53 HUMIDITE A ALGER PAR ANNEE 2020-2022 | 134 |
| FIGURE 54 VITESSE DU VENT A ALGER PAR ANNEE 2020-2022 | 135 |
| FIGURE 55 INDICE DE QUALITE DE L'AIR (AQI) A ALGER PAR ANNEE 2020-2022 | 136 |

| | |
|---|-----|
| FIGURE 56 PM2.5 A ALGER PAR ANNEE 2020-2022 _____ | 137 |
| FIGURE 57 PERIODES DE CONFINEMENT ET VAGUES DE COVID-19 EN ALGERIE _____ | 137 |
| FIGURE 58 DISTRIBUTION DES RESIDUS DU MODELE LINEAIRE SIMPLE _____ | 140 |
| FIGURE 59 HOMOSCEDASTICITE DES RESIDUS DU MODELE LINEAIRE SIMPLE _____ | 141 |
| FIGURE 60 DISTRIBUTION DES RESIDUS DU MODELE LINEAIRE AVEC SIMULATION MONTE-CARLO _____ | 142 |
| FIGURE 61 HOMOSCEDASTICITE DES RESIDUS DU MODELE LINEAIRE AVEC SIMULATION MONTE- CARLO _____ | 143 |

LISTE DES TABLES

| | |
|--|-----|
| TABLE 1 ESPECES DE LEISHMANIOSE (ROBERTS & JANOVY, 2009) [46] | 34 |
| TABLE 2 DISTRIBUTION DES PHLEBOTOMES D'ALGERIE SELON L'ETAGE BIOCLIMATIQUE [72]... | 45 |
| TABLE 3 DISTRIBUTION GEOGRAPHIQUES DES PHLEBOTOMES [73] | 46 |
| TABLE 4 SYNTHESE DES CAS DE LEISHMANIOSE CUTANEE ET DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ASSOCIES DANS LA REGION DE GHARDAÏA..... | 66 |
| TABLE 5 CORRELATION ENTRE VARIABLES CLIMATIQUES ET EPIDEMIOLOGIQUES DE LA LC CALCULEE AVEC LA METHODE DE SPEARMAN | 67 |
| TABLE 6 RESUME DES EFFETS ENVIRONNEMENTAUX ET TEMPORELS SUR LA VARIABLE REPONSE A L'AIDE DE MODELES ADDITIFS GENERALISES (GAM), DEGRES DE LIBERTE ESTIMES (EDF), CHI CARRE (CHI.SQ) ET VALEURS P. | 68 |
| TABLE 7 STATISTIQUES D'AJUSTEMENT DU MODELE POUR LES GAM AJUSTES (GAM_01 ET GAM_02)..... | 71 |
| TABLE 8 MESURES DU MODELE DE PREDICTION DES CAS CL..... | 75 |
| TABLE 9 RESUME DES EFFETS ENVIRONNEMENTAUX ET TEMPORELS SUR LA VARIABLE REPONSE A L'AIDE DE MODELES ADDITIFS GENERALISES (GAM), DEGRES DE LIBERTE ESTIMES (EDF), CHI CARRE (CHI.SQ) ET VALEURS P. | 77 |
| TABLE 10 RESUME DES MOYENNES CLIMATIQUES PAR PERIODE POUR L'ALGERIE, LE MAROC ET LA TUNISIE. | 80 |
| TABLE 11 EVOLUTION DES CAS MOYENS MENSUELS DE LEISHMANIOSE CUTANEE DANS LA REGION DU NORD-OUEST DE L'AFRIQUE | 81 |
| TABLE 12 TAXONOMIE DU CORONAVIRUS 2 (SARS-CoV-2) [175] | 106 |
| TABLE 13 SYMPTOMES DU COVID-19 [OMS]..... | 108 |
| TABLE 14 CORRELATION ENTRE LES VARIABLES CLIMATIQUES ET EPIDEMIOLOGIQUES DE 26 VILLES D'ALGERIE | 132 |
| TABLE 15 STATISTIQUES RECAPITULATIVES DES PARAMETRES DE POLLUTION ATMOSPHERIQUES | 135 |
| TABLE 16 CORRELATION ENTRE LE NOMBRE DE REPRODUCTION EFFECTIF DU COVID ET LES PARAMETRES DE POLLUTION DE L'AIR A ALGER 2000-2022 | 138 |
| TABLE 17 PERFORMANCE DU MODELE LINEAIRE SIMPLE..... | 139 |
| TABLE 18 DISTRIBUTIONS DES COEFFICIENTS DES SIMULATIONS MONTE-CARLO | 141 |
| TABLE 19 RESUME DES SIMULATIONS DE MONTE CARLO POUR LE R-CARRE | 142 |

Liste des Abréviations

ACF – Fonction d'Autocorrélation

ACE2 – Enzyme de Conversion de l'Angiotensine 2

ADN – Acide Désoxyribonucléique

AIC – Critère d'Information d'Akaike

AQI – Index de Qualité de l'Air

AR – Acide Ribonucléique

AT – Température Moyenne

BIC – Critère d'Information Bayésien

CDER – Centre de Développement des Énergies Renouvelables

CDS – Climate Data Store

CHU – Centre Hospitalier Universitaire

CMIP5 – Projet d'Intercomparaison des Modèles Couplés Phase 5

CO₂ – Dioxyde de Carbone

CORDEX – Coordination des Données sur les Scénarios Climatiques

COVID-19 – Maladie à Coronavirus 2019

D – Décès Cumulés

EDF – Fonction de Répartition Empirique

GAM – Modèles Additifs Généralisés

GCM – Modèle Climatique Global

GLM – Modèles Linéaires Généralisés

HM – Humidité Relative

INSP – Institut National de Santé Publique

IQAIR – IQAir

IR – Taux d'Incidence

LC – Leishmaniose Cutanée

LCC – Leishmaniose Cutanée Chronique

LCS – Leishmaniose Cutanée Sporadique

LCZ – Leishmaniose Cutanée Zoonotique

LV – Leishmaniose Viscérale

MENA – Moyen-Orient et Afrique du Nord

MERS-CoV – Syndrome Respiratoire du Moyen-Orient – Coronavirus

MI – Taux de Mortalité

MSEIRS – Immunity-Susceptibles-Exposés-Infectés-Récupérés-Susceptibles

ND – Nouveaux Décès

NC – Nouveaux Cas

NDVI – Index Normalisé de Végétation

NO₂ – Dioxyde d'Azote

OMS – Organisation Mondiale de la Santé

PACF – Fonction d'Autocorrélation Partielle

PH – Potentiel Hydrogène

PRC – Précipitation

PRC_Lag6 – Précipitation Retardée de Six Mois

R² – Coefficient de Détermination

RCP 2.6 – Scénario de Concentration Représentatif 2.6

RCM – Modèle Climatique Régional

REML – Méthode de Vraisemblance Restreinte

RMSE – Erreur Quadratique Moyenne de la Racine

SARS-CoV-1 – Coronavirus du Syndrome Respiratoire Aigu Sévère 1

SARS-CoV-2 – Coronavirus du Syndrome Respiratoire Aigu Sévère 2

SEIR – Susceptibles-Exposés-Infectés-Récupérés

SIR endémique – Susceptibles-Infectés-Récupérés Endémique

SIR épidémique – Susceptibles-Infectés-Récupérés Épidémique

SIS endémique – Système d'Information Sanitaire Endémique

STD. Error – Erreur Type

VIH – Virus de l'Immunodéficience Humaine

WS – Vitesse du vent

I) Objectifs et Plan de la thèse

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'impact du climat et de l'environnement sur les maladies transmissibles en utilisant une approche mathématique et des modèles statistiques. Nous visons à utiliser les résultats de ces analyses pour prévenir et prédire d'éventuelles épidémies en Algérie.

La thèse se compose d'une introduction générale et de deux chapitres principaux. L'introduction générale a pour objectif de revisiter et de clarifier les définitions fondamentales liées au sujet de l'étude. Elle offre une vue d'ensemble des diverses disciplines impliquées, permettant ainsi de situer le contexte théorique et pratique de la recherche. Les deux chapitres approfondissent les aspects spécifiques de l'étude, en analysant les données et en discutant des résultats obtenus.

Nous examinerons spécifiquement deux types de maladies infectieuses, une maladie parasitaire la leishmaniose cutanée et la maladie à coronavirus (COVID19) qui est due au virus SARS-CoV-2.

Le premier chapitre sera dédié à l'étude de la leishmaniose cutanée, pour laquelle nous utiliserons un modèle additif généralisé (GAM) afin de modéliser la distribution de la maladie au Maghreb, en tenant compte des différents scénarios de réchauffement climatique.

Le deuxième chapitre se penchera sur la pandémie de Covid-19 en Algérie, en se concentrant sur deux axes d'analyse majeurs. Dans un premier temps, nous examinerons les relations entre les facteurs climatiques et l'incidence ainsi que la mortalité du Covid-19 dans 26 villes algériennes, permettant ainsi une étude comparative à l'échelle nationale. Ensuite, notre attention se portera sur la ville d'Alger, où nous développerons un modèle prédictif de l'évolution des cas de Covid-19 en tenant compte des niveaux de pollution atmosphérique. Pour ce faire, nous utiliserons une approche de régression

linéaire multiple, enrichie par des simulations Monte-Carlo. L'objectif de cette analyse approfondie est d'apporter un éclairage nouveau sur l'impact des facteurs environnementaux sur la propagation et la gravité du Covid-19 en Algérie, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de la dynamique de la pandémie dans le contexte spécifique du pays.

Enfin, nous concluons cette thèse par une synthèse générale des résultats obtenus et des perspectives future.

II) Introduction Générale

À notre époque, les frontières entre les continents semblent s'estomper, facilitant les déplacements de l'homme à travers le monde. Ce phénomène, souvent considéré comme une avancée majeure dans notre société mondialisée, apporte néanmoins son lot de défis, en particulier dans le contexte des pandémies [1].

L'accessibilité accrue aux voyages internationaux, que ce soit par voie aérienne, terrestre ou maritime, a créé un réseau interconnecté où les individus, les marchandises, et malheureusement, les agents pathogènes, peuvent circuler librement. Même si le transport rapide et efficace offre des avantages indéniables en termes de commerce, de culture et de compréhension interculturelle, il expose également la planète à de nouveaux risques sanitaires. Un exemple frappant de cette réalité est la manière dont les pandémies peuvent se propager rapidement d'un coin du globe à un autre [1].

Les maladies ne connaissent pas de frontières et peuvent être transportées par des individus porteurs du virus, mais aussi par des vecteurs tels que les insectes, les animaux de compagnie ou les bagages. La globalisation des échanges économiques et culturels crée un terrain propice à la diffusion rapide des agents pathogènes. Par ailleurs, le changement climatique agit comme un catalyseur supplémentaire [1].

Les variations climatiques modifient les conditions environnementales, créant des écosystèmes propices à l'émergence de nouvelles maladies ou à la résurgence de pathogènes déjà connus. La Terre, en constante ébullition due au réchauffement climatique, offre un terrain favorable à la prolifération de ces agents pathogènes. L'accord scientifique sur l'élévation des températures planétaires est désormais quasi-universel [1].

Le réchauffement climatique et les phénomènes associés comme El Niño auront inmanquablement des impacts sur l'épidémiologie et l'évolution de nombreuses maladies infectieuses. L'augmentation des températures et des précipitations pourrait favoriser la

transmission d'agents pathogènes par leurs vecteurs comme les moustiques (paludisme, dengue, chikungunya) en accélérant leur développement et en raccourcissant la période d'incubation extrinsèque [2].

Certaines zones géographiques pourraient devenir plus propices aux épidémies. L'expansion des vecteurs comme les moustiques *Aedes* vers de nouvelles régions pourrait aussi permettre l'implantation d'arbovirus jusque-là cantonnés aux zones tropicales. Cependant, d'autres facteurs comme l'urbanisation, les déplacements de populations et les conflits joueront également un rôle déterminant [2].

Le changement climatique pose également un défi crucial pour l'Algérie. Située en grande partie dans le bassin méditerranéen, une région particulièrement vulnérable au réchauffement climatique, l'Algérie nécessite des mesures de protection spéciales. En avril 1993, l'Algérie a ratifié la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), s'engageant à stabiliser les émissions de gaz à effet de serre pour prévenir les perturbations humaines sur le climat. L'adhésion au Protocole de Kyoto en 2005 a démontré l'engagement de l'Algérie à participer aux efforts mondiaux pour combattre le changement climatique et ses effets potentiels sur les ressources en eau, les écosystèmes et le développement économique durable [3]

Tous les secteurs socio-économiques et les institutions algériennes commencent à intégrer les problématiques liées au changement climatique, avec un accent particulier sur les stratégies d'adaptation et d'atténuation. Dans cette optique, l'Algérie a élaboré une stratégie initiale pour lutter contre le changement climatique, mettant en place de nombreux projets d'adaptation et d'atténuation. Cette stratégie nationale repose sur quatre piliers : le renforcement institutionnel, l'adaptation au changement climatique, la réduction des émissions de GES et le développement des compétences humaines [3]

La mise en œuvre de cette stratégie concerne principalement les secteurs de l'énergie, de l'industrie, des transports, des déchets, des ressources en eau, de l'agriculture et des forêts. Dans ce contexte, l'Agence nationale du changement climatique a été fondée en 2007 et des inventaires des émissions de GES sont régulièrement réalisés. [3]

Les projections indiquent que les précipitations deviendront moins fréquentes mais plus intenses, tandis que les sécheresses seront plus fréquentes et dureront plus longtemps. La répartition spatiale et temporelle des précipitations sera également affectée. L'analyse des données climatiques de 1931 à 1990 pour le nord de l'Algérie montre qu'une augmentation de température de 0,5 °C pourrait atteindre 1 °C d'ici 2020. On prévoit une augmentation de 2 °C d'ici 2050. Les premiers impacts attendus incluent une réduction des ressources en eau, une baisse des rendements agricoles, l'avancée du désert, des défis en matière d'aménagement du territoire et une hausse de la consommation d'énergie pour la climatisation. Ces enjeux nécessitent des solutions qui soient économiquement et socialement viables. Bien que l'Algérie ne contribue que faiblement au réchauffement climatique global (moins de 0,5 % des émissions mondiales de GES), le pays est particulièrement vulnérable et doit intégrer des mesures d'adaptation dans ses politiques de développement [4].

Par ailleurs, la santé environnementale a connu des progrès significatifs ces dernières décennies, devenant un domaine clé de la santé publique. Ce domaine traite des impacts des dangers environnementaux (physiques, chimiques, biologiques) sur la santé humaine. Grâce aux avancées en toxicologie, microbiologie et épidémiologie de nouveaux dangers ont été identifiés, améliorant ainsi l'évaluation quantitative des risques sanitaires. Les politiques publiques intègrent désormais des volets d'évaluation des risques dans les développements industriels, urbains ou agricoles. Cette approche a permis de réduire les risques et d'augmenter la sensibilité du sujet à travers les communautés. La reconnaissance internationale croissante de la santé environnementale souligne l'importance d'une formation accrue des professionnels de santé pour mieux comprendre et gérer ces risques [5]. D'après l'Organisation mondiale de la santé, près du quart des décès survenant dans le monde sont liés à des facteurs environnementaux comme les événements climatiques extrêmes, la pollution de l'air, de l'eau et des sols, que ce soit dans les habitats domestiques ou les milieux professionnels. Cela représente environ 12,6 millions de morts par an, principalement concentrées dans les pays à faible revenu ou émergents. Les maladies respiratoires sont particulièrement concernées par ces problématiques environnementales, résultant d'une combinaison entre une

prédisposition génétique et une exposition continue aux agents nocifs dès la vie in utero et tout au long de l'existence [6].

Pour explorer la complexité de ces éléments, on se réfère à l'épidémiologie discipline qui étudie la fréquence, la distribution et les déterminants des maladies au sein des populations, elle trouve ses origines en Angleterre au XVIIe siècle. Son développement significatif s'est principalement produit aux XIXe et XXe siècles, marqué par des étapes importantes. Initialement axée sur la description des épidémies et des maladies transmissibles, l'épidémiologie s'est progressivement concentrée sur l'analyse de la propagation des maladies [7]. Pour comprendre et maîtriser la propagation des maladies infectieuses, plusieurs modèles épidémiologiques ont été élaborés. Les trois principales catégories de modèles de base sont le SIS endémique, le SIR épidémique et le SIR endémique. Le modèle SIS endémique s'applique aux maladies où les personnes infectées redeviennent susceptibles après guérison, sans immunité permanente, comme la gonorrhée et la tuberculose. Il distingue deux catégories : les susceptibles (S) et les infectés (I). Le modèle SIR épidémique ajoute une catégorie pour les personnes récupérées (R) ayant développé une immunité durable, s'appliquant à des maladies comme la rougeole ou la varicelle. Le modèle SIR endémique, quant à lui, tient compte d'un réservoir constant de la maladie, comme dans le cas du paludisme. [7].

Des modèles plus avancés, tels que SEIR et MSEIRS, ont été développés pour des situations plus complexes. Le modèle SEIR inclut une phase d'incubation avant que les individus ne deviennent infectieux, crucial pour des maladies comme le VIH. Le modèle MSEIRS intègre la perte progressive de l'immunité, utile pour les maladies nécessitant des rappels de vaccination. Ces modèles jouent un rôle essentiel dans l'évaluation des mesures de santé publique, la création de stratégies de vaccination, et la prévision de la propagation des maladies émergentes. Ils permettent aux chercheurs et aux décideurs de prédire les tendances de propagation des maladies et de concevoir des interventions basées sur des données scientifiques solides [8].

L'épidémiologie moderne s'est orientée vers l'exploration des facteurs de risque liés aux maladies chroniques et complexes. Pour ce faire, elle a développé et affiné des méthodes

d'enquête avancées, telles que les études des niches écologiques. Ces études permettent d'identifier les interactions spécifiques entre les agents pathogènes, les hôtes et l'environnement, offrant ainsi une compréhension plus approfondie des dynamiques épidémiologiques et des déterminants de la santé dans diverses populations [7].

Pour garantir l'objectivité et la fiabilité des conclusions, des analyses statistiques de plus en plus sophistiquées sont utilisées. L'intégration des mathématiques et de la génétique confère à l'épidémiologie un statut incontournable en tant que discipline scientifique médicale, même si son enseignement est relativement récent. En suscitant de nombreuses hypothèses de travail, l'épidémiologie a joué un rôle majeur dans l'élaboration de stratégies de santé publique et dans l'étayage des pratiques médicales fondées sur des preuves solides [7].

Les données massives sont devenues essentielles dans les études environnementales, notamment pour prévoir les maladies liées au changement climatique. Elles permettent d'examiner les liens entre les facteurs climatiques (température, précipitations, humidité) et l'apparition de maladies infectieuses telles que le paludisme, le choléra ou la grippe. L'analyse de ces vastes ensembles de données améliore notre compréhension de l'impact du climat sur la propagation des pathogènes, affinant ainsi les prévisions des épidémies saisonnières [9].

Parallèlement, l'épidémiologie mathématique joue un rôle crucial dans la compréhension et la gestion de la transmission des maladies complexes. Les modèles mathématiques permettent d'élucider les relations entre une maladie et ses facteurs prédictifs, ainsi que de comparer différentes stratégies de gestion des maladies. Cette approche est particulièrement précieuse lorsque les essais cliniques sont difficiles à réaliser en raison de leur durée ou de considérations éthiques. Des progrès significatifs, comme la gestion du paludisme et l'éradication de la variole, démontrent l'importance de ces modèles dans la pratique [9].

Les défis futurs de la modélisation épidémiologique comprennent l'intégration des mutations rapides des agents pathogènes, l'utilisation des données issues de nouvelles

technologies telles que les big data, et la modélisation des interactions entre différentes maladies. Pour relever ces défis, il est nécessaire de développer des modèles qui prennent en compte également ce qui affecte la maladie et de favoriser une collaboration interdisciplinaire renforcée [9].

Pour atteindre les objectifs de cette thèse, nous adopterons une approche méthodologique basée sur la modélisation mathématique et l'analyse statistique. En utilisant des modèles prédictifs et des techniques avancées, nous analyserons les données climatiques et épidémiologiques afin de mieux comprendre les dynamiques des maladies transmissibles étudiées. Cette approche nous permettra non seulement d'explorer les relations complexes entre les variables environnementales et la propagation des maladies, mais aussi de fournir des outils de prévision efficaces. Ainsi, nous espérons contribuer à l'amélioration des stratégies de prévention et de contrôle des épidémies en Algérie, en offrant des perspectives nouvelles et des solutions basées sur des preuves scientifiques rigoureuses.

III) Leishmaniose Cutanée en Algérie : Modélisation et Prédictions

III.1 Introduction

La leishmaniose, une maladie parasitaire ancienne documentée depuis des millénaires, qui persiste aujourd'hui comme un problème majeur de santé publique mondiale [10]. Transmise à l'homme par la piqûre de phlébotomes infectés par le parasite *Leishmania*, elle se manifeste sous différentes formes cliniques, dont la leishmaniose cutanée (LC). Chaque année, on estime que 0,7 à 1,2 millions de nouveaux cas de LC surviennent dans près de 100 pays à travers le monde [11].

En 2010, le rapport du comité OMS d'experts de la lutte contre les leishmanioses a souligné son statut de défi majeur pour la santé publique mondiale. À cette époque, environ 350 millions de personnes étaient exposées au risque de contracter la maladie avec près de 2 millions de nouveaux cas enregistrés chaque année dans 88 pays [12].

Malgré son impact étendu en 2022, les leishmanioses demeurent parmi les maladies les plus négligées, posant d'importants défis pour la santé publique internationale. Cette négligence est particulièrement manifeste en Inde, en Afrique du Nord, en Amérique du Sud, et surtout dans les régions méditerranéennes, où la maladie demeure une préoccupation majeure pour la santé publique, concentrant 80 % des cas de leishmaniose cutanée signalés dans le monde [13]

L'Algérie se distingue parmi les nations les plus impactées par les leishmanioses. Environ sept millions d'individus sont susceptibles d'être infectés, avec une moyenne de 14 752 cas de leishmanioses cutanées (LC) et 200 cas de leishmaniose viscérale (LV) annuellement [14]. La présence du parasite a été identifiée pour la première fois en Algérie par les frères Sergent de l'Institut Pasteur d'Alger en 1910 [15].

Deux entités épidémiologiques de LC coexistent en Algérie, chacune associée à une espèce parasitaire spécifique de *Leishmania* : la leishmaniose cutanée zoonotique (LCZ), largement présente dans le centre et le sud du pays, causée par *L. major* MON-25 ; et la leishmaniose cutanée sporadique (LCS) du nord, provoquée par *L. infantum* avec un variant dermatrope prédominant (*le zymodème* MON-24) [16-17-18].

C'est surtout à partir des années 1990 et particulièrement dans les années 2000 que la maladie s'est propagée de manière fulgurante à travers le territoire algérien, atteignant une incidence record de 78,5 cas pour 100 000 habitants en 2005 [19]. Dans ce contexte, la province de Ghardaïa, située dans une zone aride du centre du pays, est rapidement devenue l'une des régions les plus durement touchées, avec près de 2000 cas de LC enregistrés en 2005. La maladie y constitue désormais une cause prédominante de morbidité et de défiguration physique [20].

Cette situation souligne l'importance de comprendre les facteurs favorisant l'émergence de la leishmaniose à travers un pays aussi vaste et riche en biodiversité. Parmi ces facteurs de risque, on retrouve des conditions socioéconomiques défavorables, la malnutrition, la mobilité de la population et les changements climatiques (OMS, 2022). Ces éléments, souvent associés à des conditions de logement insalubres propices à la reproduction des phlébotomes, vecteurs de la maladie, augmentent le risque d'infection.

Il est important de noter que le complexe pathogène leishmanien est étroitement lié aux modifications environnementales, qu'elles soient d'origine anthropique ou climatique. Ces modifications jouent un rôle clé dans l'émergence ou la réémergence des leishmanioses [21]. De plus, les co-infections *Leishmania*/VIH constituent un facteur de risque individuel qui favorise la dispersion de la maladie [22].

Bien qu'étant une maladie parasitaire ancienne, la LC demeure un problème de santé publique actuel. Pour contrôler efficacement cette maladie, il est nécessaire de comprendre en profondeur ses multiples facettes, ses facteurs de transmission et les conditions favorisant son émergence. Les stratégies de prévention et de gestion de cette maladie négligée doivent prendre en compte les dimensions environnementales, géographiques, sociales et médicales.

Dans le contexte crucial de la lutte contre la leishmaniose en Algérie, ce chapitre se positionne comme une contribution essentielle en développant des outils sophistiqués pour une compréhension approfondie des schémas d'incidence de la maladie, tout en intégrant les dimensions environnementales et préventives.

Objectif 1 - Construction du Modèle GAM : La création d'un modèle statistique avancé, tel que le modèle GAM, offre une opportunité de démêler les relations complexes entre climat, environnement et l'incidence de la leishmaniose cutanée LC dans la province de Ghardaïa, Algérie (2000-2020). En comprenant ces relations, nous pouvons non seulement éclairer les facteurs qui influent sur la distribution de la LC, mais également contribuer à l'élaboration de stratégies de prévention plus ciblées, ancrées dans une compréhension profonde de l'environnement.

Objectif 2 - Application du Modèle à la Prédiction : Étendant nos connaissances au-delà de la province de Ghardaïa, nous cherchons à appliquer le modèle aux données climatiques futures spécifiques de différentes villes du Nord de l'Afrique. Cette étape de prédiction vise à anticiper l'incidence probable de la LC dans ces nouvelles régions, basée sur les relations établies dans le modèle. En identifiant les zones potentiellement à risque, nous aspirons à renforcer la capacité de réponse en cas d'épidémie de cette maladie et à contribuer significativement à la compréhension des implications épidémiologiques de la leishmaniose cutanée à travers l'Algérie, en intégrant activement la prévention dans notre approche.

III.2 Généralités sur la leishmaniose en Algérie

III.2.1 Historique

III.2.1.1 Origines Géographiques de la Leishmania

L'histoire de la leishmaniose dévoile une narration complexe, marquée par des débats persistants sur l'origine géographique du genre *Leishmania*. Trois hypothèses émergent, offrant des perspectives variées sur l'évolution de ce parasite.

L'hypothèse paléarctique, avancée par *Lysenko en 1971 [23]* suggère une apparition du genre *Leishmania* dans la région paléarctique au Paléocène, suivie d'une dispersion vers le Nouveau Monde à l'Éocène. En opposition, l'hypothèse néotropicale, soutenue par *Lainson & Shaw 1987 [24]* et *Noyes 1998 [25]*, propose une origine en Amérique du Sud, avec une diffusion vers l'Ancien Monde au Miocène. Une troisième voie, émise par *Momen & Cupolilli 2000 [26]*, évoque le supercontinent Gondwana comme berceau du genre *Leishmania* au Mésozoïque, scindant plus tard en sous-genres distincts évoluant séparément en Afrique et en Amérique du Sud.

III.2.1.2 Preuves Fossiles et Révélation Temporelle

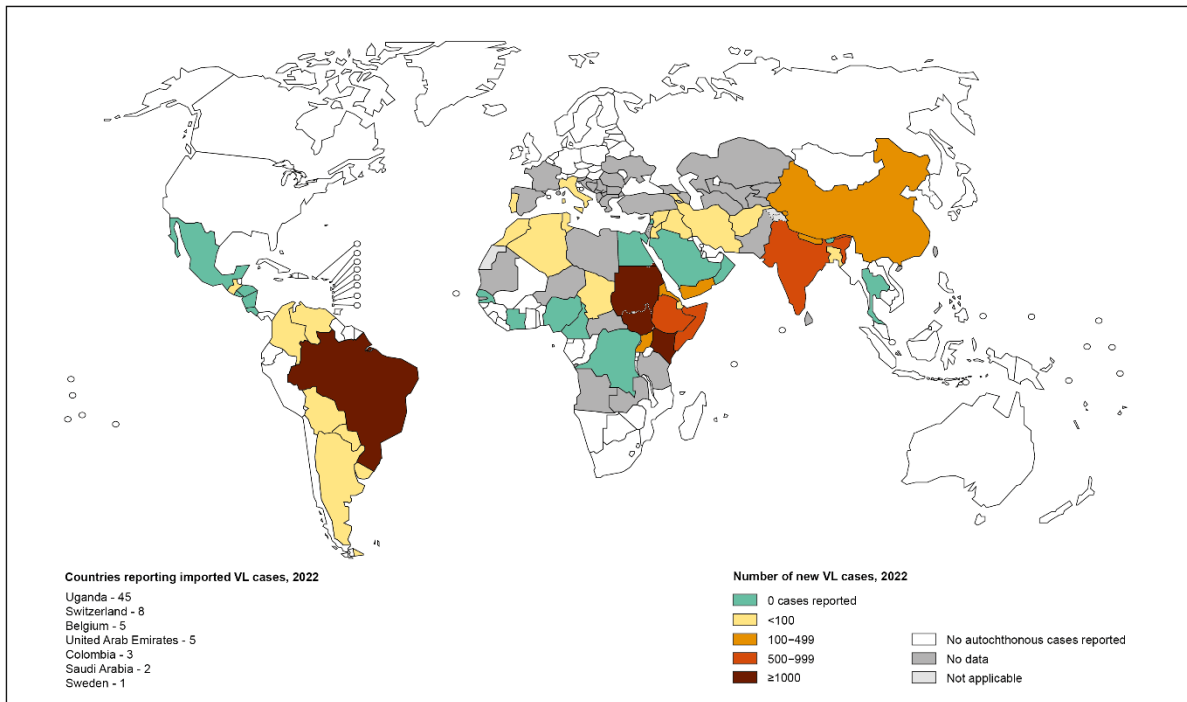
Les preuves fossiles offrent des fenêtres temporelles fascinantes dans l'histoire de *Leishmania*. Des ambres préhistoriques révèlent des parasites similaires à *Leishmania*, dont *Paleoleishmania proterus*, découvert dans l'ambre birmane du Crétacé vieux de 100 millions d'années. Les fossiles suggèrent un cycle de vie digénétique, avec des mouches des sables acquérant le parasite à partir du sang de vertébrés.

Un deuxième fossile, *Paleoleishmania neotropicum*, datant de 20 à 30 millions d'années, a été identifié dans la mouche des sables disparue *Lutzomyia adiketis*. Bien que n'ayant pas trouvé de cellules sanguines de vertébrés, la présence d'amastigotes indique un cycle de vie digénétique impliquant un hôte vertébré **[10]**.

III.2.1.3 Croissance de la Connaissance à Travers les Âge

L'évolution des connaissances sur la leishmaniose remonte à des descriptions cliniques au 7ème siècle avant J.C. dans la bibliothèque du roi assyrien Assurbanipal, évoquant des lésions cutanées ressemblant à la leishmaniose [27].

Status of endemicity of visceral leishmaniasis (VL) worldwide, 2022 (as reported by November 2023)



The boundaries and names shown and the designations used on this map do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the World Health Organization concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. Dotted lines on maps represent approximate border lines for which there may not yet be full agreement. © WHO 2023. All rights reserved

Data Source: World Health Organization
Map Production: Control of Neglected Tropical Diseases (NTD)
World Health Organization



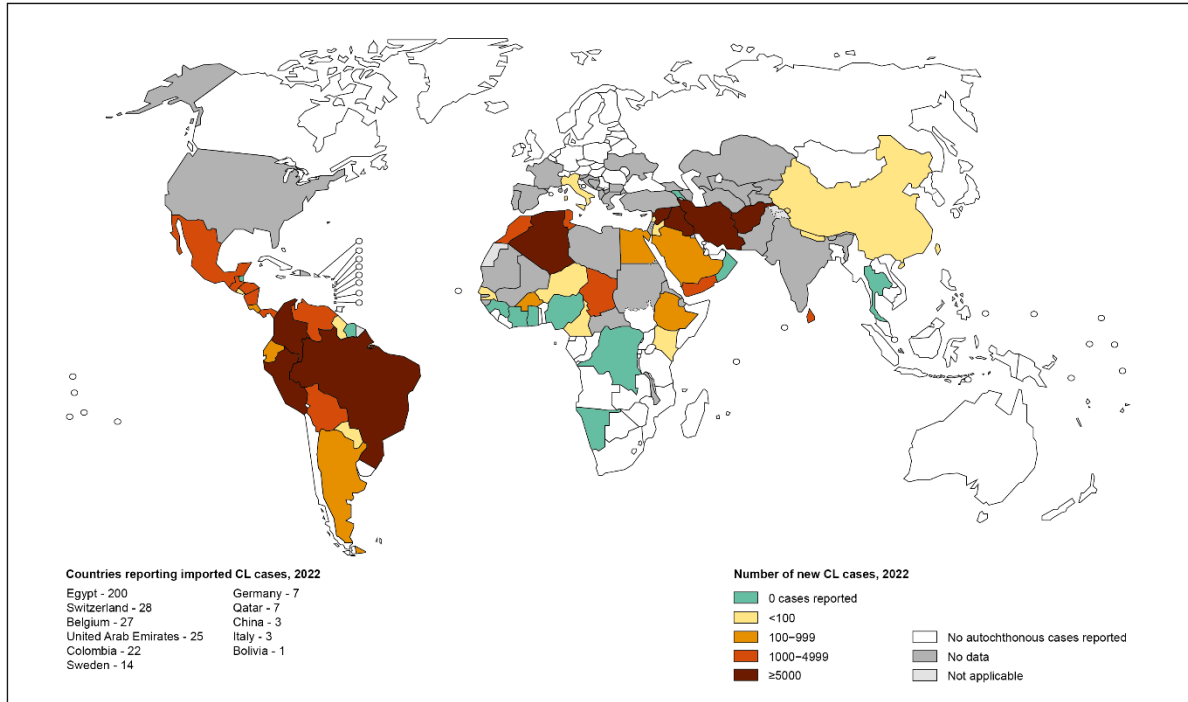
Figure 1 Carte de l'endémicité de la leishmaniose viscérale dans le monde en 2022 - Publié en novembre 2023 – (OMS, 2023) [28]

Au 18ème siècle, le médecin écossais Alexander Russell offre la première description clinique détaillée de lésions cutanées observées à Alep en Syrie [29]. Le début du 20ème siècle voit l'identification de *L. donovani* en Inde par *Leishman* en 1903, suivi par la découverte de *L. infantum* par *Nicolle* en Tunisie en 1908 (Figure 1). [30-31-32]

Les frères *Sergent* démontrent en 1921 le rôle du phlébotome dans la transmission, confirmé par *Adler* en 1941 [33]. Des descriptions de formes zoonotiques en Algérie,

telles que le "clou de Biskra" (1860) [34] et le "clou de Mila" (1923), soulignent la complexité de la maladie dans la région (Figure 2). [35]

Status of endemicity of cutaneous leishmaniasis (CL) worldwide, 2022 (as reported by November 2023)



The boundaries and names shown and the designations used on this map do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the World Health Organization concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. Dotted lines on maps represent approximate border lines for which there may not yet be full agreement. © WHO 2023. All rights reserved

Data Source: World Health Organization
Map Production: Control of Neglected Tropical Diseases (NTD)
World Health Organization



Figure 2 Carte de l'endémicité de la leishmaniose cutanée dans le monde en 2022 - Publié en novembre 2023 – (OMS, 2023) [36]

III.2.1.4 Évolution Géographique de la Leishmaniose en Algérie

L'histoire et la répartition géographique de la leishmaniose en Algérie témoignent d'une intrigue scientifique continue, alimentée par des découvertes, des avancées cliniques et une compréhension évolutive qui façonnent la lutte contre cette maladie parasitaire complexe.

Jusqu'à récemment, la répartition géographique des formes zoonotiques et sporadiques de la leishmaniose présentait des distinctions claires. Cependant, des extensions récentes des zones affectées indiquent une dynamique en mutation. Les différences épidémiologiques entre les espèces et les vecteurs soulignent l'importance de

l'identification moléculaire pour une compréhension approfondie de l'épidémiologie et des stratégies de lutte.

La leishmaniose en Algérie a une histoire complexe, marquée par la coexistence de plusieurs espèces de *Leishmania*.

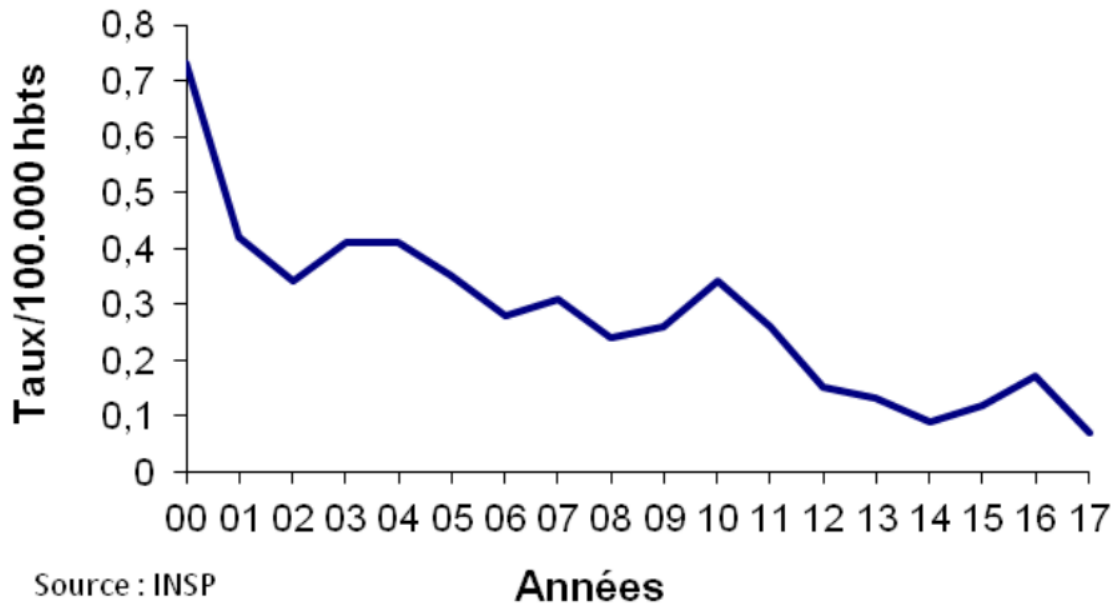


Figure 3 Incidence de la Leishmaniose viscérale en Algérie 2000-2020 (INSP 2020)

Dans une récente étude de *Bachy en 2019* qui a entrepris une caractérisation moléculaire des parasites responsables de la leishmaniose en Algérie, offrant ainsi des perspectives cruciales sur l'épidémiologie et la distribution de la maladie à travers les différents étages bioclimatiques du pays.

Cette analyse a révélé plusieurs constatations significatives. Tout d'abord, *L. infantum*, agent de la leishmaniose viscérale (**Figure 3**) prédomine dans le nord de l'Algérie, avec des concentrations notables le long des régions côtières telles que Tizi-Ouzou, Bouira, Bejaia, et d'autres. Cependant, des cas sporadiques ont été observés dans le sud saharien, étendant la portée géographique de la maladie jusqu'à Tamanrasset, Hoggar, et Tassili N'Ajjer.

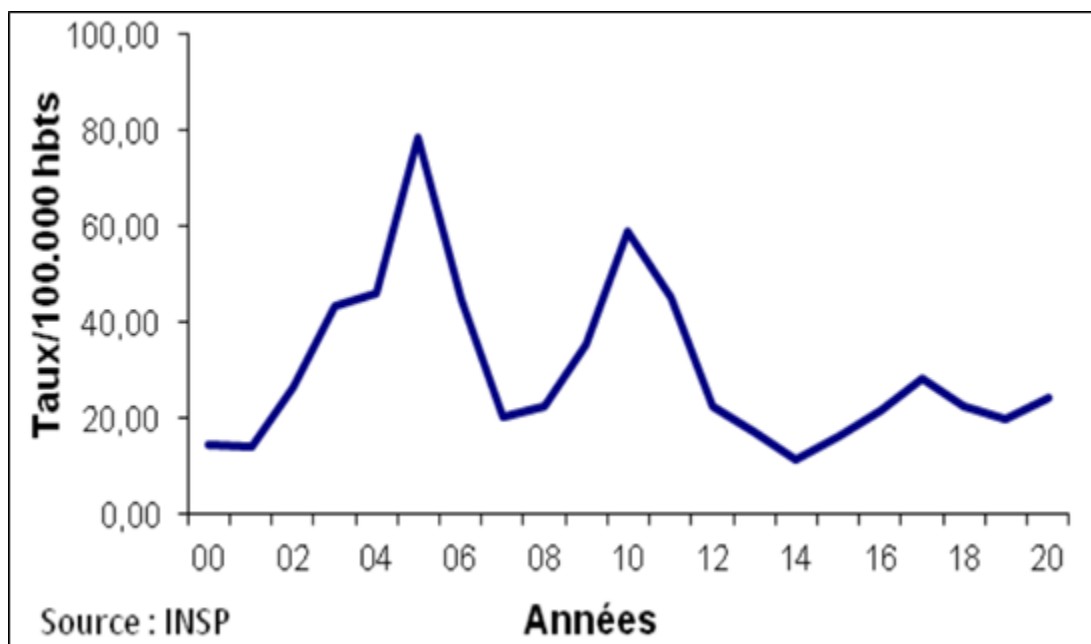


Figure 4 Incidence de la Leishmaniose cutanée en Algérie 2000-2017 (INSP 2017) [37]

En parallèle, la Leishmaniose Cutanée Zoonotique (LCZ) à *L. major* (**Figure 4**), traditionnellement confinée aux foyers de Biskra, Abadla, et Gharaiä, a connu une expansion significative vers les Hauts Plateaux et les régions steppiques. Des épidémies notables à M'sila en 1982-1983 et à Ksar-Chellala en 1985 ont marqué cette progression, surmontant la barrière géographique formée par l'Atlas tellien.

De manière inattendue, *L. tropica*, responsable de la Leishmaniose Cutanée Chronique (LCC), a été identifié dans des régions coexistant avec *L. infantum* et *L. major*. Cette observation nouvelle a introduit un élément inédit dans l'épidémiologie de la leishmaniose en Algérie, avec des cas confirmés au centre-nord et au nord-ouest du pays.

L'évolution géographique de ces différentes espèces est étroitement liée à des facteurs environnementaux tels que la désertification des zones steppiques et les changements climatiques. Les déplacements des réservoirs et des vecteurs, ainsi que les modifications des écosystèmes, ont favorisé la propagation de la maladie vers des zones historiquement indemnes.

En Algérie, les variations dans la prédominance des espèces et les expansions territoriales soulignent l'impact direct des changements environnementaux du foyer

endémique de ces maladies. Face à ces constats, il devient impératif de réaliser de nouvelles évaluations sur l'environnement et le climat en Algérie, tout en anticipant l'évolution géographique de la LC. Prévenir plutôt que guérir s'avère être la meilleure approche, offrant une stratégie proactive pour éviter des épidémies futures [38].

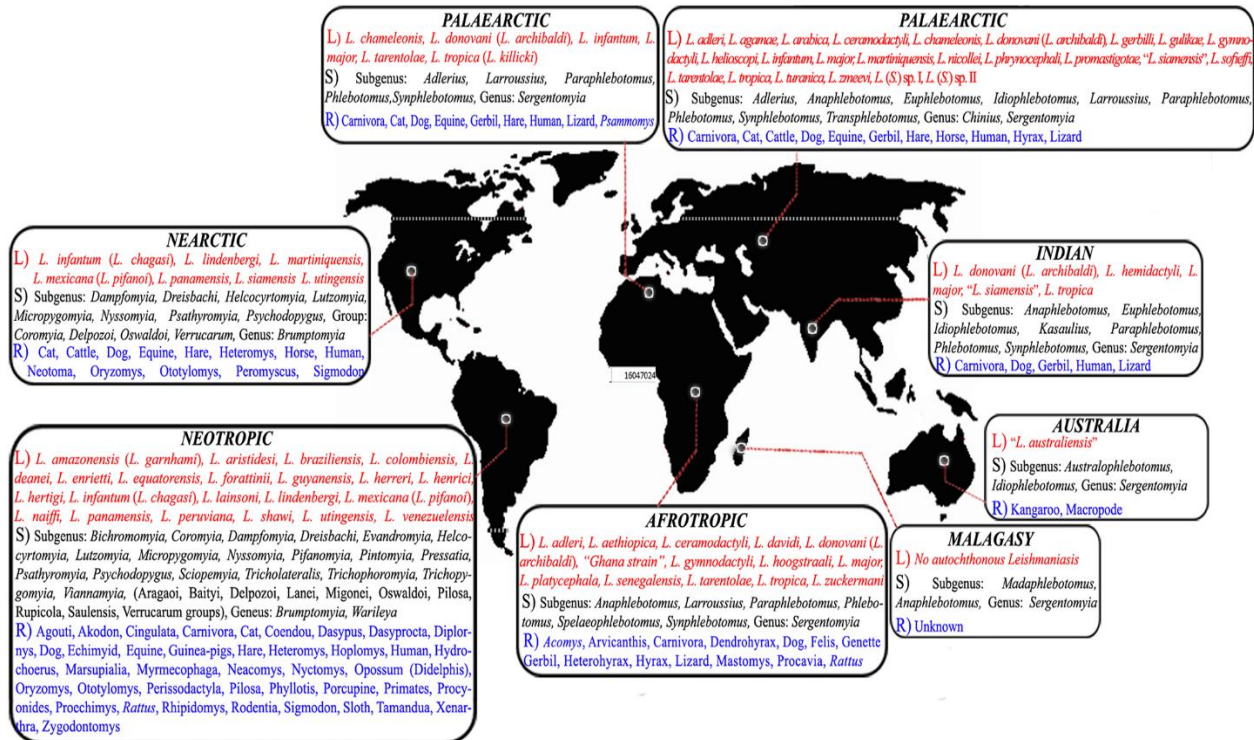


Figure 5 Répartition mondiale de différentes espèces de Leishmania, de phlébotomes et d'hôtes. Akhoundi et al. (2016) [39]

III.2.2 L'agent pathogène

La leishmaniose est une maladie parasitaire causée par des protozoaires flagellés et transmise par le phlébotome, un insecte diptère hématophage. Ces affections, présentent diverses formes cliniques, affectant tant l'homme que les animaux, engendrant la leishmaniose viscérale, la leishmaniose cutanée ou encore la leishmaniose cutanéomuqueuse. La complexité des leishmanioses réside dans la variabilité des manifestations cliniques, résultant de la diversité des espèces de *Leishmania* et des nuances de la réponse immunitaire de l'hôte. Cette diversité nécessite une approche approfondie de la taxonomie pour mieux comprendre les caractéristiques biologiques et morphologiques du parasite [40].

III.2.2.1 Taxonomie

Les leishmanies sont des protozoaires du genre *Leishmania* (Ross, 1903) [32]. Leur classification taxonomique a évolué au fil du temps, et voici comment elles sont actuellement classées selon différentes contributions scientifiques :

Classification de Levine et al. (1980) [41] :

1. **Règne** : *Protista* (Haeckel, 1866)
2. **Sous-règne** : *Protozoa* (Goldfuss, 1817; amendé par Siebold, 1848)
3. **Embranchement** : *Sarcomastigophora* (Honigberg & Balamuth, 1963)
4. **Sous-embranchement** : *Mastigophora* (Diesing, 1866)
5. **Classe** : *Zoomastigophorea* (Calkins, 1909)
6. **Ordre** : *Kinetoplastida* (Honigberg, 1963; révisé par Vickerman, 1976)
7. **Sous-ordre** : *Trypanosomatina* (Kent, 1880)
8. **Famille** : *Trypanosomatidae* (Doflein, 1901; amendée par Grobben, 1905)
9. **Genre** : *Leishmania* (Ross, 1903)

Révision d'Adl (2005) [42] :

En 2005, Adl propose une nouvelle classification en combinant des données d'ultrastructure et des études moléculaires phylogénétiques :

1. **Ordre** : *Euglenozoa* (Cavalier-Smith, 1981; révisé par Simpson, 1997)
2. **Sous-ordre** : *Kinetoplastea* (Honigberg, 1963)
3. **Famille** : *Metakinoplastina* (mentionnée par Vickerman, 2004)

Leishmania est divisée en deux sous-genres, *Leishmania* et *Viannia*, en fonction de la localisation du parasite dans la partie centrale ou postérieure de l'intestin du vecteur.

Table 1 Espèces de Leishmaniose (Roberts & Janovy, 2009) [46]

| Sous-genre | Complexe | Espèce | Localité |
|--------------------------------|--------------------|--|---|
| <i>Leishmania</i> (Ross, 1903) | <i>L. donovani</i> | <i>L. donovani</i> (Laveran et Mesnil, 1903) | Inde, Chine, Bangladesh, Soudan, Éthiopie |

| | | | |
|------------------------------|------------------------|---|--|
| | | | Centre nord de l'Asie, nord-ouest de la Chine, |
| | <i>L. infantum</i> | <i>L. infantum</i> (Nicolle, 1908) | Moyen-Orient, sud de l'Europe, nord-ouest de l'Afrique |
| | | <i>L. chagasi</i> (Cunha et Chagas, 1937) | Amérique du Sud et Centrale |
| | <i>L. tropica</i> | <i>L. tropica</i> (Wright, 1903) | Milieus urbains du Moyen-Orient et de l'Inde |
| | | <i>L. killicki</i> (Rioux, Lanotte et Pratlong, 1986) | Tunisie |
| | <i>L. major</i> | <i>L. major</i> | Afrique, Moyen-Orient, Asie soviétique |
| | <i>L. gerbilli</i> | <i>L. gerbilli</i> (Wang, Qu et Guan, 1973) | Chine, Mongolie |
| | <i>L. arabica</i> | <i>L. arabica</i> (Peters, Elbihari et Evans, 1986) | Arabie Saoudite |
| | <i>L. aethiopica</i> | <i>L. aethiopica</i> (Bray, Ashford et Bray, 1973) | Éthiopie, Kenya |
| | <i>L. mexicana</i> | <i>L. mexicana</i> (Biagi, 1953) | Mexique, Belize, Guatemala, centre sud des États-Unis |
| | | <i>L. amazonensis</i> (Lainson et Shaw, 1972) | Bassin Amazonien, Brésil |
| | | <i>L. venezuelensis</i> (Bonfante-Garrido, 1980) | Venezuela |
| | <i>L. enrietti</i> | <i>L. enrietti</i> (Muniz et Medina, 1948) | Brésil |
| | <i>L. hertigi</i> | <i>L. hertigi</i> (Herrer, 1971) | Panama, Costa Rica |
| | | <i>L. deanei</i> (Lainson et Shaw, 1977) | Brésil |
| Viannia (Velez, 1913) | <i>L. braziliensis</i> | <i>L. braziliensis</i> (Viannia, 1911) | Brésil |
| | | <i>L. peruviana</i> | Ouest des Andes |
| | <i>L. guyanensis</i> | <i>L. guyanensis</i> (Floch, 1954) | Guyane Française, Guyane, Surinam |
| | <i>L. panamensis</i> | (Lainson et Shaw, 1972) | Panama, Costa Rica |

Le genre *Leishmania* comprend plusieurs espèces qui, bien que toutes ayant une morphologie similaire, sont responsables de symptômes cliniques allant des lésions cutanées qui se résorbent d'elles-mêmes à des infections viscérales fatales en passant par des exacerbations inflammatoires entraînant de graves déformations. Les espèces de *Leishmania* sont généralement classées en complexes en fonction de la similarité biochimique de leurs isoenzymes (**Table 1**).

Exacerbés par le nombre croissant d'espèces recensées, la classification et la complexité taxonomique des *Leishmania* persistent suscitant des débats continus. Ces parasites dévoilent une diversité génétique complexe. Environ 53 espèces, réparties dans cinq complexes (*Leishmania*, *Viannia*, *Sauroleishmania*, *Enriettii*, et *Paraleishmania*), ont été décrites, avec 31 espèces parasitant les mammifères, dont 20 considérées pathogènes pour l'homme *Maroli, 2013 [43]*. Cependant, la complexité taxonomique persiste, et de nouvelles avancées moléculaires sont nécessaires pour élucider la position de certaines espèces *Cupolillo, 1998 [44]*.

III.2.2.2 Caractéristiques génomiques

Le génome nucléaire des *Leishmania* est similaire à celui de tous les Kinetoplastida, avec une mitochondrie unique qui contient de l'ADN kinétoplastique circulaire concaténé sous forme de maxi cercles et de mini cercles **[45]**.

La taille des maxi cercles est de quelques dizaines de copies et leur taille est d'environ 20kb, tandis que la taille des minis cercles est d'environ 1kb et ses copies sont de dizaines de milliers. Malgré l'obtention de génomes de références pour quelques espèces par séquençage à haut débit **[47-48-49]**, il semble essentiel de poursuivre ce travail, car la génomique de ces parasites est complexe. En effet, les leishmanies sont des organismes diploïdes avec 34 à 35 chromosomes selon les espèces, mais elles ont une grande plasticité génomique et on trouve souvent des individus monosémiques, disomiques ou trisomiques au sein d'une même souche **[50]**.

III.2.2.3 Morphologie

Le *Leishmania* est un parasite à morphologie dimorphique, avec deux stades distincts dans son cycle de vie, impliquant deux hôtes, l'insecte phlébotome et un mammifère.

Les promastigotes sont des parasites extracellulaires mobiles qui vivent dans le tube digestif du phlébotome dans l'insecte (**Figure 6**). Ils ont un corps fuselé de 5 à 20 µm de long et de 1 à 4 µm de large, prolongé par un flagelle pouvant atteindre 20 µm de long et qui émerge de leur pôle antérieur.

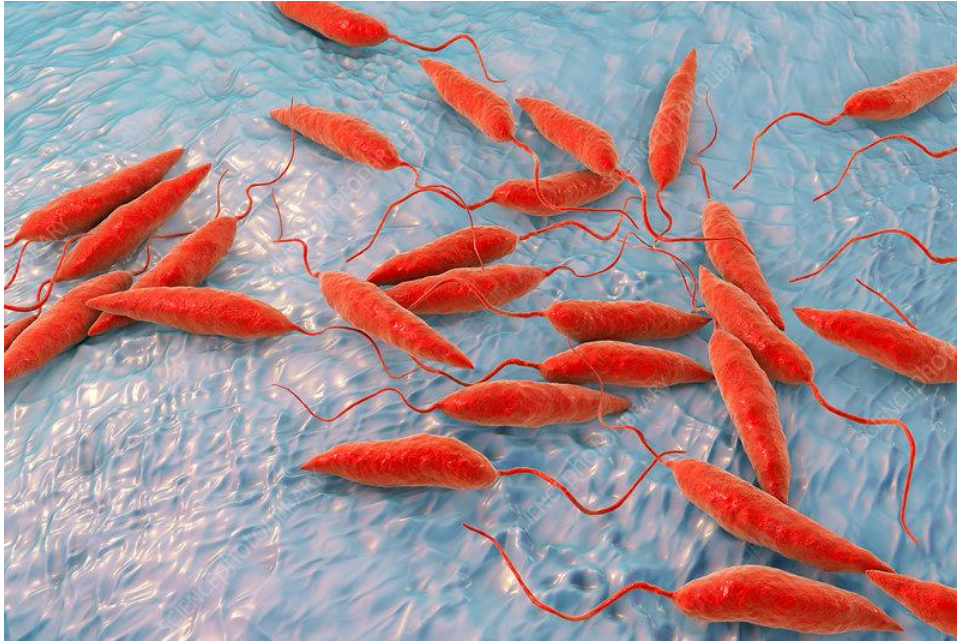


Figure 6 *Forme Promastigote des parasites Leishmania [51]*

Tandis que les amastigotes (**Figure 7**) se trouvent dans les macrophages des mammifères, dans des vacuoles appelées parasitophores.

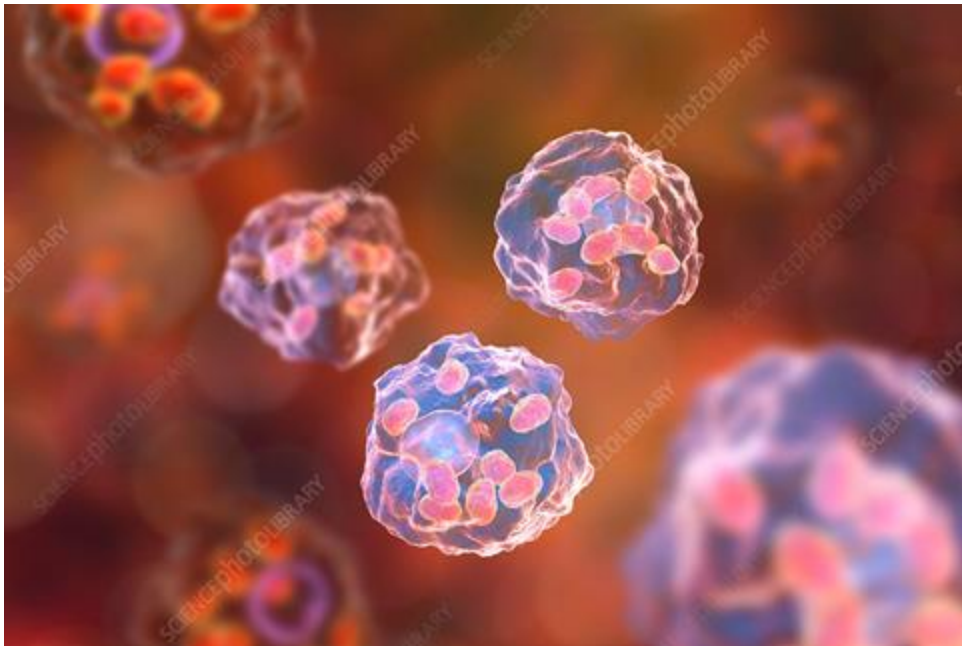


Figure 7 *Forme Amastigote des parasites Leishmania [52]*

Les amastigotes présentent des formes ovoïdes ou sphériques, mesurant de 2,5 à 5 μm de diamètre, avec un flagelle très court et immobile. Les paramètres environnementaux

et leurs variations influencent et régulent la forme et la morphologie de ces parasites, y compris leur différenciation et leur métabolisme. [53].

Effectivement, On a mentionné l'impact de la température, du pH, de la pression en O₂ et en CO₂ sur la forme parasitaire et les métabolismes du glucose et de certains acides aminés. Deux paramètres qui connaissent des fluctuations importantes tout au long du cycle, le pH et la température, semblent être les plus importants et pourraient influencer la mise en place d'un programme de différenciation. Quand les Leishmania sont introduites dans leurs hôtes mammaliens par des insectes vecteurs à sang froid, elles sont d'abord exposées à une augmentation de température d'environ 10°C, puis, après internalisation par les macrophages, à une diminution du pH externe d'environ 2 unités [54].

III.2.2.4 Cycle de Vie

La **Figure 8** représente le cycle de la leishmania qui débute lorsque la femelle phlébotome infectée se nourrit de sang chez un hôte mammifère, salive au lieu de la piqûre et régurgite le sang qui se contamine au contact des parasites sous forme de promastigote. Leishmania se transforme en amastigote chez l'hôte mammifère, infectant un phagocyte (principalement des monocytes/macrophages) du système phagocytaire mononuclé. Par division binaire, ces amastigotes se multiplient dans le phagolysosome du phagocyte, qui est finalement brisé. Les parasites libérés de cette manière sont ingérés par des cellules voisines où le processus reste en cours. Une autre femelle de phlébotome termine le cycle en prenant un repas sanguin du site d'infection et en prélevant des phagocytes contenant Leishmania. Les parasites se divisent à nouveau en promastigotes dans le tube digestif de l'arthropode après 12 à 18 heures. En attendant un nouveau repas sanguin, ces promastigotes se multiplient et se déplacent vers les glandes salivaires et la trompe. [55].

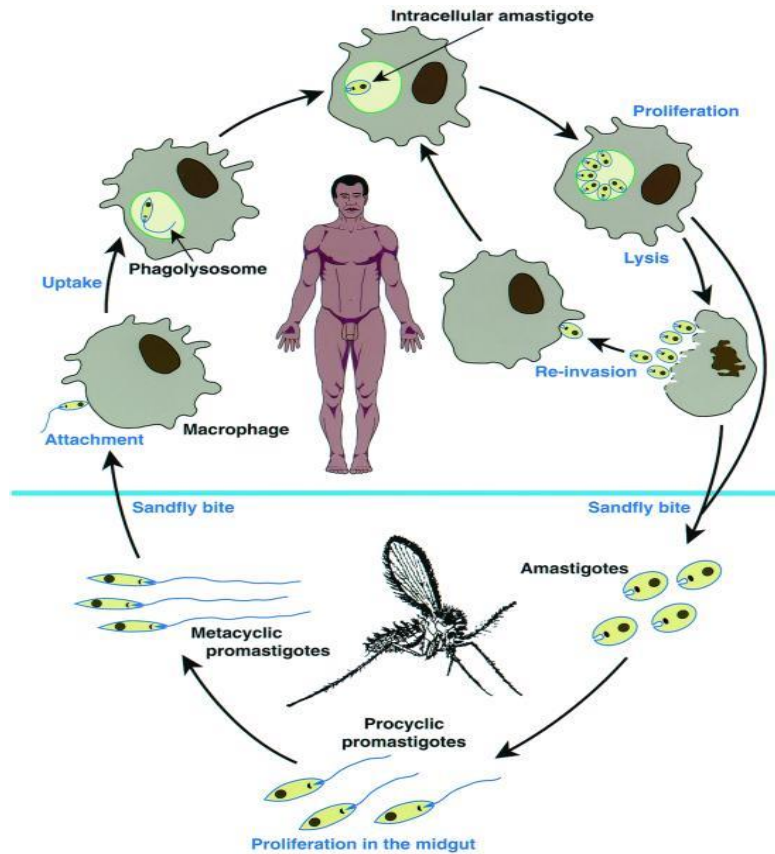


Figure 8 Cycle de vie du parasite *Leishmania* à travers les deux stades [55]

III.2.3 Vecteur de la leishmaniose

III.2.3.1 Morphologie du Phlébotome

De leur apparence similaire à celle des moustiques, étant également appelés les mouches de sable (**Figure 9**) et outre les désagréments causés par leurs piqûres douloureuses, ils sont impliqués dans la transmission d'agents pathogènes tels que *Leishmania*, *Bartonella* et des arbovirus [56].



Figure 9 Phlébotome [57]

Les phlébotomes appartenant à l'ordre des Diptères, à la famille des *Psychodidés* et à la sous-famille des *Phlébotominae*, se répartissent en cinq genres principaux : *Phlebotomus*, *Sergentomyia*, *Lutzomyia*, *Chinius* et *Brumptomyia*. Seules les espèces *Lutzomyia* dans le Nouveau Monde et *Phlebotomus* dans l'Ancien Monde sont capables de transmettre la leishmaniose. Par exemple, dans le bassin méditerranéen, on retrouve des espèces telles que *Phlebotomus papatasi*, *Phlebotomus perniciosus* et *Phlebotomus ariasis*. Dans le Nouveau Monde, les genres *Lutzomyia* englobent des espèces comme *Lutzomyia* sahélien en Inde, *Lutzomyia longipalpis* en Amérique du Nord, *Lutzomyia wellcomei* au Brésil et *Lutzomyia chinensis* en Chine [58].

L'arthropode tire son nom du grec "arthon" et "podos", signifiant respectivement "articulation" et "pieds". Son anatomie se caractérise par un corps segmenté en

métamères, doté d'antennes et de mandibules, le plaçant ainsi dans le sous-embouchement des mandibulantes/antennates. Avec trois paires de pattes, il s'insère dans la classe des insectes et se divise en trois segments majeurs : la tête, le thorax et l'abdomen. **(Figure 10)**

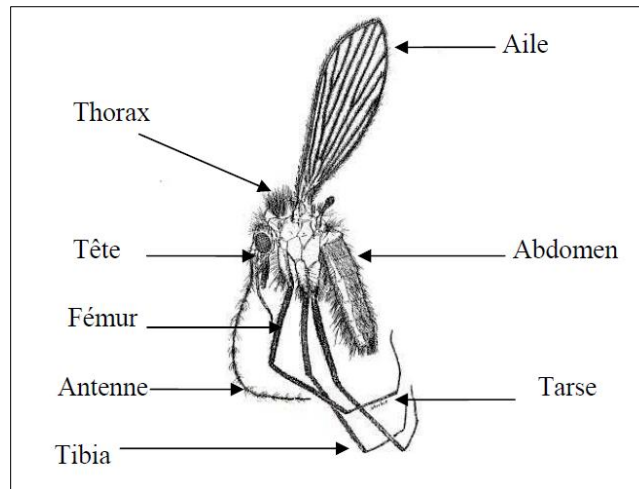


Figure 10 Morphologie d'un phlébotome. [59]

Le thorax des phlébotomes, essentiel pour leur vol, porte une paire d'ailes lancéolées soutenues par des balanciers, garantissant ainsi l'équilibre aérien. Les ailes présentent sept nervures longitudinales et des nervures transverses, tandis que chaque segment thoracique fusionné porte une paire de pattes articulées, longues, fines et couvertes de soie [60]. Le thorax, garni de soies écailleuses très longues, démontre une répartition constante de ces structures [61].

L'abdomen des phlébotomes, qui est constitué de dix segments, est de forme cylindrique avec un cône. Il est composé de 10 segments (7 intacts et 3 altérés), dont le premier est lié au thorax (métathorax). Les 7 segments intacts portent une paire de stigmates respiratoires, tandis que les trois derniers segments altérés représentent les organes génitaux, à savoir les genitalia. L'appareil génital est composé chez les mâles de trois paires de prolongements, coxites, paramères, lobes latéraux et deux lames membraneuses, et chez les femelles de deux ovaires, deux glandes annexes et deux spermathèques formées d'une capsule chitine. [62-63].

III.2.3.2 Développement et Cycle de vie

Les phlébotomes se développent dans des sols organiques riches, avec des substances provenant des matières fécales de lagomorphes ou de rongeurs (**Figure 11**). Les œufs, petits et brunâtres, sont placés dans des zones humides parsemés de détritiques. Le processus de reproduction commence par un accouplement pendant lequel le mâle réalise une parade nuptiale avec des vibrations de l'abdomen et des mouvements oscillatoires, tandis que la femelle reste immobile. Celui-ci se traduit par un accouplement de durée variable qui peut se produire avant ou après le repas sanguin selon les espèces. Les spermatozoïdes sont conservés par la femelle fécondée dans deux spermathèques, dont la morphologie est spécifique à l'espèce et donc cruciale pour la diagnose. Ensuite, les spermatozoïdes sont progressivement réintroduits lors de la ponte afin de permettre la fécondation des œufs [61]. Afin de produire des œufs, la femelle se nourrit de sang afin de se procurer les nutriments dont elle a besoin. Les femelles phlébotomes, après ou avant l'accouplement selon les espèces, cherchent un hôte vertébré pour prendre un repas sanguin qui est indispensable à la maturation des œufs. L'intervalle entre un repas sanguin et la maturation des œufs varie en fonction de l'espèce, de la vitesse de digestion et de la température ambiante. De 4 à 8 jours sont nécessaires pour les colonies de laboratoire. L'oviposition est déclenchée par le contact avec une surface humide [64]. Une dizaine à une centaine d'œufs (entre six et huit jours après le repas sanguin) est déposée par la femelle dans divers gîtes larvaires, où l'éclosion se produit entre 6 et 10 jours après la ponte [65].

Après l'éclosion des œufs, les phlébotomes traversent quatre stades larvaires et un stade nymphal pour passer par des étapes pré-imaginaires. Les larves se nourrissent de débris organiques et végétaux, traversent quatre stades larvaires avant de devenir des nymphes, puis deviennent adultes en quelques jours. On ne connaît pas clairement les gîtes larvaires, mais pour que les larves saprophytes et détritiques puissent se développer, il est essentiel d'avoir un environnement humide et riche en matière organique, comme l'humus du sol [61].

Une fois les stades pré-imaginaires passés, les phlébotomes prennent leur forme adulte et se distinguent par une forte présence de soies, de longues pattes fines et d'une paire

d'ailes lancéolées, laissées au repos dans une position typique en « V ». Ils peuvent se disperser d'une dizaine à une centaine de mètres selon l'espèce et l'environnement [66].

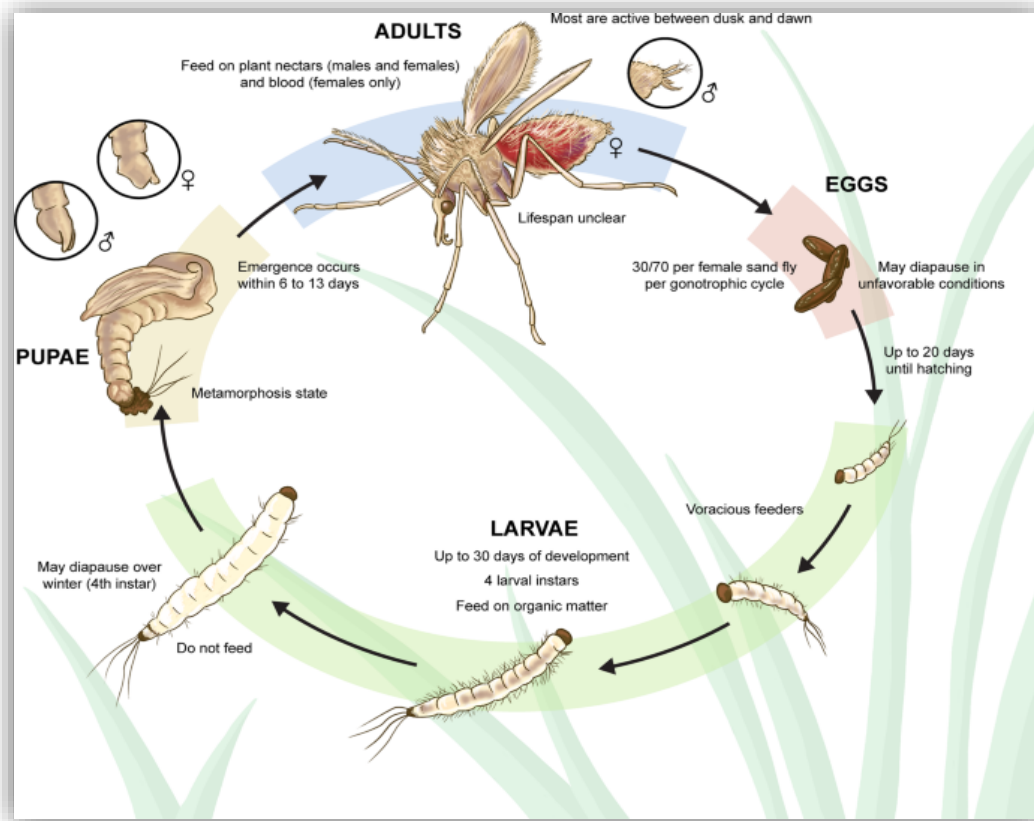


Figure 11 Représentation schématique du cycle de vie des phlébotomes. [68]

La nuit, les phlébotomes sont actifs et se reposent la journée dans des lieux obscurs, frais et humides, comme les fissures des murs de pierre, les caves ou les bâtiments d'élevage. Malgré leur petite portée, ils peuvent être portés par le vent sur de grandes distances. L'identification des sites de reproduction naturelle des phlébotomes n'est pas claire. Ils sont actifs toute l'année dans les régions tropicales, tandis que dans les régions tempérées, ils disparaissent pendant l'hiver, l'espèce étant maintenue par les larves hibernantes de stade IV [61].

On estime qu'ils vivent entre une et trois semaines et cela dépend des espèces. Dans les régions tempérées, leur cycle saisonnier comprend des périodes de diapause pendant l'hiver pour les œufs, ainsi que les derniers stades larvaires de certaines espèces. [67].

III.2.3.3 Espèces de phlébotomes en Algérie

Détectés pour la première fois en Algérie en 1912 par Foley et Leduc [69]. Les phlébotomes ont été l'objet de recherches approfondies à l'Institut Pasteur d'Algérie, dirigées par Parrot [70] et les frères Sargent [71].

Des avancées majeures, tant dans leur classification que dans leur potentiel pathogène, ont été réalisées au cours de leur parcours.

En étudiant des spécimens de *P. papatasi* récoltés à Biskra, foyer connu de leishmaniose cutanée zoonotique, ils ont pu démontrer le cycle complet du parasite dans le tube digestif du phlébotome et sa sortie par l'œsophage au moment de la piqûre [72].

A partir de cette découverte il y'a eu une certaine concentration sur ces insectes vecteurs en vue de leur capacité à transmettre ce parasite. En Algérie plusieurs espèces ont été recensées par *Dedet et al en 1984* et même une distribution des espèces selon l'écologie et l'étage bioclimatique des spécimens capturés (**Table.2**).

Malgré les variations naturels et les différents étages bioclimatiques, certaines espèces de phlébotomes persistent dans toute l'Algérie. Les espèces les plus présentes selon *Dedet et al* c'est l'espèce *P. perniciosus* du genre *Phlebotomus* et *S. minuta parroti* du genre *Sergentomyia*, qui ont été identifiées dans les trois étages bioclimatiques : Humide, Aride et Saharien, indiquant une adaptation remarquable à des conditions climatiques variées déjà en 1984. Bien que ces deux espèces sont les plus rencontrées dans toutes les régions, Néanmoins, certaines espèces restaient spécifiques à un étage bioclimatique, dans les régions humides l'espèce qui domine c'est *S. minuta parroti*, dans l'étage Aride c'est *S. fallax* et dans l'étage saharien c'est l'espèce *P. papatasi*.

En 2011, *Boukraa et al* ont étudié spécifiquement la région du M'Zab, incluant Ghardaïa, et ont identifié sept espèces de phlébotomes c'est-à-dire deux espèces en plus que ceux recensés par *Dedet et al*. Les espèces les plus abondantes étaient *Sergentomyia antennata* qui en 1984 n'été pas présente dans cette région, *Phlebotomus papatasi*, *S. minuta* et *S. fallax* déjà présentes et dominantes en 1984.

Table 2 Distribution des Phlébotomes d'Algérie selon l'étage bioclimatique [72].

| Climat | Genre | Espèce |
|----------------|-------------------|--|
| Etage Humide | 7 Phlebotomus | P. perniciosus P. ariasi P. perfiliewi P. sergenti P. chadlii P. longicuspis P. papatasi |
| | 1 Sergentomyia | S.minuta parroti |
| Etage Aride | 7 Phlebotomus | P. perniciosus P. ariasi P. perfiliewi P. sergenti P. chabaudi P. longicuspis P. papatasi |
| | 4 Sergentomyia | <u>S. fallax</u> S. minuta parroti S. antennata S. dreyfussi |
| | 1 Paraphlebotomus | P. alexandri |
| Etage Saharien | 4 Phlebotomus | <u>P. papatasi</u> P. sergenti P. chabaudi P. perniciosus |
| | 4 Sergentomyia | S. minuta parroti S. fallax S. Christophersie S. antennata S. clydei |
| | 1 Paraphlebotomus | P. alexandri |

Les recherches récentes montrent que les espèces de phlébotomes précédemment recensées en Algérie dans les années 1980 par *Dedet et al.* Persistent et sont encore présentes de nos jours. Certaines comme *S. fallax* et *P. chabaudi*, auparavant limitées aux régions désertiques, ont même étendu leur territoire à des zones plus humides. Cela indique une adaptabilité de ces espèces à des conditions climatiques variées. D'autre part, de nouvelles espèces non répertoriées historiquement en Algérie ont été découvertes très récemment, telles que *Paraphlebotomus kazeruni* et *P. mariei* (**Table 3**). La persistance des anciennes espèces et l'émergence de nouvelles démontrent l'évolution constante des populations de phlébotomes ainsi que leur environnement dans

le territoire algérien. Leurs capacités d'adaptation soulèvent également des inquiétudes quant à la potentielle expansion des leishmanioses transmises par ces insectes vecteurs.

Table 3 Distribution géographiques des phlebotomes [73]

| Genre | Espèce | Region |
|--------------------------------------|---|---|
| Phlebotomus | Phlebotomus (Phlebotomus) bergeroti | Afrique (Algérie, Libye, Tchad) |
| | Phlebotomus (Paraphlebotomus) chabaudi | Afrique du Nord (Algérie, Tunisie, Libye, Égypte) |
| | Phlebotomus (Paraphlebotomus) alexandri | Afrique du Nord (Égypte) |
| | Phlebotomus (Paraphlebotomus) kazeruni | Afrique (Algérie) |
| | Phlebotomus (Paraphlebotomus) sergenti | Afrique du Nord (Algérie, Maroc, Tunisie) |
| | Phlebotomus (Larrousius) longicuspis | Afrique (Égypte, Libye) |
| | Phlebotomus (Larrousius) perfiliewi | Afrique du Nord (Égypte, Libye, Tunisie) |
| | Phlebotomus (Larrousius) perniciosus | Europe du Sud, Afrique du Nord, Moyen-Orient |
| | Phlebotomus (Larrousius) ariasi | Europe du Sud, Afrique du Nord |
| | Phlebotomus (Larrousius) tobbi | Moyen-Orient, Asie du Sud |
| | Phlebotomus (Adlerius) arabicus | Moyen-Orient (Arabie saoudite, Égypte) |
| | Phlebotomus (Adlerius) halepensis | Moyen-Orient, Asie du Sud |
| | Phlebotomus (Euphlebotomus) argentipes | Asie (Inde, Bangladesh) |
| | Phlebotomus (Anaphlebotomus) papatasi | Régions tropicales et subtropicales |
| | Phlebotomus (Phlebotomus) duboscqi | Afrique Orientale |
| Phlebotomus (Synphlebotomus) martini | Asie (Afghanistan, Iran, Pakistan) | |
| Sergentomyia | Sergentomyia (Sergentomyia) magna | Madagascar |
| | Sergentomyia (Sergentomyia) antennata | Afrique du Nord |
| | Sergentomyia (Sergentomyia) hamoni | Afrique de l'Ouest |
| | Sergentomyia (Sergentomyia) | africana : Afrique sub-saharienne |
| | Sergentomyia (Sergentomyia) schwetzi | Afrique subsaharienne, péninsule arabique |
| | Sergentomyia (Sintonius) cuthbertsoni | Afrique de l'Est |
| | Sergentomyia (Sergentomyia) clydei | Afrique |
| | Sergentomyia (Sergentomyia) fallax | Afrique (Éthiopie, Soudan, R. Centrafricaine, etc.) |

III.2.4 Réservoirs de la Leishmaniose

Les réservoirs naturels des Leishmanies sont des mammifères domestiques ou sauvages chez lesquels le parasite colonise les cellules du système des phagocytes mononuclées.

(Figure 12)

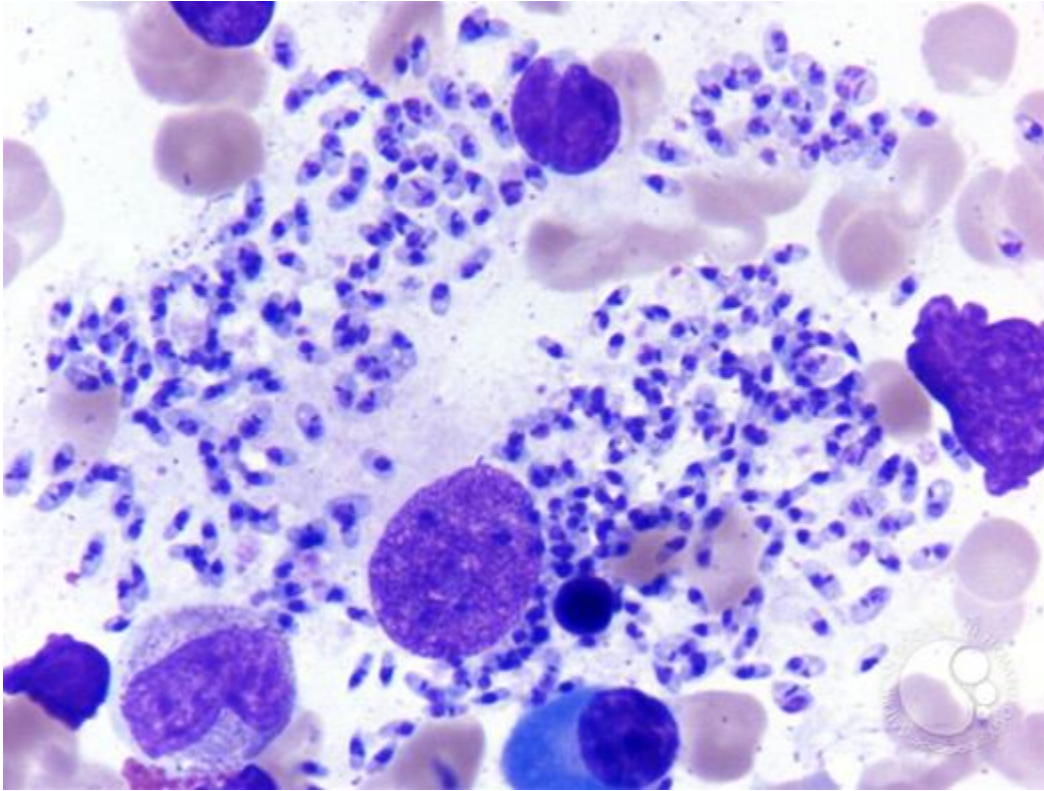


Figure 12 Infection par la forme amastigote de Leishmania [74]

On retrouve différents types de réservoirs : carnivores, rongeurs, marsupiaux, édentés, primates [75]. Dans certaines situations, l'individu est le seul hôte du parasite [76]. Dans cette situation, on parle de leishmaniose anthroponotique. Quand l'animal est le lieu de répartition du parasite, on parle de zoonotique [75]. À ce jour, seuls les mammifères ont été identifiés comme étant porteurs de protozoaires du genre *Leishmania*, qu'ils soient pathogènes ou non pour l'homme. Ils ont la possibilité d'être des réservoirs ou des hôtes accidentels pour le parasite.

Selon l'hôte, on reconnaît la distinction entre des cycles primaire et secondaire, zoonotiques, où des mammifères sauvages et domestiques jouent respectivement le rôle de caisses (**Figure 13**). De la même manière, l'être humain peut jouer un rôle de réservoir de parasites dans certains complexes, créant ainsi un cycle anthroponotique ou tertiaire avec le vecteur. Dans cette situation, l'affection humaine peut être endémique et épidémique [78].

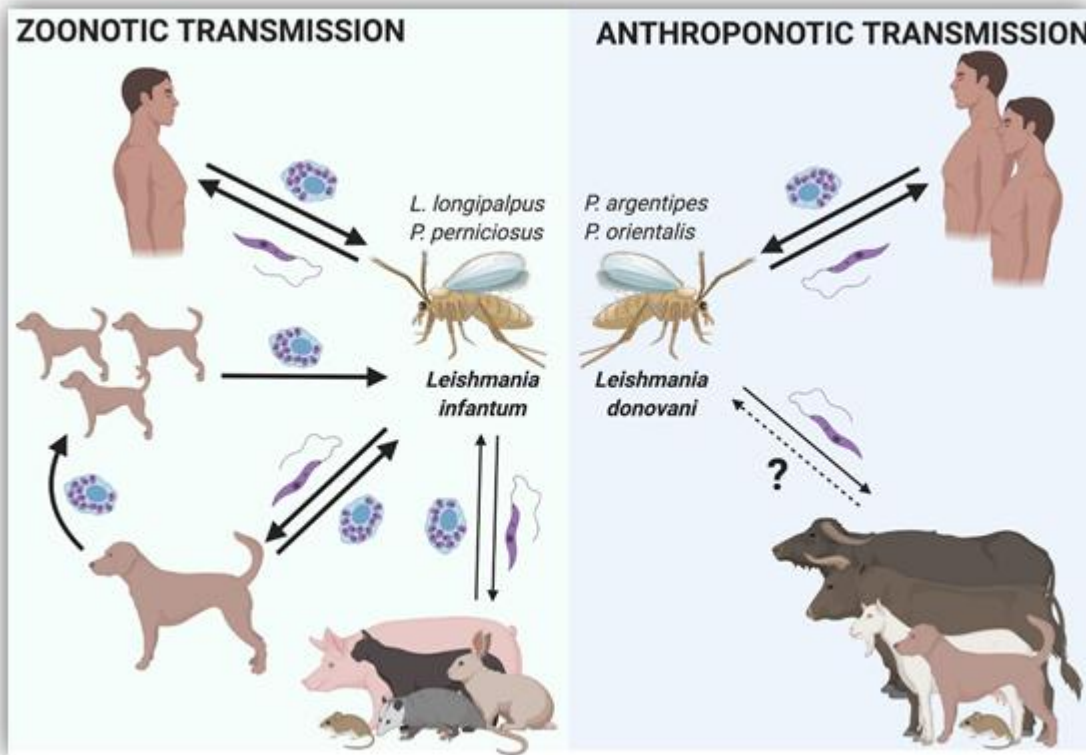


Figure 13 Différents cycles de transmission de la Leishmaniose en fonction de l'espèce du parasite, hôte [77].

Les caractéristiques des foyers de transmission des Leishmanioses diffèrent selon les espèces et les régions géographiques, selon *Mazelet en 2004*. Trois catégories de foyers sont schématiquement distinguées en fonction des interactions entre les réservoirs de pathogènes, les vecteurs et les hôtes humains :

Foyer primaire : le réservoir de pathogènes est constitué par la faune sauvage dans un écosystème donné. Un vecteur spécifique assure la transmission du parasite au sein de ce réservoir animal primaire. Ce même vecteur, du fait de sa faible affinité pour l'homme (anthropophilie limitée), ne transmet généralement pas le pathogène à la population humaine. Cependant, un second vecteur, plus opportuniste et anthropophile, peut servir de pont et véhiculer accidentellement le parasite depuis son réservoir primaire jusqu'à l'homme.

Foyer secondaire (Cycle sylvatique) : on observe une séparation spatiale entre le réservoir sauvage/vecteur d'un côté, et les communautés humaines de l'autre. La

contamination humaine ne peut survenir qu'à l'occasion de contacts épisodiques avec la faune sauvage ou ses vecteurs, lors d'incursions en zones naturelles (chasse, pêche, cueillette, déboisement, etc).

Foyer tertiaire (Cycle rural et urbain) : le réservoir primaire, son vecteur spécifique et les populations humaines partagent la même niche écologique suite à l'anthropisation d'un écosystème initialement sauvage. Deux sous-cas de figure se présentent : soit la transmission directe du pathogène de la faune réservoir à l'homme ; soit l'implication d'hôtes péri-domestiques (animaux d'élevage : les chiens) qui amplifient le cycle parasitaire en tant que réservoir secondaire, augmentant ainsi le risque d'infection humaine [79].

III.2.4.1 Répartition des Réservoirs de Leishmaniose Cutanée

III.2.4.1.1 Dans le monde

Dans le Nouveau Monde, les formes cutanées humides de la leishmaniose sont liées aux réservoirs que constituent les rongeurs, comme c'est le cas pour *L. mexicana* et *L. amazonensis* en Amérique du Sud. La situation épidémiologique y est complexe en raison du grand nombre d'espèces de parasites *Leishmania*. Dans l'Ancien Monde, en 1993, *Musser et Carleton* ont recensé 42 espèces de mammifères appartenant à 25 genres, 9 familles et 4 ordres (*Primates*, *Carnivora*, *Hyracoidea*, *Rodentia*) infectés par des leishmanies de huit complexes différents (*L. major*, *L. arabica*, *L. turanica*, *L. donovani*, *L. killicki*, *L. infantum*, *L. aethiopica* et *L. gerbilli*). Les formes humides de leishmaniose cutanée de l'Ancien Monde sont associées à des réservoirs de rongeurs, tout comme *L. mexicana* et *L. amazonensis* en Amérique du Sud. Certaines leishmanioses cutanées, comme *L. tropica* et *L. péruviana*, ont pour unique réservoir le chien, dont le rôle reste néanmoins ambigu dans la leishmaniose cutanéomuqueuse. La transmission de *L. donovani* est interhumaine, mais il semble que les cas humains de *L. infantum* et *L. chagasi* soient contractés à partir de nombreux cas canins [80].

III.2.4.1.2 En Algérie

Le rat des sables, *Psammomys Obesus* est le principal réservoir du parasite, qui vit dans les environs des lacs salés dans les régions steppiques (Chott Echergui à Saïda, Chott El Hodna à Msila) **(Figure 14)**. *Psammomys Obesus* est une gerbille de l'Afrique septentrionale, vivant dans les zones désertiques sèches et semi-désertiques. Cette gerbille convient dans un milieu où l'eau et la nourriture sont peu abondantes. Son aire de répartition est limitée, son terrier est moins vaste et sa reproduction est régie par la période lumière. C'est une plante salée de la famille des chénopodiacées qui lui est alimentaire. Le réservoir suivant est péri-domestique, et il est caractérisé par le rat des champs ou Mérion (*Merion Shawi*), qui se rencontre dans le Nord du pays. **[82]**.



Figure 14 Rat des sables-*Psammomys Obesus* [81].

III.2.4.1.3 En Algérie centrale

Les deux espèces de parasites qui existent dans cette partie du pays (Ghardaïa) impliquent des cycles épidémiologiques distincts avec des réservoirs différents. *L. major* est transmise par le phlébotome *Phlebotomus papatasi* et ses principaux réservoirs sont les rongeurs du désert *Psammomys obesus* et *Meriones shawi*.

L. killicki est, quant à elle, transmise par *Phlebotomus sergenti* et son réservoir suspecté est le rongeur *Massoutiera mzabi*, en particulier l'espèce *Ctenodactylus gundi*. Cette dernière a été trouvée naturellement infectée par *L. killicki* en Tunisie. À Ghardaïa, la grande abondance de *Massoutiera mzabi*, partageant le même biotope que *P. sergenti*, suggère également son rôle de réservoir pour *L. killicki* dans cette région. Ainsi, la leishmaniose cutanée à Ghardaïa implique deux cycles distincts avec des réservoirs différents : *P. obesus* et *M. shawi* pour *L. major*, et vraisemblablement *C. gundi* et *M. mzabi* pour *L. killicki* [82].

III.2.5 Impacts Anthropiques et Environnementaux sur les Leishmanioses

Les leishmanioses sont fortement influencées par des facteurs anthropiques et environnementaux qui modifient leurs dynamiques de transmission. Selon l'Organisation mondiale de la Santé [12], l'évolution de la leishmaniose est étroitement liée aux conditions climatiques, dépendant notamment de la température et du taux d'humidité. Une augmentation de la température ambiante a des conséquences significatives, favorisant la prolifération des vecteurs, le taux de survie quotidien, le nombre de générations annuelles, et réduisant les périodes larvaires et nymphales. Par ailleurs, cette augmentation stimule l'activité sanguine des phlébotomes, facilitant ainsi la transmission des maladies vectorielles [83].

L'écologie des *Leishmania* est étroitement liée à celle de leurs divers hôtes et vecteurs. Chaque foyer présente un ou plusieurs hôtes de *Leishmania*, qu'ils soient domestiques, sauvages, voire humains, avec des niveaux variables de susceptibilité [84]. Les phlébotomes, en tant que vecteurs, affichent une distribution cosmopolite déterminée par des facteurs abiotiques et biotiques, notamment leurs préférences trophiques.

Dans les pays équatoriaux, notamment dans le Nouveau Monde, les phlébotomes sont abondants en raison des conditions environnementales favorables. Les niveaux élevés et constants d'humidité et de température, conjugués à une abondance de matière organique et à une diversité d'abris, créent un habitat propice à leur survie [85-86].

Dans les zones désertiques et semi-arides de l'Ancien Monde, en revanche, les phlébotomes se trouvent près d'habitats adaptés à leurs larves, comme des terriers de

rongeurs et des fissures d'habitats, où ils trouvent à la fois de la matière organique et de l'humidité. [87-88].

Les écosystèmes et les dynamiques du cycle de *Leishmania* ont été altérés par les éléments socio-économiques et les modifications écosystémiques causées par les constructions, la déforestation, l'intensification agricole, les barrages, l'irrigation et de nouvelles pratiques agricoles. L'urbanisation rapide de la leishmaniose viscérale LV, qui était à l'origine zoonotique et rurale, s'est rapidement propagée dans les zones urbaines et périurbaines. Cela est dû aux changements environnementaux causés par l'homme et à la migration rapide des populations rurales vers les zones périurbaines qui manquent d'infrastructures suffisantes. [89-90-91].

D'autres activités humaines plus petites que l'urbanisation massive peuvent aussi être à l'origine de cas. Par exemple, l'installation de barrages hydroélectriques sans structures appropriées a entraîné des conditions de vie défavorables, favorisant ainsi la propagation des leishmanioses [92]. L'augmentation des cas de leishmaniose a également été causée par les opérations militaires et le tourisme [93]. En Colombie, dans la vallée de la rivière Magdalena, la destruction des forêts, la mise en place de pâturages et l'augmentation de la densité de population ont également favorisé l'émergence de *Lu. Longipalpis* [94].

On a fait les mêmes constatations pour la leishmaniose cutanée LC, qui était traditionnellement une maladie rurale, mais qui s'est propagée dans les zones péri-domestiques. Par exemple, la lésion cutanée zoonotique de la leishmaniose LCZ, provoquée par *Leishmania major*, était traditionnellement limitée aux zones arides et semi-arides du sud de l'Algérie. Elle se développe cependant depuis quelques décennies vers le nord, dépassant la barrière de l'Atlas tellien. La désertification et les changements environnementaux pourraient être à l'origine de cette migration, ce qui entraînerait le déplacement des populations de rongeurs réservoirs et de phlébotomes vecteurs. De nouvelles colonies de LCZ ont donc émergé dans les Hauts Plateaux et les régions steppiques. De plus, on observe maintenant des cas de co-endémicité de *L. major* et *L. infantum* dans certaines régions du Nord, ce qui rend l'épidémiologie plus complexe. Dans le même temps, on a découvert pour la première fois *L. tropica*, responsable de formes cutanées chroniques, dans le centre et le nord-ouest du pays. Ces évolutions reflètent

une transformation des cycles de transmission des lésions cutanées de la leishmaniose en Algérie [38].

Selon une recherche menée par *Salomón* et ses collègues (2008), il est démontré que le contact humain-vecteur effectif est toujours lié à la végétation périurbaine et aux changements de l'écotone, même si des cas sont observés en milieu urbain [94].

Outre ces évolutions anthropiques, nous sommes actuellement confrontés au changement climatique à grande échelle qui joue également un rôle crucial dans la propagation des leishmanioses. Actuellement, des préoccupations sont exprimées quant à l'expansion des leishmanioses en raison des changements climatiques. Les liens entre les changements climatiques et l'évolution de l'incidence de la LV chez l'homme ont été mis en évidence en Colombie [95]. Le nord-est de l'Amérique centrale a enregistré une augmentation de près de 15 % des cas de leishmaniose humaine pendant les années El Niño, qui provoquent des sécheresses locales. Par conséquent, ces variations de fréquence pourraient être attribuées aux conséquences des précipitations.

Ces dernières années, de nombreuses études théoriques basées sur la modélisation ont démontré que le climat influence la répartition des vecteurs [96-97-98]. Selon *Purse* et ses collègues (2017), leur modèle a démontré que les éléments climatiques expliquent environ 80% de la variation de la distribution des cas de leishmanioses à l'échelle du continent sud et méso-américain [99].

L'étude des foyers de transmission de la leishmaniose reste complexe en raison de plusieurs facteurs liés aux changements globaux. Premièrement, le cycle de la maladie implique une grande diversité d'espèces : phlébotomes (vecteurs), *Leishmania* (parasites) et hôtes mammifères. Deuxièmement, il est difficile de confirmer avec certitude quelles espèces de phlébotomes agissent comme vecteurs et quels mammifères sauvages servent d'hôtes. Enfin, le diagnostic des cas humains présente des défis importants. Ces éléments combinés rendent l'étude de la transmission de la leishmaniose particulièrement ardue dans un contexte de changements environnementaux [100]. Plusieurs décennies ont passé depuis la description des parasites *Leishmania*, et leur épidémiologie reste mal connue, car la plupart des études ont accordé plus d'importance à la santé humaine, les

recherches sur l'écologie des leishmanioses sont en revanche relativement récentes et moins nombreuses [101].

En résumé, les leishmanioses représentent un enjeu de santé publique complexe, qui demande une approche globale pour appréhender et gérer ces maladies intriquées. La recherche approfondie et la collaboration internationale sont nécessaires pour lutter contre cette maladie tropicale négligée, en raison des interactions entre facteurs climatiques, anthropiques et environnementaux.

III.3 Matériel et Méthode

III.3.1 Calibration et évaluation du Modèle « GAM » sur un jeu de données réelles

III.3.1.1 Zone d'étude

Ghardaïa est située au centre de l'Algérie septentrionale, à 3°45' est et 32°30' nord. Elle est entourée de désert avec une superficie de 86 650 km² et une population de 488 965 habitants [102].répartis sur 13 communes. La ville principale de Ghardaïa est située dans une vallée connue sous le nom de M'zab. Cette vallée forme un couloir ouvert de part et d'autre de la rivière principale, l'Oued M'zab, qui coule dans la même direction (**Figure 15**). Les escarpements rocheux et les oasis déterminent le paysage dans lequel se trouvent des villes comme Berriane, Guerrara et Zelfana autour desquelles gravitent d'autres oasis comme El Ménéa [103].

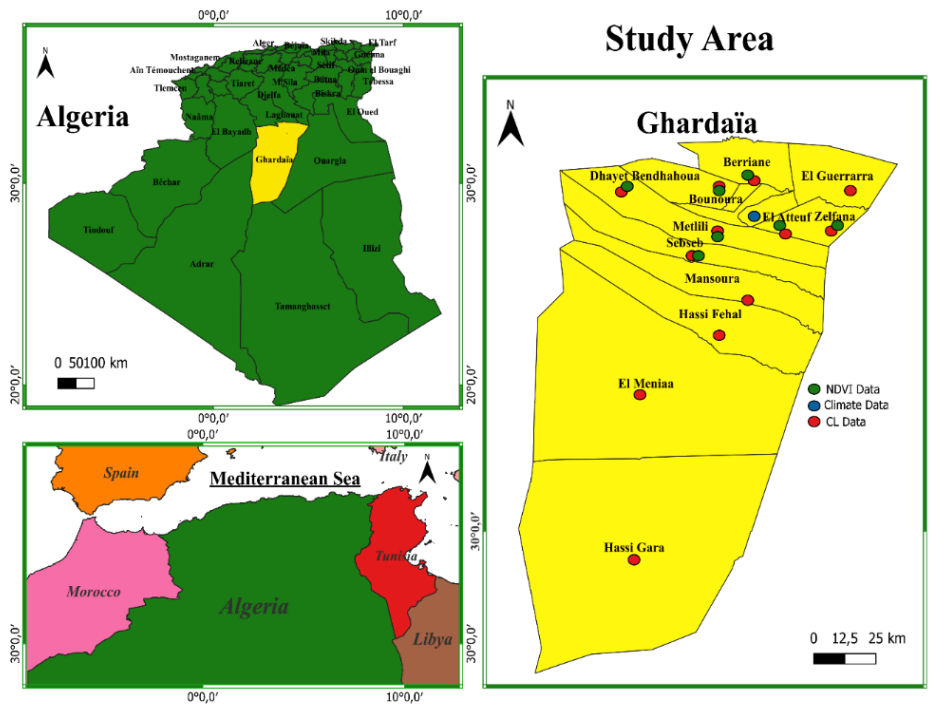


Figure 15 Carte géographique de Ghardaïa Algérie 2023 (QGIS)

Son climat est connu pour être aride avec un environnement à végétation réduite où les précipitations sont faibles et irrégulières, tandis que les températures sont les plus élevées en juillet (36°C) et plus basses en janvier (12°C) [104]. Dans cette région, la LC est causée par *Leishmania major* et *Leishmania killicki* transmis par les mouches des sables

Phlebotomus papatasi et *Phlebotomus sergenti* et les principaux réservoirs sont les rongeurs : *Meriones shawi*, *Psammomys* et *Massoutiera mzabi* [105].

III.3.1.2 Collecte des données

III.3.1.2.1 Données épidémiologiques

Les données épidémiologiques relatives à l'incidence mensuelle de la leishmaniose cutanée à Ghardaïa et en Algérie, couvrant la période du 1er janvier 2000 au 1er décembre 2020, ont été obtenues auprès du Ministère de la Santé algérien. Ces données ont été fournies au format Excel, s'inscrivent dans le cadre de la surveillance épidémiologique de la maladie et constituent la base de notre analyse temporelle.

III.3.1.2.2 Données climatiques

Les données météorologiques de la région de Ghardaïa (Température minimale, température maximale, température moyenne, humidité, précipitations et vitesse du vent) du 1er janvier 2000 au 1er décembre 2020 ont été collectées à partir de la station météorologique 605660 (DAUG) sur le site TuTiempo.net [106].

III.3.1.2.3 Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

Le NDVI est un indice de végétation couramment utilisé qui peut fournir des indications sur les changements de la couverture végétale au fil du temps. Pour cette étude, les données mensuelles de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) ont été obtenues auprès de Copernicus Global Land Services [107]. Les données couvrent plusieurs municipalités de la province algérienne de Ghardaïa (Ghardaïa, Metlili, Sebseb, Bounoura, Dhayet Ben Houa, El Atteuf, Bounoura, Zelfana) pour lesquelles le NDVI moyen a été calculé de janvier 2000 à juin 2020 et a été dérivé d'images satellites du capteur Sentinel-2 avec une résolution de 1 km qui capturent la réflectance des longueurs d'onde du proche infrarouge et de la lumière visible. Les données obtenues sont des données matricielles sur 10 jours, ce qui signifie qu'elles fournissent une valeur moyenne du NDVI pour chaque période de 10 jours.

III.3.1.3 Analyse de données

III.3.1.3.1 Statistiques de base

Pour commencer à modéliser la relation entre la LC et les variables environnementales dans la région de Ghardaïa, nous avons effectué une analyse descriptive des données portant sur 20 ans. Cette analyse a consisté à calculer les valeurs minimales, maximales, moyennes et l'écart-type des facteurs environnementaux, ainsi qu'à déterminer les coefficients de corrélation afin d'identifier toute relation potentielle. Ces résultats serviront de base à notre analyse de modélisation ultérieure.

III.3.1.3.2 Modèle additif généralisé (GAM)

Dans notre étude, nous avons utilisé des modèles additifs généralisés (GAM) pour répondre aux exigences des tâches prédictives et explicatives. L'analyse explicative visait à identifier les facteurs de risque pertinents qui contribuent à l'émergence de la leishmaniose cutanée et à comprendre la dynamique de la maladie. D'autre part, les modèles prédictifs ont été utilisés pour aider les décideurs politiques à prendre des décisions éclairées afin de prévenir la propagation de l'épidémie. Les 'GAM' ont été développés par *Hastie et Tibshirani (1990)* [108]. Il s'agit d'un outil statistique largement utilisé en écologie pour modéliser les relations entre les variables prédictives et la variable réponse [109-112]. Les GAM sont une extension semi-paramétrique du modèle linéaire généralisé (GLM) pour tenir compte d'une relation non linéaire entre les variables dépendantes et un ensemble de covariables [113-114], ils fournissent une approche flexible pour estimer les relations fonctionnelles lisses, ce qui permet une représentation plus précise de l'association complexe qui existe souvent dans les systèmes écologiques. En utilisant les GAM, nous pouvons mieux comprendre et analyser les effets de multiples facteurs sur la variable cible, ce qui est essentiel pour prendre des décisions et faire des prédictions en connaissance de cause dans la recherche environnementale [115]. Le choix du modèle est influencé par la relation non linéaire qui est supposée exister entre l'environnement et la propagation de la leishmaniose cutanée.

Les GAM sont représentés par la formule de *Wood 2017* comme suit :

$$g(u_i) = X_i^* \theta + f_1(x_{1i}) + f_2(x_{2i}) + f_3(x_{3i}, x_{4i}) + \dots$$

$$u_i = E(Y_i) +$$

Où

g : Est une fonction de liaison

Y_i : Désigne une variable de réponse

X_i^* : Est une ligne de la matrice du modèle pour tout composant de modèle strictement paramétrique, le vecteur θ contient des paramètres fixes et les f_i sont des splines lisses des covariables explicatives (facteurs environnementaux) x_i . La spécification des fonctions lisses peut être réalisée en utilisant soit des fonctions polynomiales par morceaux, soit des fonctions de base. Les points de jonction des segments polynomiaux sont appelés nœuds, communément désignés par k . Dans le cas d'études de séries chronologiques où les facteurs climatiques sont les variables prédictives, les fonctions splines cubiques sont les plus largement adoptées [116].

Dans ces splines, si b_k est la fonction de base cubique k_i , alors que f est représentée comme suit :

$$f(x) = \sum_{k=i}^k b_k(x) Bk \dots \dots \dots \mathbf{(3)}$$

Où k est le nombre total de nœuds et à chaque nœud correspond un ensemble de paramètres inconnus représentés par Bk . Dans le cas de l'utilisation de courbe cubiques, la courbe résultante sera composée d'une séquence de polynômes cubiques qui présentent une continuité en termes de valeur de la dérivée première et de la dérivée seconde [117].

Les données ont été divisées de manière aléatoire en ensembles d'entraînement et de test. L'ensemble d'entraînement, qui contient 80 % des données, a été utilisé pour développer le modèle final, tandis que les 20 % restants ont été utilisés pour évaluer les performances du modèle, ce qui permet d'éviter les sur ajustements et de fournir une estimation plus précise de la manière dont le modèle fonctionnera sur des données nouvelles et inédites [118].

Pour cette étude, nous avons sélectionné plusieurs covariables environnementales qui sont des prédicteurs importants de l'incidence de la leishmaniose cutanée, notamment les précipitations (PRC), l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'humidité relative (HM), la température moyenne (AT) et la vitesse du vent (WS). Ces facteurs environnementaux sont connus pour être associés à la présence et à l'activité des phlébotomes, qui sont les vecteurs qui transmettent le parasite responsable de la LC à l'homme. En outre, nous avons calculé une corrélation croisée entre ces covariables et les cas de LC avec un décalage de 1 à 12 mois afin d'identifier les décalages optimaux. Ces décalages optimaux peuvent être utilisés pour modéliser la relation entre les facteurs environnementaux et les cas de LC d'une manière qui tienne compte du décalage temporel entre eux. Le modèle a été ajusté à l'aide du paquet mgcv dans RStudio 4.2.1.

La variable précipitation (PRC) a été décalée de six mois afin d'évaluer ses effets retardés potentiels sur la variable dépendante. Le modèle additif généralisé (GAM) intégrait des termes lissés pour tous les facteurs environnementaux : humidité (HM), température moyenne (AT), vitesse du vent (WS) et indice de végétation par différence normalisée (NDVI) ainsi que les précipitations (PRC) dans leur forme décalée. Le lissage de ces termes a été réalisé à l'aide de fonctions de lissage de régression cubiques, avec des nœuds stratégiquement positionnés au milieu de l'année (0,5 et 12,5) pour capturer les variations saisonnières. L'argument "select" de la fonction gam () a été fixé à 'VRAI', ce qui a permis de sélectionner automatiquement le niveau optimal de lissage pour chaque covariable. Le modèle GAM a été ajusté à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance restreint et de la distribution binomiale négative pour tenir compte de la nature de comptage de la variable dépendante. Le modèle final est utilisé pour faire des prédictions sur de nouvelles données et peut être évalué à l'aide d'une variété de

mesures, telles que l'AIC (Critère d'Information d'Akaike), le BIC (Critère d'Information Bayésien), la valeur R^2 ajusté, le score REML (Maximum de Vraisemblance Restreint) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

III.3.2 Prédiction de l'évolution de la Leishmaniose Cutanée dans le Nord-Ouest de l'Afrique

Cette section vise à suivre l'évolution de la Leishmaniose Cutanée dans les pays d'Afrique du Nord, notamment l'Algérie, le Maroc et la Tunisie, sur la période de 2021 à 2100. En utilisant les scénarios de changement climatique et les résultats du modèle additif généralisé (GAM) décrit précédemment, l'objectif est d'établir un système d'alerte pour prédire la propagation future de la Leishmaniose cutanée. Cette analyse contribuera à une compréhension plus approfondie de l'impact du changement climatique sur l'évolution des maladies vectorielles. Les résultats de cette section orienteront les actions proactives pour atténuer l'impact prévu et préparer les mesures de prévention contre de telles maladies dans la région.

III.3.2.1 Données

Les données utilisées dans le modèle GAM qui servira de base pour notre prédiction sont les mêmes utilisées dans la première partie sauf pour la variable « NDVI » qui a été écartée de l'analyse car il n'existe pas de prédiction pour l'index de couverture végétale dans cette région, de plus les unités des variables ont été modifiées préalablement avant la calibration du modèle pour être adéquates à celles des données du modèle CorDEX.

Le modèle Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) constitue une initiative internationale visant à fournir des projections climatiques régionales détaillées pour diverses régions du globe. Dans le cadre de cette étude, des données CORDEX spécifiques ont été utilisées pour évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur la transmission de la leishmaniose cutanée dans la région d'étude.

Les données téléchargées à partir du Climate Data Store (CDS) correspondent au scénario RCP 2.6, représentant une trajectoire d'émissions relativement basse pour le futur. Ces données proviennent de l'expérience CORDEX (Coordinated Regional Climate

Downscaling Experiment), qui utilise des modèles climatiques régionaux (RCM) avec des conditions aux limites fournies par des modèles climatiques globaux (GCM). Plus précisément, les simulations ont été effectuées à l'aide du modèle climatique global "ICHEC-EC-EARTH" et du modèle climatique régional "SMHI-RCA4", issus du cinquième projet de comparaison de modèles couplés (CMIP5). Les variables climatiques essentielles fournies comprennent la température de l'air à 2 mètres, l'humidité relative à 2 mètres, la vitesse du vent à 10 mètres et le flux moyen de précipitations. La période couverte par ces données s'étend de 2021 à 2100, avec une résolution temporelle quotidienne. Ces informations sont cruciales pour les études d'impact climatique régional et les décisions d'adaptation, grâce à leur résolution fine et leur représentation détaillée des caractéristiques climatiques locales.

Pour évaluer l'impact des changements climatiques sur la propagation de la leishmaniose cutanée, les prédictions des cas de LC ont été calculées pour différentes périodes : (2021-2041), (2041-2061), (2061-2081) et (2081-2100). Ces projections ont été intégrées dans quatre cartes épidémiologiques distinctes, mettant en évidence les variations potentielles de la transmission de la maladie à court, moyen et long terme.

III.3.2.2 Analyses

Dans notre analyse, nous avons suivi un processus en plusieurs étapes, comme illustré dans la **Figure 16** Les résultats du modèle additif généralisé (GAM) basé sur des données épidémiologiques historiques et des variables climatiques locales, ont été combinés avec les prévisions climatiques du projet CORDEX pour prédire les cas futurs de leishmaniose cutanée.

En utilisant les données climatiques fournies par CORDEX pour les décennies à venir, nous avons alimenté l'équation de prédiction du modèle GAM pour obtenir des prévisions sur l'évolution de la maladie (calcul de la moyenne des cas par mois dans chaque ville). Cette approche simple mais efficace nous permet d'identifier les périodes et les régions présentant un risque de propagation accru de leishmaniose cutanée, ce qui est crucial pour orienter les efforts de surveillance et de prévention de la maladie.

III.3.2.3 Cartographie du risque de Leishmaniose cutanée dans le Nord-Ouest de l’Afrique

Le modèle a été utilisé pour prévoir les cas mensuels de Leishmaniose cutanée, qui ont été agrégés pour calculer le nombre moyen de cas par mois pour quatre périodes. Ces données ont été utilisées pour générer des cartes de risque de LC à l'aide de QGIS (Système d'information géographique quantique version 3.36.2, <https://download.qgis.org>) Au total, quatre cartes ont été produites, correspondant aux périodes de l'étude. Des classes de taille identique ont été appliquées sur les quatre périodes afin de s'assurer que l'évolution spatio-temporelle apparait au fil du temps. Les séries de cartes utilisent une progression graduée de la teinte allant du blanc (zones sans risque), rouge pale (zones à faible risque) et rouge vif (zones présentant un risque de LC).

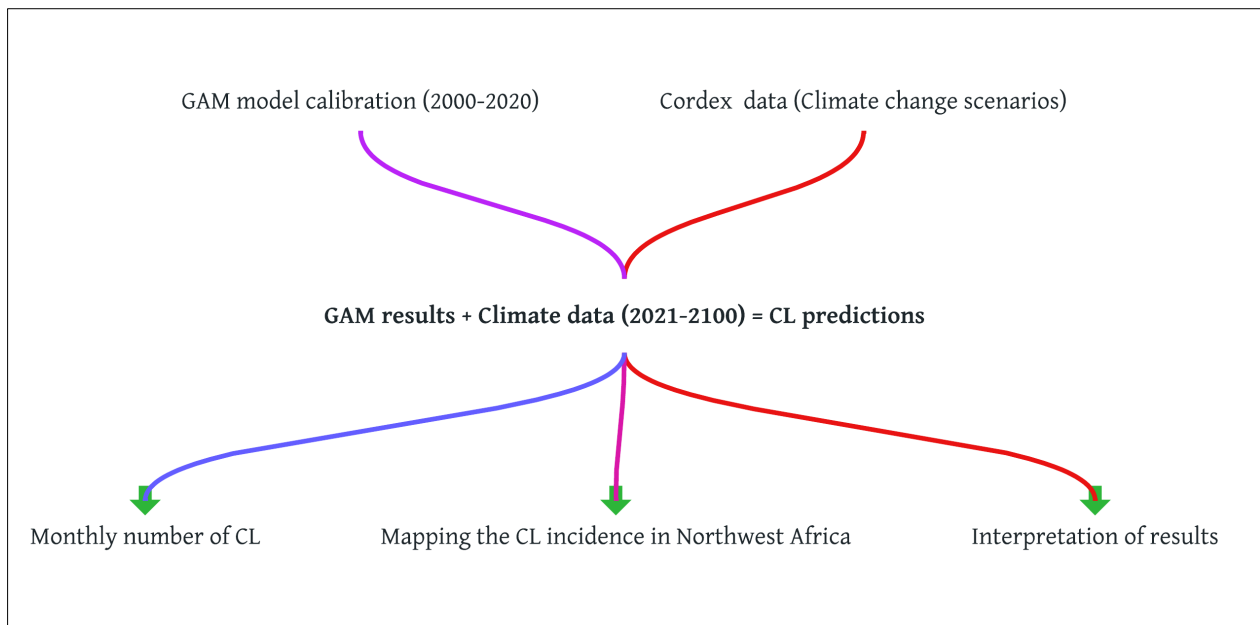


Figure 16 Schéma d'application des résultats du model GAM sur les données de prévisions climatiques (Saadene 2024)

III.4 Résultats

III.4.1 Incidence de la Leishmaniose cutanée

Au cours de la période d'étude allant de 2000 à 2020, le ministère de santé algérien de la santé a enregistré un total de 217 741 cas de leishmaniose cutanée en Algérie, dont 9 328 cas spécifiquement identifiés dans la ville de Ghardaïa. La **Figure 17** montre que l'incidence annuelle maximale des cas de LC en Algérie s'est produite en 2005, 2010, 2011 et 2017 avec 23072, 21043, 16585 et 11771 cas, respectivement, au cours d'une période d'augmentation du nombre de la population de 30233510 en 2000 à 44300000 en 2020.

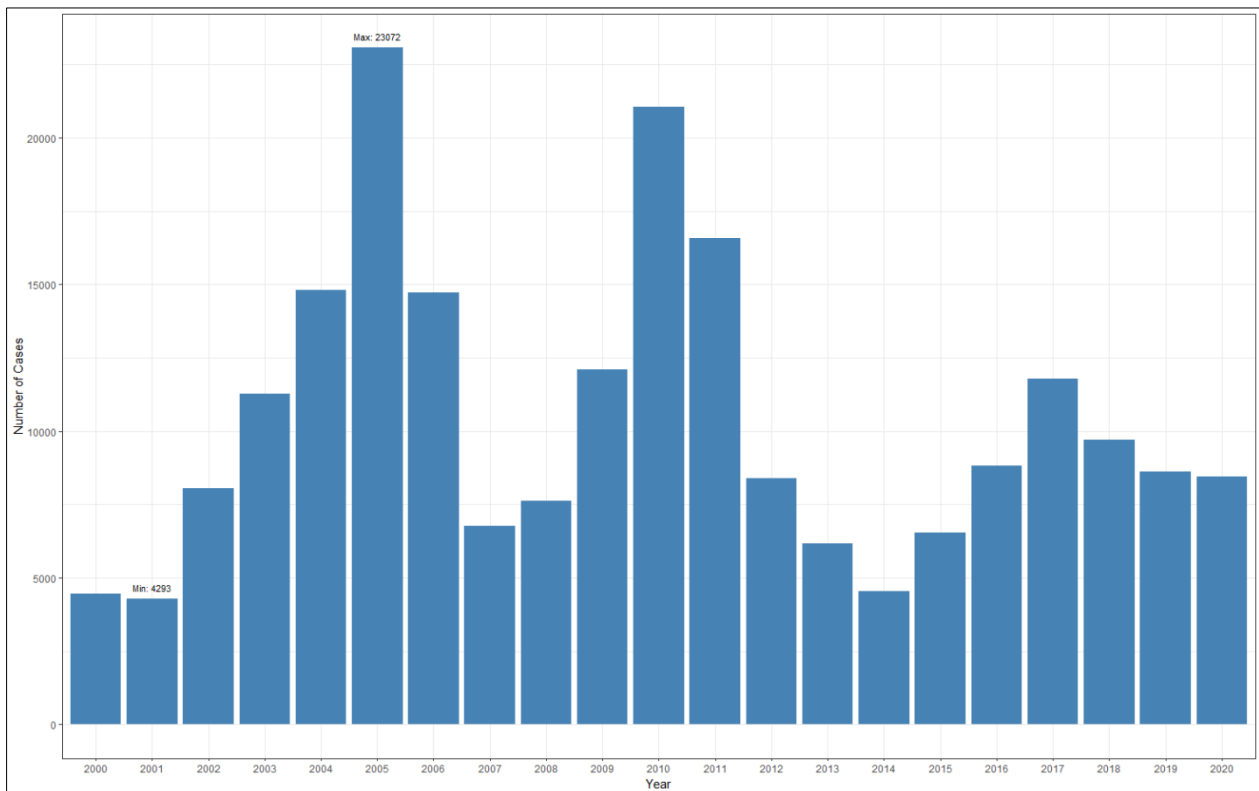


Figure 17 Incidence de la Leishmaniose cutanée en Algérie par année 2000-2020

Le même schéma d'incidence de la LC à Ghardaïa est observé, où les pics sont apparus en 2005, 2011 et 2020 dans une population qui varie de 344429 à 488965. Les **Figure 17 et 18** montrent un schéma interannuel clair avec un cycle d'environ 5 à 7 ans pour l'Algérie et Ghardaïa.

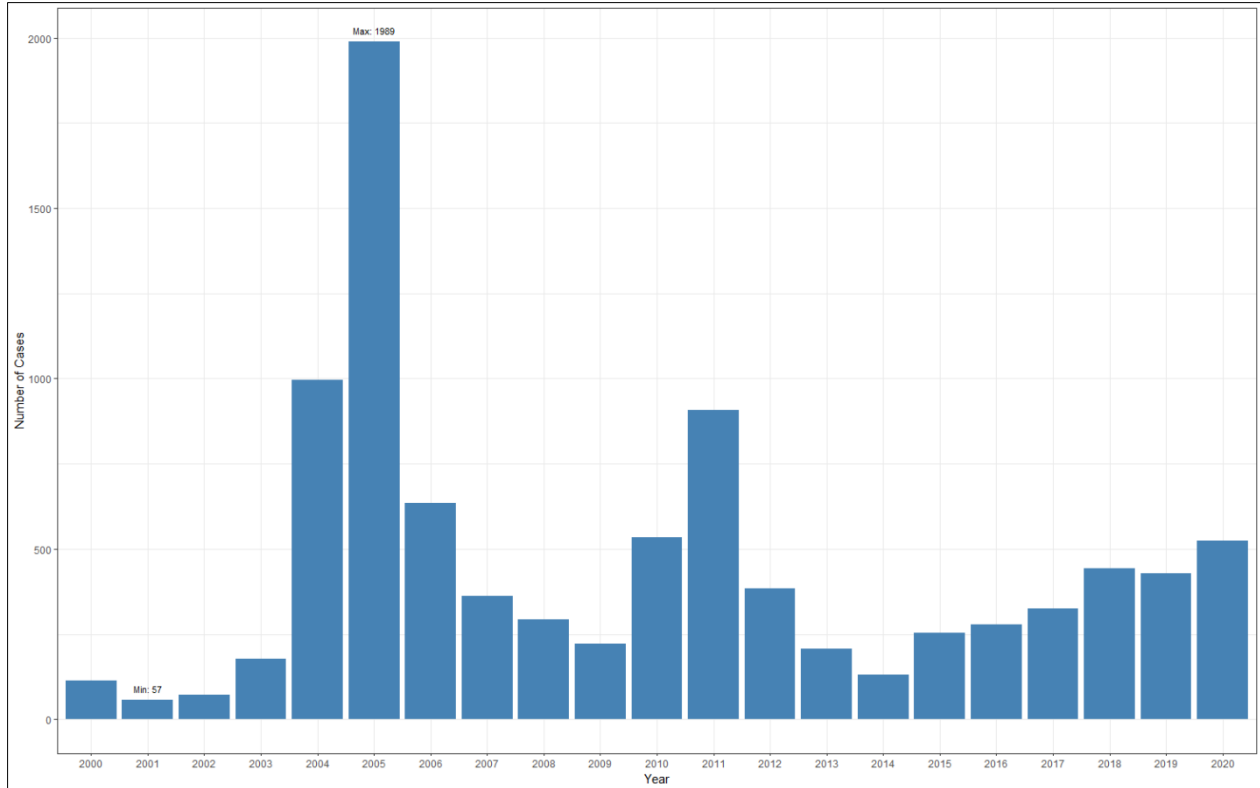


Figure 18 Incidence de la Leishmaniose cutanée à Ghardaïa par année 2000-2020

La **Figure 19** illustre la distribution mensuelle des cas de leishmaniose cutanée LC dans la région de Ghardaïa de janvier 2000 à décembre 2020. Cette représentation met en évidence une nette tendance saisonnière. L'incidence de la maladie est significativement plus élevée durant les mois d'hiver, d'octobre à mars, tandis qu'elle diminue considérablement pendant la période estivale, d'avril à septembre. Les pics d'incidence sont observés en novembre, décembre et janvier, avec un record absolu de 383 cas enregistrés en novembre 2005. À l'inverse, les mois d'avril à septembre présentent systématiquement les taux les plus bas. Cette fluctuation marquée suggère que les facteurs saisonniers jouent un rôle prépondérant dans l'épidémiologie de la leishmaniose cutanée dans cette région.

Au total, 252 observations mensuelles ont été enregistrées, du 1er janvier 2000 au 1er décembre 2020. L'accent a été mis sur les cas de LC et de multiples facteurs climatiques dans la région de Ghardaïa en Algérie comme la température (C°) (maximum MXT, minimum MNT et moyenne AT), l'humidité (%) (HM), les précipitations (mm) (PRC) et la

vitesse du vent (Km/h) (WS). En outre, l'indice de végétation normalisé (NDVI) a été utilisé pour évaluer l'étendue de la couverture végétale dans la zone d'étude. La **Table 4** présente les statistiques descriptives des variables environnementales analysées dans l'étude.

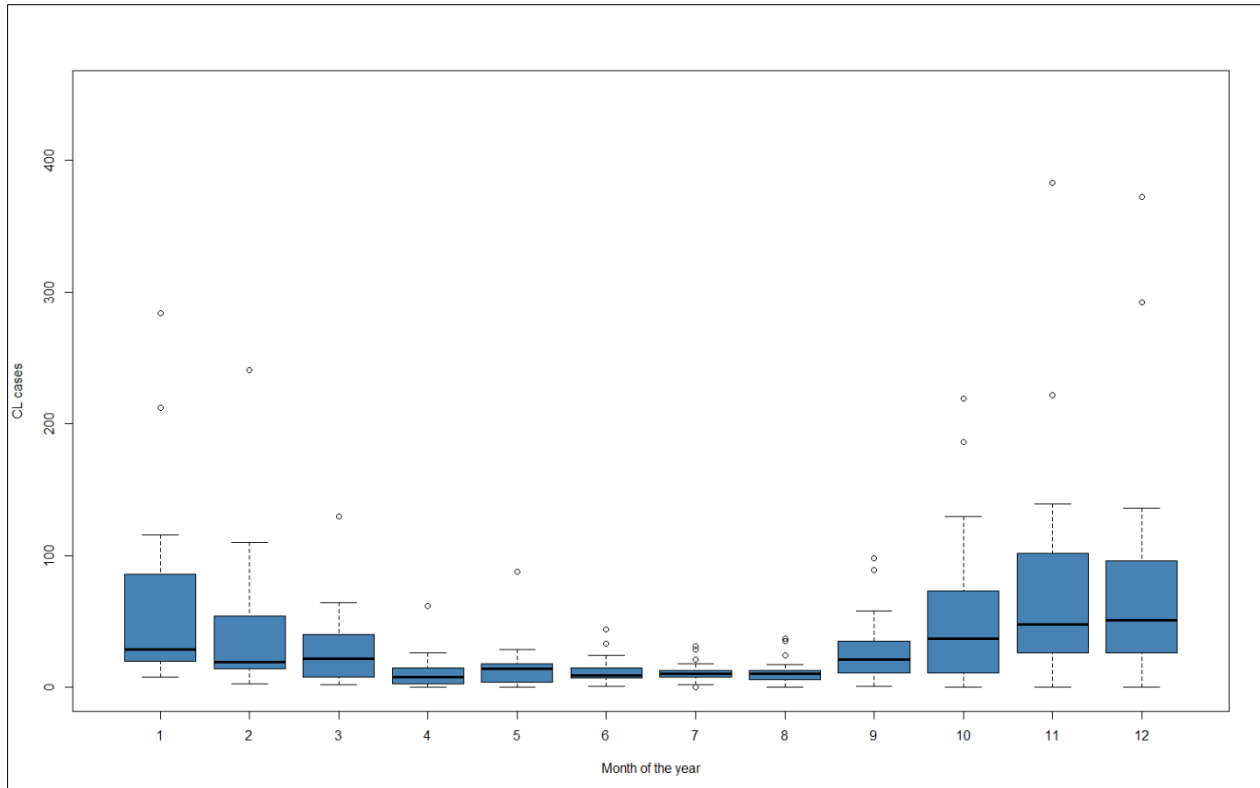


Figure 19 Incidence mensuelle de la Leishmaniose cutanée à Ghardaïa 2000-2020

Une base de données étalée sur 20 ans nous a permis d'obtenir une puissance statistique suffisante pour l'évaluation et la prédiction. Les valeurs moyennes de la température maximale, de la température minimale et de la température moyenne étaient respectivement de 28,64°C, 16,52°C et 22,7°C, tandis que les précipitations étaient relativement faibles avec une valeur moyenne de 6,67 mm. L'humidité et la vitesse du vent avaient des valeurs moyennes de 35,26 % et 13,01 km/h, respectivement. L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) avait une valeur moyenne de 0,16, indiquant une couverture faible à modérée de végétation verte. Les valeurs élevées de l'écart-type pour l'humidité et les précipitations suggèrent que ces variables ont varié de manière significative au cours de la période étudiée. Ces statistiques fournissent des informations précieuses sur les conditions environnementales dans la zone d'étude et

servent de base à une analyse plus approfondie de la relation entre l'endémicité de la LC et ce type d'environnement.

Table 4 Synthèse des cas de leishmaniose cutanée et des facteurs environnementaux associés dans la région de Ghardaïa

| Variable | LC | AT(°C) | MXT(°C) | MNT(°C) | HM(%) | PRC(mm) | WS(Km/h) | NDVI |
|----------|-------|--------|---------|---------|-------|---------|----------|--------|
| Count | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 | 252 |
| Mean | 37.02 | 22.7 | 28.64 | 16.52 | 35.26 | 6.67 | 13.01 | 0.16 |
| Min | 0 | 8.6 | 13.4 | 3.3 | 15.3 | 0 | 4.5 | 0.1127 |
| Max | 383 | 38 | 43.9 | 31.4 | 64.7 | 74.18 | 21.1 | 2.197 |
| SD | 55.46 | 8.39 | 8.65 | 7.74 | 11.79 | 12.26 | 3.21 | 0.19 |

III.4.2 Analyse de corrélation

La table 5 présente les coefficients de corrélation calculés par la méthode de Spearman entre les variables étudiées. Les résultats montrent que le nombre de cas de LC et les températures (AT, MXT, MNT) sont négativement corrélés (Valeur $p < 0,001$). Inversement, le nombre de cas était positivement corrélé avec l'humidité et l'indice de végétation (Valeur $p < 0,001$). La vitesse du vent (WS) présentait de faibles corrélations négatives avec le nombre de cas (Valeur $p < 0,001$), mais la corrélation avec les précipitations (PRC) n'était pas significative.

Ces corrélations significatives identifiées entre les facteurs environnementaux et l'incidence de la LC ont été explorées plus en détail à l'aide d'un modèle additif généralisé (GAM) afin de développer une compréhension plus complète de l'occurrence de la LC. Les résultats du modèle sont présentés dans la section suivante.

Table 5 Corrélation entre variables climatiques et épidémiologiques de la LC calculée avec la méthode de Spearman

| | LC | AT | MXT | MNT | HM | PRC | WS | NDVI |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|------|
| AT | -0.442 | | | | | | | |
| <i>Valeur p</i> | (<.001) | | | | | | | |
| MXT | -0.454 | 0.998 | | | | | | |
| <i>Valeur p</i> | (<.001) | (<.001) | | | | | | |
| MNT | -0.418 | 0.996 | 0.992 | | | | | |
| <i>Valeur p</i> | (<.001) | (<.001) | (<.001) | | | | | |
| HM | 0.512 | -0.853 | -0.859 | -0.822 | | | | |
| <i>Valeur p</i> | (<.001) | (<.001) | (<.001) | (<.001) | | | | |
| PRC | 0.002 | -0.067 | -0.078 | -0.040 | 0.268 | | | |
| <i>Valeur p</i> | (.975) | (.292) | (.218) | (.525) | (<.001) | | | |
| WS | -0.365 | -0.034 | -0.039 | -0.054 | -0.183 | -0.015 | | |
| <i>Valeur p</i> | (<.001) | (.586) | (.536) | (.396) | (.004) | (.816) | | |
| NDVI | 0.505 | -0.697 | -0.698 | -0.682 | 0.643 | 0.004 | -0.221 | |
| <i>Valeur p</i> | (<.001) | (<.001) | (<.001) | (<.001) | (<.001) | (.954) | (<.001) | |

III.4.3 Résultats du modèle GAM

Dans cette étude, nous avons ajusté deux modèles additifs généralisés (GAM), dénommés **GAM_01 (facteurs environnementaux : HM, PRC, AT, WS)** et **GAM_02 (HM, PRC, AT, WS, year)**. Le GAM_01 ne comprenait que des prédicteurs environnementaux, tandis que le GAM_02 incorporait une variable temporelle afin d'évaluer l'influence des tendances annuelles sur la performance du modèle dans la prédiction de l'incidence de la maladie. Les résultats des deux modèles (**Table 6**) montrent que certains facteurs environnementaux ont eu des effets différents le modèle. Dans GAM_01, l'humidité, la vitesse du vent et l'indice de végétation sont des prédicteurs statistiquement significatifs de la variable dépendante (LC) avec des *Valeurs p* <0,005). En revanche, la température moyenne et les précipitations décalées de six mois ne sont pas des variables prédictives significatives de la variable épidémiologique, *Valeurs p* >0,005). Les résultats du modèle GAM_02, qui inclut un facteur "année" en plus des

variables environnementales affirme que l'humidité, l'indice de végétation et le paramètre temps sont des variables prédictives statistiquement significatives (*Valeur p* <0,005), tandis que l'effet de la vitesse du vent est faiblement significatif dans ce modèle (*Valeur p* >0,005).

Les deux modèles ont été rapportés en utilisant la famille binomiale négative avec une fonction de lien logarithmique. Le modèle **GAM_01** explique 35 % de la déviance, avec un R^2 de 0,198, tandis que le modèle **GAM_02** explique 67 % de la déviance, avec un R^2 ajusté de 0,57. Cela indique que GAM_02 fournit une meilleure explication des cas de leishmaniose cutanée par rapport à GAM_01. En général, une déviance expliquée plus élevée et un R^2 ajusté plus élevé montrent une meilleure performance du modèle.

Table 6 Résumé des effets environnementaux et temporels sur la variable réponse à l'aide de modèles additifs généralisés (GAM), degrés de liberté estimés (EDF), chi carré (Chi.sq) et valeurs P.

| Model | Intercept | Smooth term | EDF | Chi.sq | P-value |
|--|--------------------------------|-----------------|-----------|--------|----------------|
| GAM_01 Variables Environnementales | Estimate : 3.36440 | HM | 3.591 | 18.30 | 0.000111 *** |
| | Std. Error : 0.06937 | AT | 0.242 | 0.28 | 0.285593 |
| | | WS | 2.140 | 10.29 | 0.002106 ** |
| | | NDVI | 3.436 | 22.72 | 3.35e-05 *** |
| | | PRC_Lag6 | 0.005 | 0.01 | 0.347312 |
| P-value : <2e-16 | | | | | |
| GAM_02 Variables Environnementales + Variable temps | Estimate : 3.1291 | HM | 4.282e+00 | 38.71 | < 2e-16 *** |
| | Std. Error : 0.0514 | AT | 3.500e-04 | 0.00 | 0.80853 |
| | | WS | 1.709e+00 | 5.09 | 0.02895 * |
| | | NDVI | 3.294e+00 | 15.22 | 0.00101 ** |
| | | PRC_Lag6 | 4.583e-04 | 0.00 | 0.93350 |
| | | year | 1.350e+01 | 161.50 | < 2e-16 *** |
| P-value : <2e-16 | | | | | |

D'après la **Table 6**, il existe quelques différences notables entre les modèles GAM_01 et GAM_02. Tout d'abord, l'ajout d'une variable temporelle se reflète dans les estimations et l'erreur type de l'ordonnée à l'origine, le modèle GAM_02 ayant une estimation légèrement inférieure à celle du modèle GAM_01 (3,1291 contre 3,36440) avec une faible erreur

standard. Deuxièmement, en ce qui concerne les termes lisses, les deux modèles incluent les mêmes variables environnementales (HM, AT, WS, NDVI et PRC_Lag6). Cependant, les degrés de liberté estimés (EDF) et les statistiques de test du chi carré correspondantes diffèrent entre les deux modèles. Par exemple, le terme lisse pour HM a un EDF de 3,591 dans GAM_01 et de 4,282 dans GAM_02. À l'exception du prédicteur HM, les termes lisses pour toutes les autres variables dans GAM_01 présentent des EDF plus élevés que ceux de GAM_02. En général, il apparaît que les termes lisses dans GAM_02 ont des EDF plus petits et des statistiques de test du Khi-deux plus grandes que ceux de GAM_01. En outre, les valeurs p pour les termes lisses dans GAM_02 sont généralement plus petites que celles de GAM_01, ce qui indique une preuve plus forte contre l'hypothèse nulle d'absence d'effet. Par exemple, le terme lisse pour HM dans GAM_02 a une valeur p de $< 2e-16$, alors qu'elle est de 0,000111 dans GAM_01. Dans l'ensemble, il est évident que le modèle GAM_02, qui inclut la variable temps et présente des valeurs p plus faibles pour les termes lisses fournit une meilleure adéquation aux données que le modèle GAM_01.

Les **Figures 20 et 21** présentent les effets estimés des variables sur le nombre de cas de Leishmaniose cutanée pour le GAM_01 et le GAM_02. Sur l'axe des x , les variations croissantes des covariables sont représentées. L'axe y indique la contribution du lisseur aux valeurs ajustées. Les zones grises représentent les intervalles de confiance à 95 %. Le tapis au bas des figures indique les valeurs observées de la fonction lisse des covariables. Ces graphiques mettent en évidence les tendances et l'association évolutives des cas de leishmaniose en fonction des facteurs introduit dans les modelés, soulignant leur constante évolution et effets sur la variable dépendante (LC).

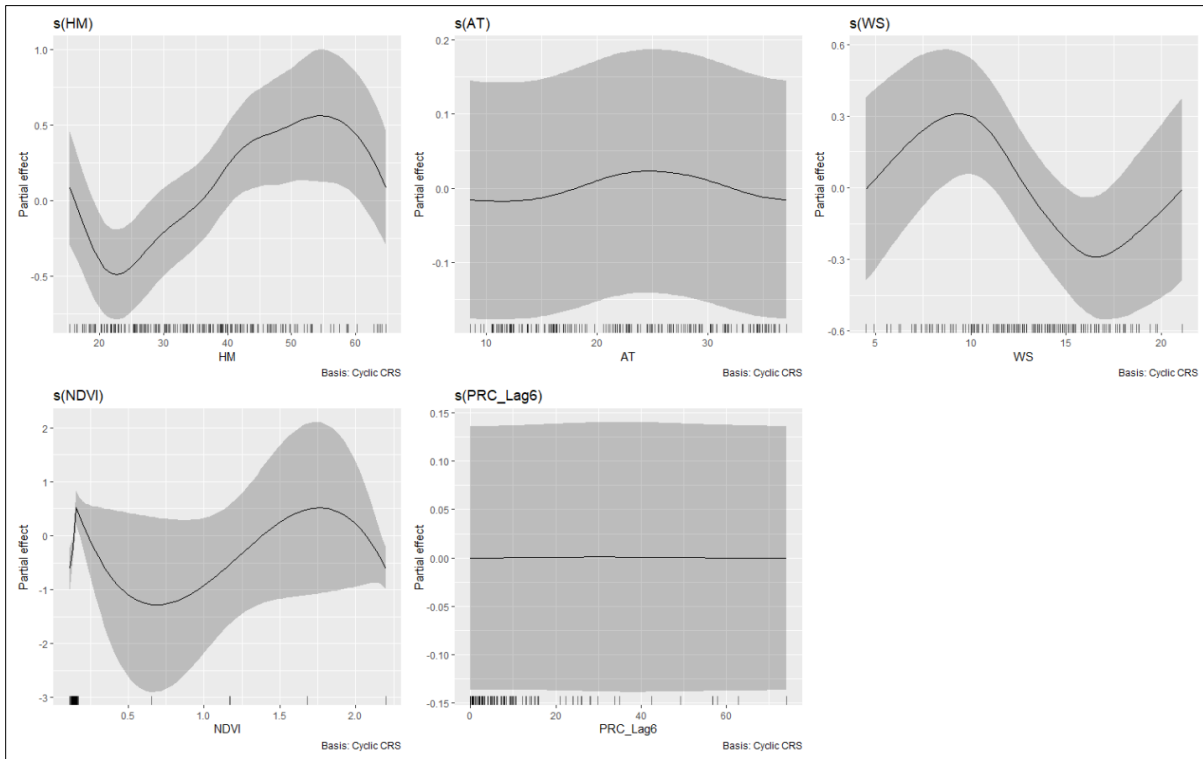


Figure 20 Relation entre les variables environnementales et l'incidence de la leishmaniose cutanée sur la base du GAM_01

Les résultats affichent que pendant les saisons humides, lorsque l'humidité relative est comprise entre 25% et 55%, l'incidence de la maladie augmente (**Figure 20 et 21, s(HM)**). Cependant, lorsque l'humidité relative dépasse 55%, l'incidence de la maladie diminue.

La vitesse du vent est un autre facteur important, une vitesse inférieure à 10km/h favorisant la dispersion de la maladie (**Figure 20 et 21, s(WS)**). Inversement, une vitesse de vent supérieure à 10km/h n'est pas propice à la transmission de la maladie. La relation entre la maladie et l'indice de végétation est complexe, mais une faible présence d'un indice de végétation supérieur à 0,1 peut constituer un facteur de risque pour l'émergence de la leishmaniose cutanée (**Figure 20 et 21, s(NDVI)**). Aussi les cas de LC sont légèrement plus élevés lorsque la température moyenne se situe entre 20°C et 30°C (**Figure 20, s(AT)**). Pour le GAM_02, l'effet de la température ne montre aucun impact significatif, ce qui peut être attribué aux variabilités internes des variables au sein du modèle (**Figure 21, s(AT)**). Cependant, la fonction ajustée pour les précipitations ne fournit aucune indication sur sa relation avec la maladie (**Figure 20 et 21, s(PRC_Lag6)**).

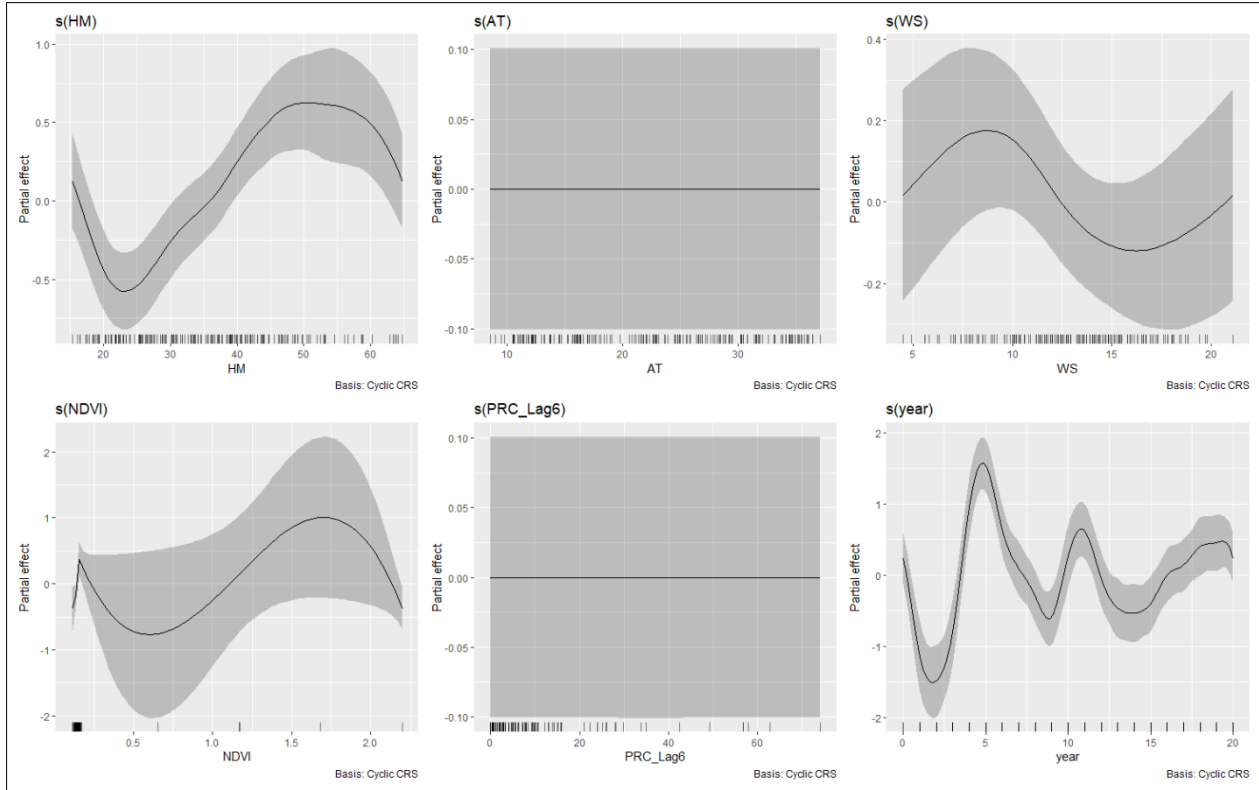


Figure 21 Relation entre les variables environnementales et l'incidence de la leishmaniose cutanée sur la base de GAM_02

La **Table 7** présente les statistiques d'ajustement du modèle pour deux modèles additifs généralisés ajustés. Les valeurs AIC et BIC sont plus faibles pour le GAM_02 que pour le GAM_01, ce qui indique que le GAM_02 correspond mieux aux données. La valeur ajustée du R au carré est également plus élevée pour le GAM_02 que pour le GAM_01, ce qui indique que le GAM_02 explique une plus grande partie de la variabilité des données. En outre, la valeur REML est plus élevée pour GAM_01 que pour GAM_02, ce qui témoigne d'un meilleur ajustement du modèle GAM_02

Table 7 Statistiques d'ajustement du modèle pour les GAM ajustés (GAM_01 et GAM_02)

| Model | AIC | BIC | R-sq.(adj) | REML |
|--------|----------|----------|------------|--------|
| GAM_01 | 1744.724 | 1790.518 | 0.198 | 879.55 |
| GAM_02 | 1631.247 | 1723.84 | 0.613 | 839.24 |

Les modèles GAM_01 et GAM_02 ne présentent pas de corrélations significatives dans leurs graphiques de fonction d'autocorrélation (ACF) et d'autocorrélation partielle (PACF), aucune ligne ne franchissant le seuil de signification (**Figures 22-23**). Cela suggère que les données sont stationnaires et qu'il n'y a pas d'autocorrélation entre les observations, quel que soit le décalage, ce qui indique que les modèles sont bien adaptés aux données.

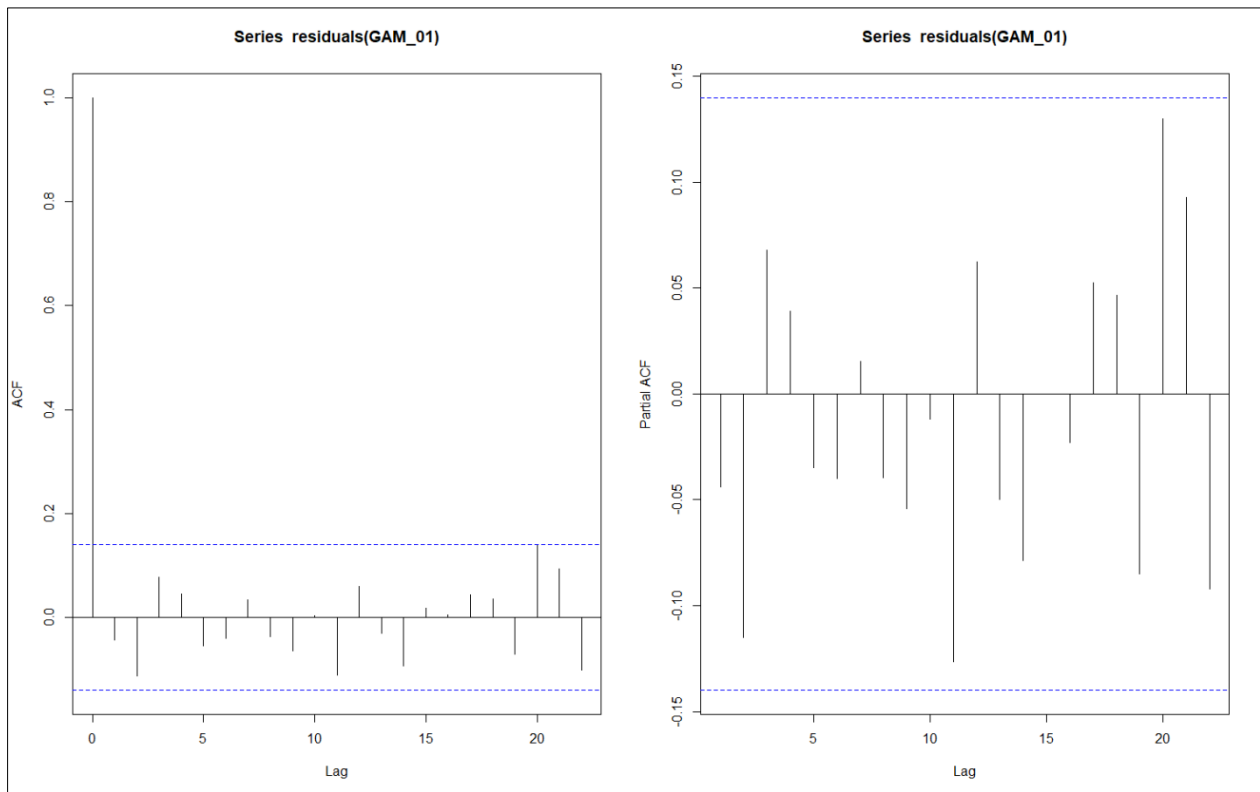


Figure 22 Graphiques des fonctions d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle pour **GAM_01**

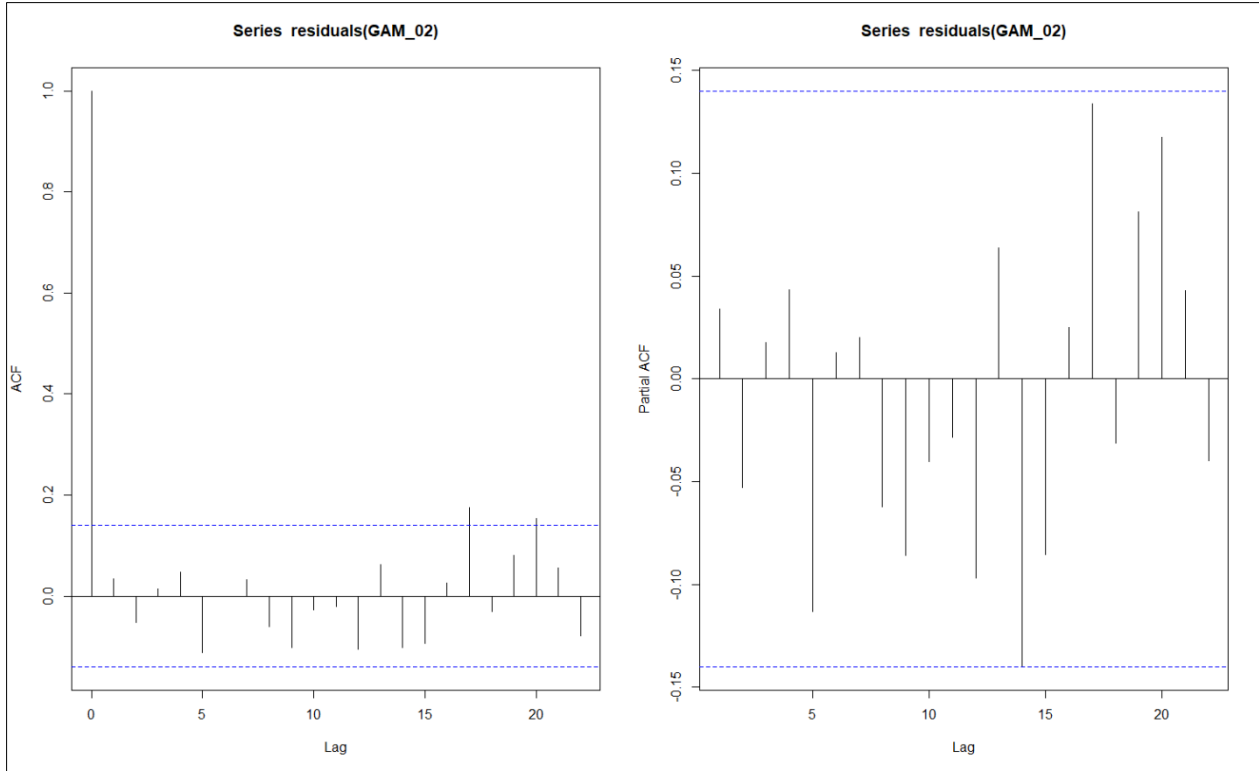


Figure 23 Graphiques des fonctions d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle pour GAM_02

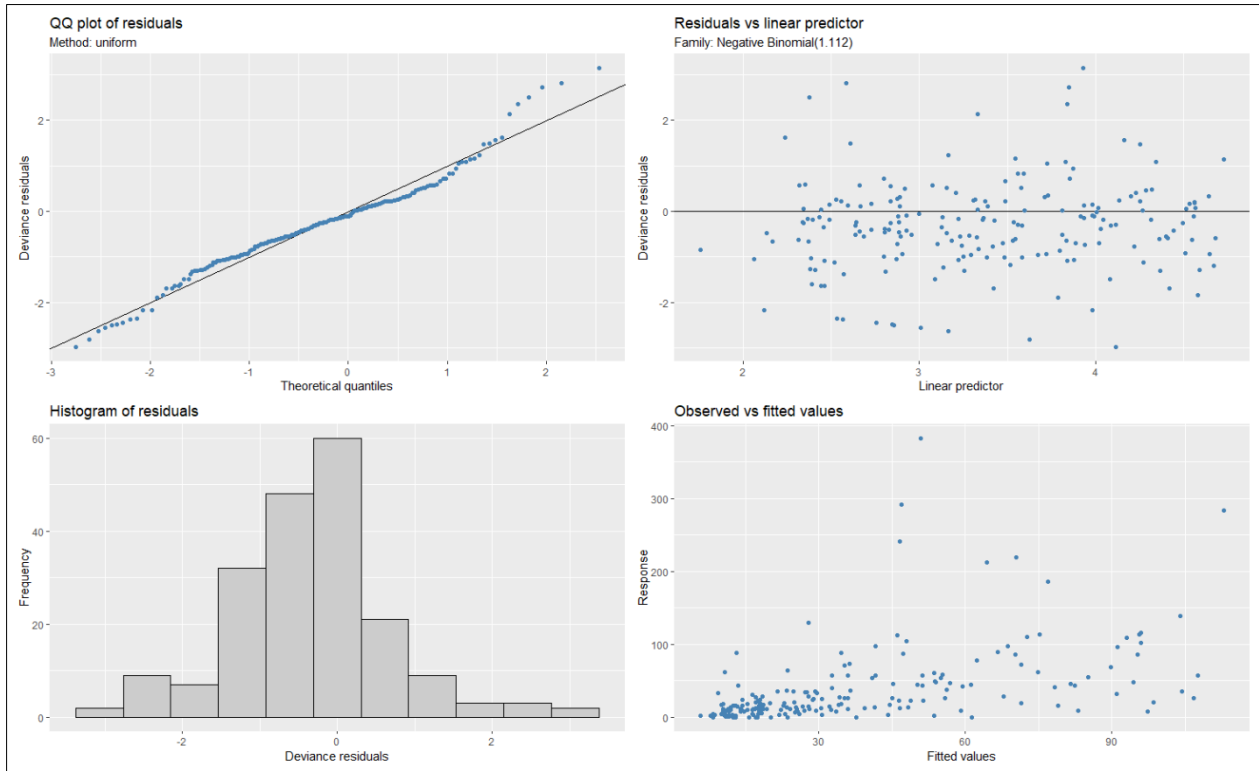


Figure 24 Graphiques des résidus du modèle ajusté GAM_01

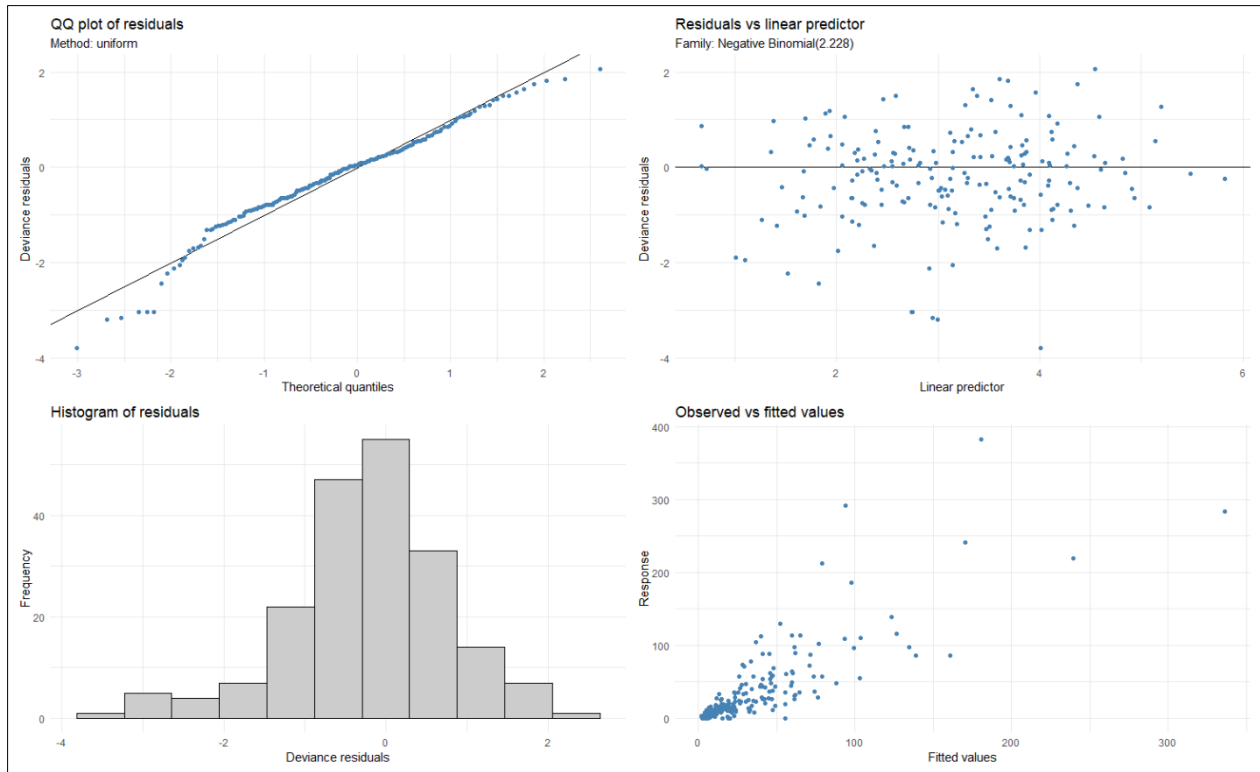


Figure 25 Graphiques des résidus du modèle ajusté **GAM_02**

Les diagrammes résiduels de GAM_01 et GAM_02 ont été évalués pour déterminer la qualité de l'ajustement des modèles. Les tracés résiduels n'ont montré aucun schéma ou tendance apparente, ce qui indique que les modèles s'adaptent bien aux données. Dans le modèle GAM_01 (**Figure 24**), le diagramme des résidus semble présenter une dispersion aléatoire des points autour de la ligne du zéro, sans valeurs aberrantes visibles. Le tracé résiduel de GAM_02 (**Figure 25**) présente une dispersion aléatoire des points autour de la ligne zéro, avec quelques valeurs aberrantes visibles. Toutefois, ces valeurs aberrantes ont été jugées normales, car les données de comptage ont tendance à présenter un certain niveau de dispersion excessive, et leur suppression entraînerait une perte d'informations importantes. Dans l'ensemble, les diagrammes résiduels des deux modèles suggèrent qu'ils sont bien adaptés aux données.

III.4.3.1 Evaluation des prédictions du modèle

Pour évaluer l'adéquation et la performance prédictive de nos modèles, nous avons effectué une analyse de corrélation entre les valeurs prédites générées par les modèles ajustés et les cas réels de LC avec un ensemble de données de test séparé qui représente les 20 % restants des données utilisées dans notre analyse. Cela nous a permis de déterminer dans quelle mesure les prédictions des modèles s'alignaient sur les données réelles observées. Nous avons également calculé l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour mesurer l'ampleur moyenne des erreurs dans les prédictions des modèles. La combinaison de ces mesures nous permet de connaître comment les modèles s'adaptent aux données et avec quelle précision ils peuvent prédire les résultats futurs.

Table 8 Mesures du modèle de prédiction des cas LC.

| Model | Coefficient de corrélation | RMSE |
|--------|----------------------------|--------|
| GAM_01 | 0.621 | 52.511 |
| GAM_02 | 0.906 | 29.726 |

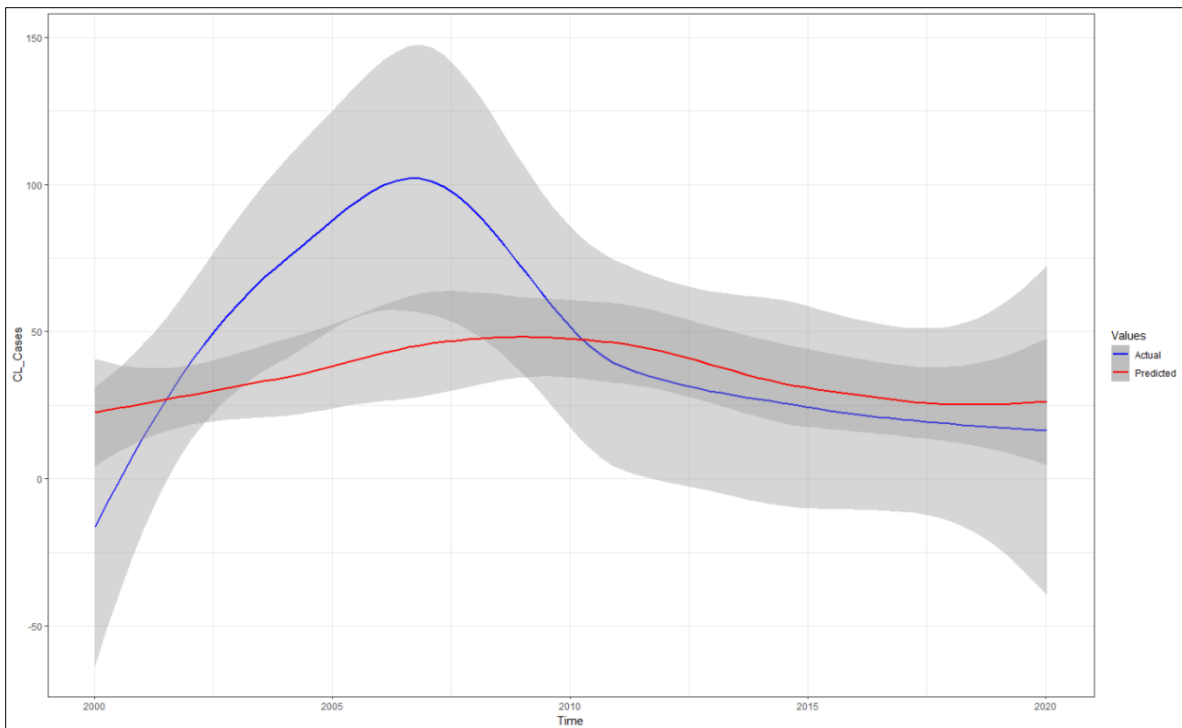


Figure 26 Graphiques de prédiction des cas LC pour GAM_01 avec un intervalle de prédiction de 95 % en utilisant de nouvelles données (20 % des données d'origine)

Sur la base du coefficient de corrélation et des valeurs RMSE (**Table 8**) nous pouvons constater que les deux modèles sont raisonnablement précis dans la prédiction du nombre de cas de CL. Cependant, le coefficient de corrélation de GAM_02 est plus élevé que celui de GAM_01, ce qui indique que GAM_02 a une relation linéaire plus forte avec les données de test. En outre, le RMSE de GAM_02 est inférieur à celui de GAM_01, ce qui indique que les prédictions de GAM_02 comportent moins d'erreurs que celles de GAM_01.

L'examen des graphiques de prédiction montre que les deux modèles suivent un schéma similaire, les valeurs prédites étant proches des valeurs réelles. Cependant, les prédictions de GAM_02 (**Figure 28**) semblent correspondre davantage aux données réelles que celles de GAM_01 (**Figure 27**), car la ligne prédite dans le tracé de GAM_02 est plus proche des valeurs réelles. Cela confirme que GAM_02 est un modèle plus précis pour prédire le nombre de cas de LC. En outre, les intervalles de confiance montrent que les prédictions de GAM_02 sont plus précises que celles de GAM_01.

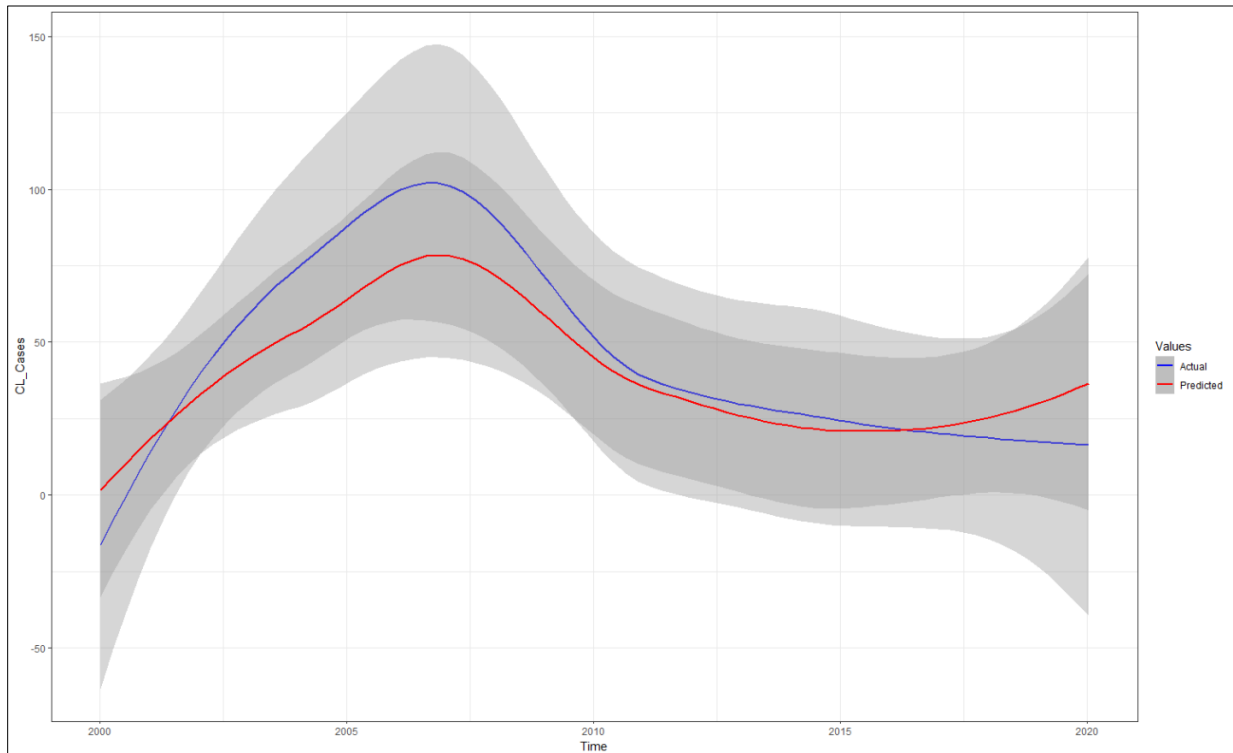


Figure 27 Graphiques de prédiction des cas LC pour GAM_02 avec un intervalle de prédiction de 95 % en utilisant de nouvelles données (20 % des données d'origine)

III.4.4 Prédiction des cas de Leishmaniose Cutanée dans le Maghreb

III.4.4.1 Résultats du modèle GAM de prédiction (sans NDVI)

Les résultats de notre analyse, réalisée au moyen d'un modèle additif généralisé (GAM) visé pour la prédiction, sont détaillés dans la **Table 10**. Ce tableau présente les estimations des coefficients pour l'intercepte ainsi que pour les différents termes lisses, accompagnées des mesures d'importance statistique. Le modèle explique 57% de la déviance dans l'ensemble des données de la ville de Ghardaïa. L'estimation de l'intercepte est de 3.14157. Cela représente la valeur prédite de notre variable de réponse lorsque toutes les autres variables sont maintenues à zéro. Les termes lisses sont employés pour modéliser des relations non linéaires entre nos variables prédictives et notre variable de réponse. Les degrés de liberté effectifs (EDF) des termes lisses sont indiqués, un EDF supérieur à 1 suggérant une non-linéarité dans la relation. Le Chi-square (Chi.sq) et les valeurs *p* fournissent des informations sur l'importance statistique de chaque terme lisse. Un Chi-square significativement différent de zéro, ainsi qu'une valeur *P* faible, indiquent une relation significative entre la variable prédictive correspondante et notre variable de réponse.

Table 9 Résumé des effets environnementaux et temporels sur la variable réponse à l'aide de modèles additifs généralisés (GAM), degrés de liberté estimés (EDF), chi carré (Chi.sq) et valeurs *p*.

| Model | Intercept | Smooth term | EDF | Chi.sq | P-value |
|---------------------------------------|---------------------|-----------------|-------|---------|----------------------|
| GAM Pour predictions | Estimate : | HM | 5.324 | 92.712 | <2e-16 *** |
| | 3.14157 | AT | 4.381 | 0.510 | 0.2885 |
| | Std. Error : | WS | 1.560 | 4.113 | 0.0457 * |
| | 0.05278 | PRC_Lag6 | 7.516 | 0.000 | 0.8528 |
| | P-value : | Year | 1.344 | 175.682 | <2e-16 *** |
| | <2e-16 | | | | |
| R-sq.(adj) = 0.57 | | | | | |
| Deviance explained = 57% | | | | | |
| REML = 837.64 | | | | | |

À la lumière de ces résultats, il est observé que certaines variables, telles que l'humidité relative (HM) et l'année (Year) ont une relation significative avec la variable de réponse.

En revanche, d'autres variables, telles que la température de l'air (AT) et les précipitations retardées de six mois (PRC_Lag6), ne semblent pas contribuer de manière significative à notre modèle.

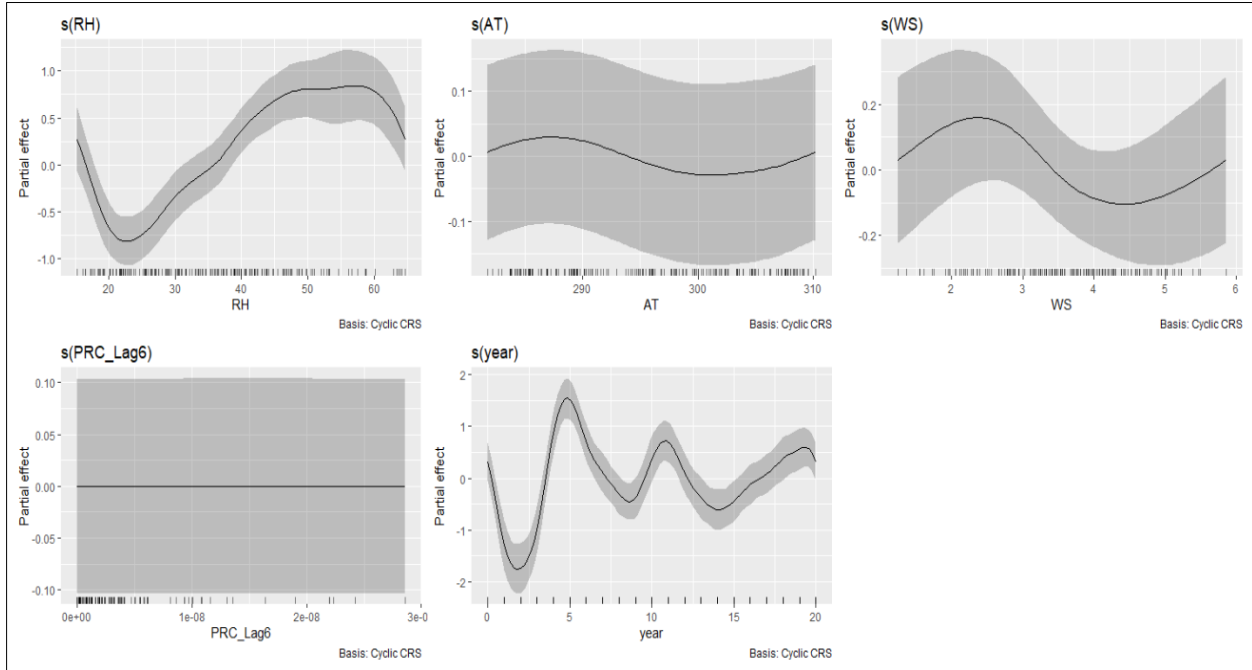


Figure 28 Relations estimées par GAM entre les cas moyens mensuels de Leishmaniose cutanée et les valeurs mensuelles moyennes de Température moyenne (AT), Humidité relative (HM), Vitesse du vent (WS) et les précipitations (PRC_Lag6), avec un retard de 6 mois.

La **Figure 28** illustre les effets estimés des variables environnementales sur l'incidence de la Leishmaniose cutanée (LC), dérivés du modèle additif généralisé (GAM) élaboré pour les prédictions. L'analyse révèle une corrélation positive entre l'humidité relative (HR) et l'incidence de la LC dans l'intervalle de 25% à 60% (**s(HM)**), suivie d'une relation inverse lorsque l'HR excède 60%. La vitesse du vent présente une association non linéaire avec la transmission de la LC (**s(WS)**). Une plage de 1 à 4 m/s (équivalent à 3,6-14,4 km/h) semble favoriser la propagation de la maladie, tandis que des vitesses supérieures à 14 km/h semblent inhiber sa transmission. L'incidence de la LC montre une légère augmentation dans l'intervalle de température moyenne de 285 K à 295 K (correspondant à 11,85°C - 21,85°C) (**s(AT)**). En ce qui concerne les précipitations, la fonction lissée (**s(PRC_Lag6)**) ne démontre pas de relation significative avec l'incidence de la LC, suggérant que cette variable pourrait avoir un impact négligeable ou complexe

nécessitant des analyses supplémentaires. Ces résultats soulignent l'importance des facteurs climatiques dans l'épidémiologie de la LC et mettent en évidence la complexité des interactions entre les variables environnementales et l'incidence de la maladie.

III.4.4.2 Analyse descriptive des variables climatiques dans la région du Nord-Ouest Africain

La Table 10 présente un résumé des hausses moyennes climatiques pour quatre périodes futures (2021-2041, 2041-2061, 2061-2081 et 2081-2100) dans trois pays d'Afrique du Nord : l'Algérie, le Maroc et la Tunisie. Les variables climatiques considérées sont la température moyenne de l'air (AT en °C), l'humidité relative moyenne (RH en %), les précipitations moyennes (PRC en mm) et la vitesse moyenne du vent (WS en km/h).

Pour l'Algérie, on observe une augmentation progressive de la température moyenne, passant de 7,4°C durant 2021-2041 à 8,52°C pour 2081-2100. L'humidité relative diminue globalement, avec quelques fluctuations, tandis que les précipitations moyennes restent très faibles, autour de 0,03 mm. La vitesse du vent augmente légèrement, de 15,3 km/h à 16,5 km/h.

Au Maroc, la température moyenne fluctue autour de 9°C, avec une légère hausse vers la fin du siècle. L'humidité relative connaît d'abord une baisse jusqu'en 2061, puis une remontée. Les précipitations restent extrêmement faibles, autour de 0,01 à 0,04 mm. La vitesse du vent oscille entre 12,9 et 15,1 km/h.

En Tunisie, on note une augmentation soutenue de la température moyenne, passant de 9,6°C à 10,6°C. L'humidité relative reste relativement stable autour de 73-74%. Les précipitations sont très faibles, bien qu'augmentant légèrement à 0,1 mm en fin de période. La vitesse du vent varie de 12,3 à 17,8 km/h.

De manière générale, ces projections suggèrent un réchauffement modéré, une baisse de l'humidité et des précipitations extrêmement limitées dans cette région d'Afrique du Nord d'ici la fin du XXI^e siècle.

Table 10 Résumé des moyennes climatiques par période pour l'Algérie, le Maroc et la Tunisie.

| Période | Moyenne AT (C°) | Moyenne RH (%) | Moyenne PRC (mm) | Moyenne WS (Km/h) |
|----------------|-----------------|----------------|------------------|-------------------|
| Algeria | | | | |
| 2021-2041 | 7,4 | 74,5 | 14,4 | 15,3 |
| 2041-2061 | 7,5 | 73,2 | 9,9 | 11,9 |
| 2061-2081 | 8,1 | 71,1 | 14,4 | 15,3 |
| 2081-2100 | 8,52 | 77,9 | 33,6 | 16,5 |
| Morocco | | | | |
| 2021-2041 | 9,2 | 64,8 | 4,8 | 12,9 |
| 2041-2061 | 9,2 | 60,2 | 4,8 | 13,4 |
| 2061-2081 | 8,8 | 64,6 | 19,2 | 15,1 |
| 2081-2100 | 9,3 | 69,6 | 19,2 | 14,2 |
| Tunisia | | | | |
| 2021-2041 | 9,6 | 72,9 | 14,4 | 15,7 |
| 2041-2061 | 9,5 | 74 | 2,4 | 12,3 |
| 2061-2081 | 10,2 | 73,9 | 1,44 | 14,6 |
| 2081-2100 | 10,6 | 74,6 | 48 | 17,8 |

III.4.4.3 Analyse descriptive des cas de Leishmaniose cutanées prédits

L'analyse présentée dans la **Table 11** offre un aperçu de l'évolution des cas moyens mensuels de leishmaniose cutanée dans la région du Nord-Ouest de l'Afrique, incluant l'Algérie, le Maroc et la Tunisie, sur une période s'étendant de 2021 à 2100, subdivisée en quatre périodes de projection. Il est important de noter que ces données représentent des moyennes des cas mensuels de la région dans son ensemble. Globalement, les données révèlent une stabilité des cas moyens au fil du temps, avec des variations subtiles entre les pays et les périodes. Bien que les chiffres moyens montrent une stabilité relative, il est également pertinent de noter que les cas minimum et maximum augmentent au fil du temps dans chaque pays, témoignant d'un pattern général à la hausse de la prévalence de la maladie.

Ces tendances pourraient être influencées par une multitude de facteurs, notamment les conditions climatiques et environnementales spécifiques à chaque région. Les variations dans les températures, les précipitations et d'autres paramètres environnementaux peuvent jouer un rôle significatif dans la propagation de la leishmaniose cutanée en

affectant la distribution des vecteurs et des réservoirs de la maladie. Pour une compréhension plus approfondie de l'évolution de la maladie à travers le temps et les conditions climatiques, il serait bénéfique de réaliser une cartographie des données afin d'illustrer visuellement les tendances observées et d'identifier les zones à risque potentiel de transmission de la leishmaniose dans la région.

Table 11 Evolution des cas moyens mensuels de leishmaniose cutanée dans la région du Nord-Ouest de l'Afrique.

| Algérie | | | |
|-----------------------|-----|------|-----|
| Période | Min | Mean | Max |
| Période 1 {2021-2041} | 27 | 36 | 50 |
| Période 2 {2041-2061} | 28 | 35 | 48 |
| Période 3 {2061-2081} | 29 | 38 | 51 |
| Période 4 {2081-2100} | 31 | 37 | 49 |
| Maroc | | | |
| Période | Min | Mean | Max |
| Période 1 {2021-2041} | 33 | 37 | 42 |
| Période 2 {2041-2061} | 29 | 38 | 45 |
| Période 3 {2061-2081} | 31 | 38 | 45 |
| Période 4 {2081-2100} | 31 | 38 | 47 |
| Tunisie | | | |
| Période | Min | Mean | Max |
| Période 1 {2021-2041} | 30 | 34 | 48 |
| Période 2 {2041-2061} | 26 | 32 | 47 |
| Période 3 {2061-2081} | 29 | 34 | 49 |
| Période 4 {2081-2100} | 33 | 37 | 49 |

L'évolution cyclique des cas de leishmaniose cutanée (LC) en Algérie est représentée dans la **Figure 29** Ce graphique présente les projections de cas de LC sur une période de 2025 à 2100, avec des intervalles de cinq ans. Les pics observés à des intervalles de 20 ans indiquent une nature cyclique dans la prévalence de la maladie. Contrairement aux tendances observées au cours des 20 dernières années, marquées par des cycles de 5 à 10 ans, nous constatons maintenant des cycles plus longs s'étendant jusqu'à 20 ans. Le plus grand pic de leishmaniose cutanée en Algérie est prédit pour 2025, avec un nombre de cas estimé entre 50 000 et 60 000. Ce pic est suivi d'une diminution notable

en 2035, avant une nouvelle augmentation en 2045. Un cycle qui continuera au fil des années. Ces fluctuations périodiques, caractérisées par des pics descendants et ascendants, pourraient être influencées par divers facteurs, tels que les variations climatiques, les interventions de santé publique et les dynamiques démographiques.

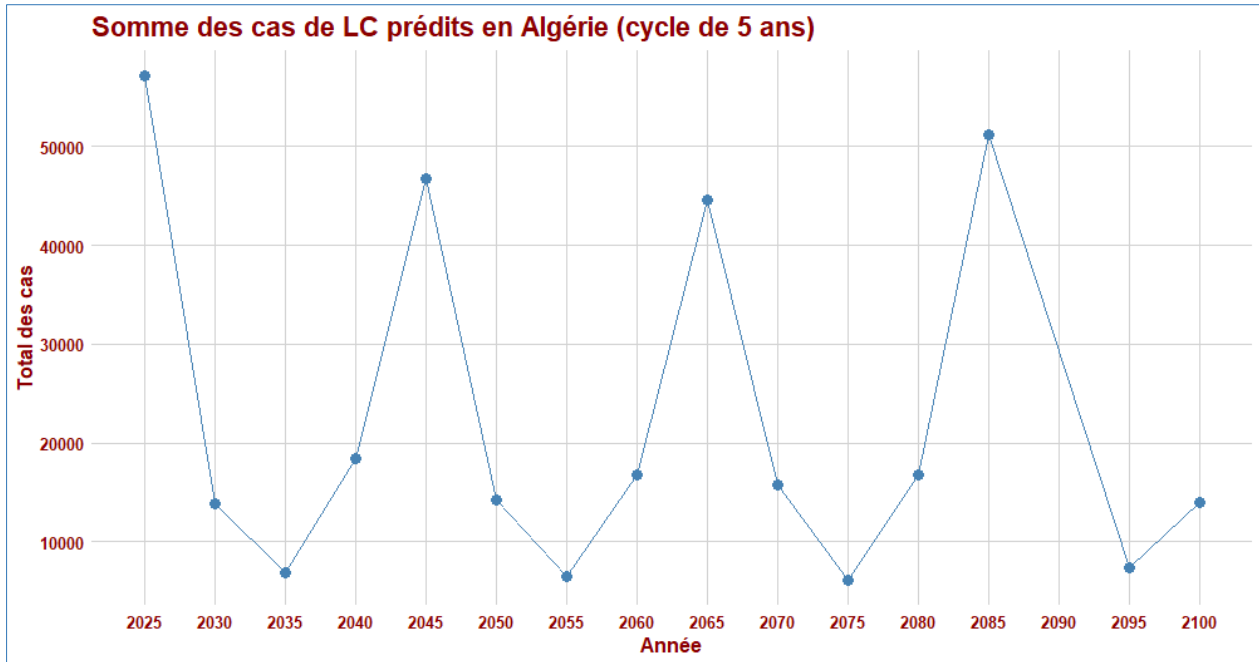


Figure 29 Somme des cas de Leishmaniose cutanée en Algérie avec un cycle de 5 ans.

L'évolution des cas de leishmaniose cutanée (LC) au Maroc est présentée dans la **Figure 30**. Ce graphique offre une vision temporelle des projections de cas de LC sur une période s'étendant de 2025 à 2100, avec une granularité de cinq ans. La structure cyclique de la maladie est clairement mise en évidence, avec des cycles marqués par des pics de prévalence suivis de périodes de diminution.

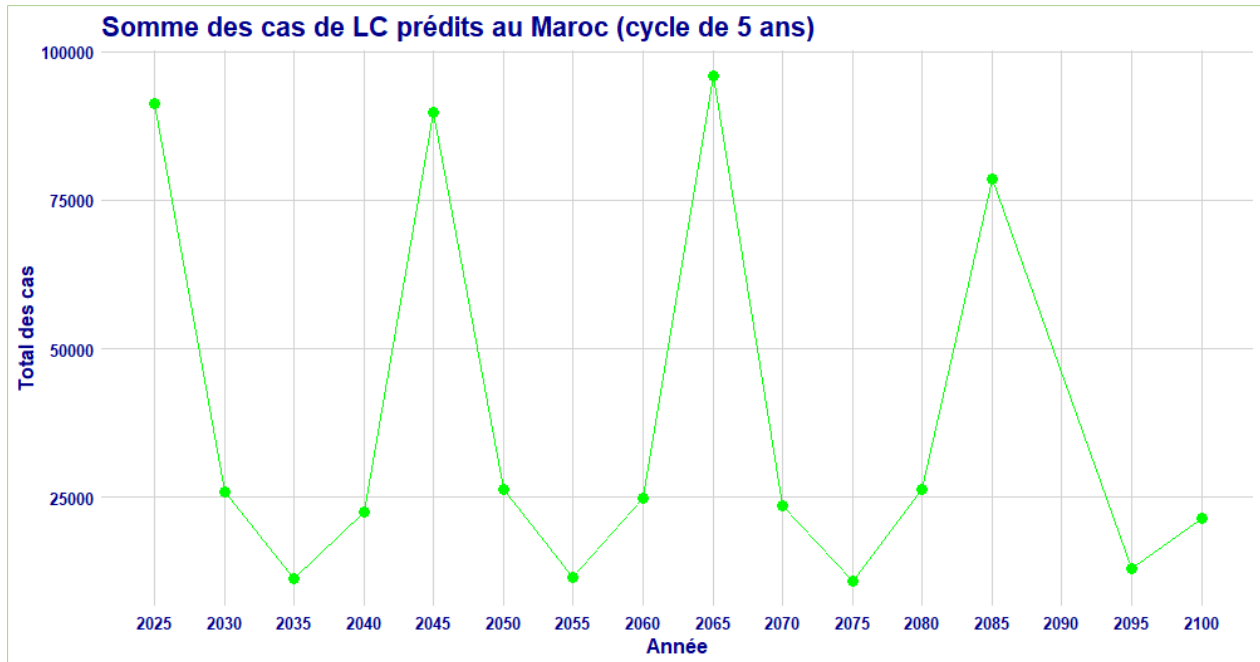


Figure 30 Somme des cas de Leishmaniose cutanée au Maroc avec un cycle de 5 ans.

Le Maroc enregistre son pic le plus significatif en 2065, avec une estimation de près de 100 000 cas, suivi d'une phase de déclin jusqu'en 2075. Une nouvelle augmentation est observée en 2085, avant que le nombre de cas ne chute à son minimum en 2095.

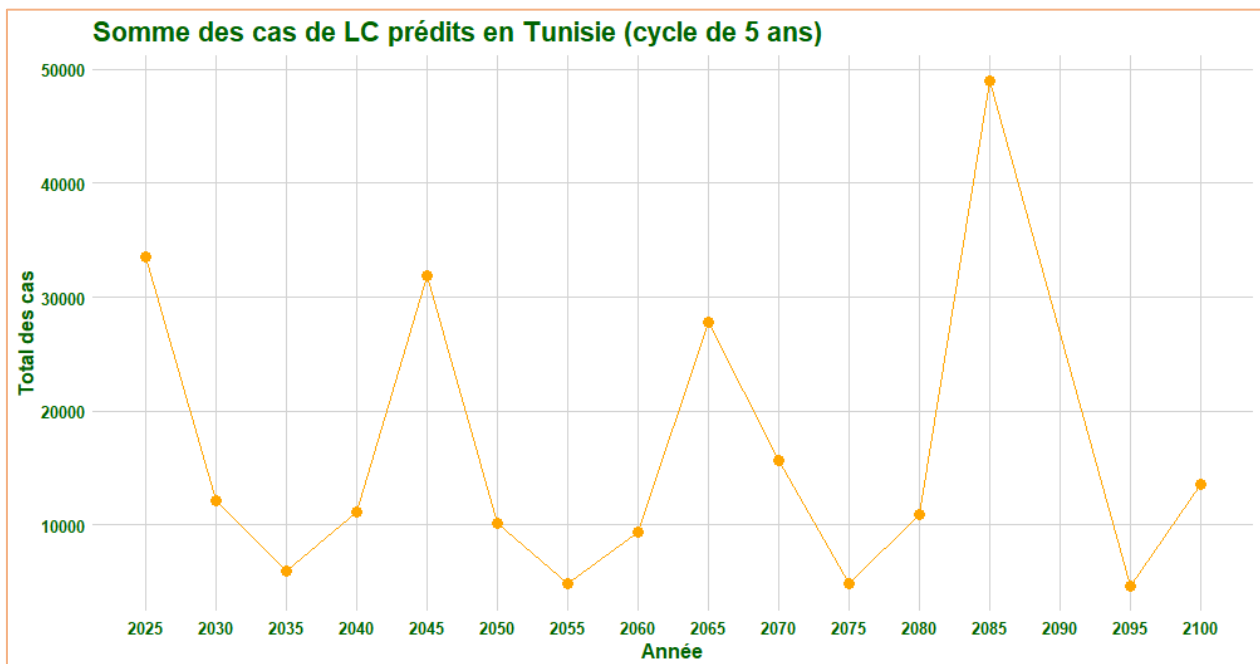


Figure 31 Somme des cas de Leishmaniose cutanée en Tunisie avec un cycle de 5 ans.

L'évolution des cas de leishmaniose cutanée (LC) en Tunisie est présentée dans la Fig.31 Ce graphique illustre les projections de cas de LC sur une période de 2025 à 2100, avec des intervalles de cinq ans. La structure cyclique de la maladie est clairement mise en évidence, avec des cycles de 20 ans caractérisés par des pics de prévalence maximum et minimum tous les 10 ans. Le plus grand pic enregistré pour la Tunisie est observé en 2085, avec une estimation de 50 000 cas.

La **Figure 32** présente la répartition prévue des cas de leishmaniose cutanée en Algérie, par ville, de 2021 à 2050. Pendant cette période, le nombre maximum de cas prévu est de 18 000, tandis que les villes à faible incidence devraient enregistrer environ 12,000 cas. Les régions les plus touchées sont celles caractérisées par un climat désertique ou aride/semi-aride, telles que Ghardaïa, El Bayadh, Bechar et Ouargla. En revanche, les régions du nord, contrairement à celles du sud, observeront un nombre de cas plus faible, atteignant jusqu'à 11, 000 cas, comme c'est le cas pour les villes d'Alger, Constantine, Guélma, Annaba, El Taref, Skikda et Tizi Ouzou.

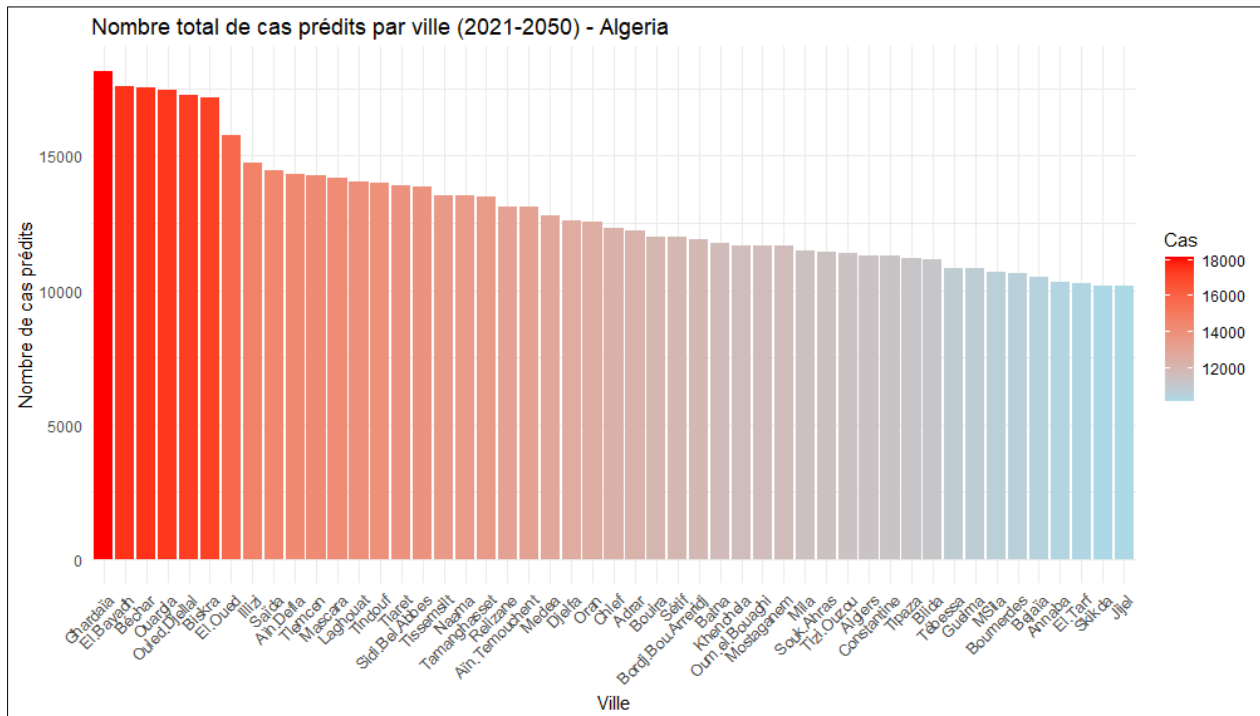


Figure 32 Nombre de cas de LC prédits par ville et par mois (2021-2050) – Algérie

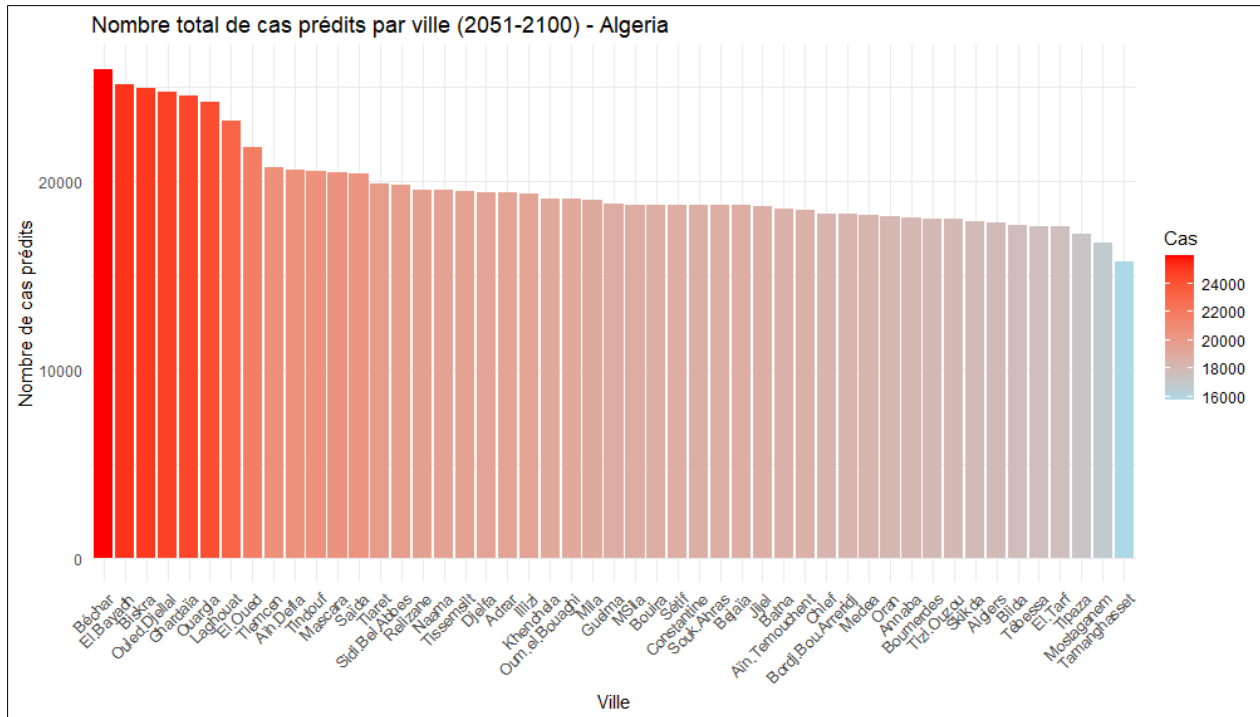


Figure 33 Nombre de cas de LC prédits par ville et par mois (2050-2100) – Algérie

La **Figure 33** présente la répartition prévue des cas de leishmaniose cutanée en Algérie, par ville, de 2050 à 2100. Pendant cette période, le nombre maximum de cas prévu est de 26 000, tandis que les villes à faible incidence devraient enregistrer environ 16 000 cas. Les régions les plus touchées sont celles caractérisées par un climat désertique ou aride/semi-aride, telles que Béchar, El Bayadh, Biskra et Ghardaïa. En revanche, d'autres régions du centre et de l'ouest, contrairement à la plupart des villes de l'est, observeront une diminution du nombre de cas, atteignant jusqu'à 15 000 cas, comme c'est le cas pour les villes d'Alger, Blida, Tizi Ouzou, Oran ou Mostaganem.

La **Figure 34** offre un aperçu de la répartition projetée des cas de leishmaniose cutanée en Tunisie, par ville, pour la période de 2021 à 2050. Au cours de cette période, le nombre maximal de cas prévu s'élève à 16 000, tandis que les villes à faible incidence devraient enregistrer environ 12 000 cas. Les régions les plus touchées comprendront des zones désertiques et arides telles que Tataouine, Kébili et Gafsa, où l'on prévoit plus de 15 000

cas.

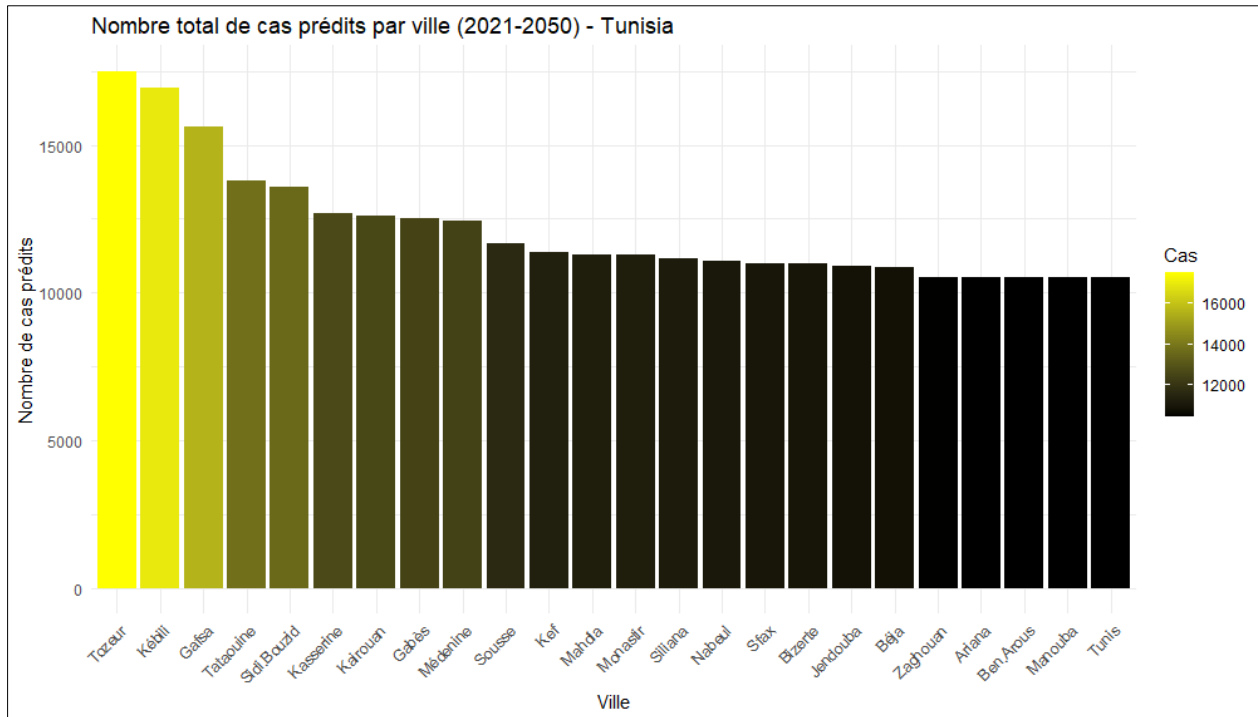


Figure 34 Nombre de cas de LC prédits par ville et par mois (2021-2050) – Tunisie

Les villes moyennement touchées incluront Le Kef, Mahdia, Monastir, ainsi que Nabeul et Sfax, avec des nombres de cas autour de 14 000 et 12 000 respectivement. En revanche, les villes les moins touchées, telles que Tunis, Manouba, Ben Arous et Béja, devraient enregistrer moins de cas de leishmaniose cutanée au cours de cette période. La **Figure 35** présente une analyse prospective de la répartition anticipée des cas de leishmaniose cutanée en Tunisie par ville, pour la période allant de 2050 à 2100. Au cours de cette période, on prévoit une amplitude de cas allant de 16 000 à 25 000, reflétant une variabilité significative dans l'incidence de la maladie à travers le pays. Les villes les plus gravement touchées, telles que Tazeur, Kébili et Gafsa, sont susceptibles d'enregistrer plus de 24 000 cas, témoignant de la vulnérabilité des zones désertiques et arides aux conditions favorables à la propagation de la leishmaniose cutanée.

En revanche, certaines villes comme Jendouba, Kairouan, Mahdia et Monastir, devraient présenter une incidence modérée de la maladie, avec des chiffres oscillant entre 18 000 et 20 000 cas. Quant aux zones du nord elles sont les moins touchées, telles que Sousse, Tunis, Manouba et Zaghouan, elles devraient enregistrer environ 16 000 cas, indiquant

une tendance générale plus faible de l'incidence de la leishmaniose cutanée dans ces régions.

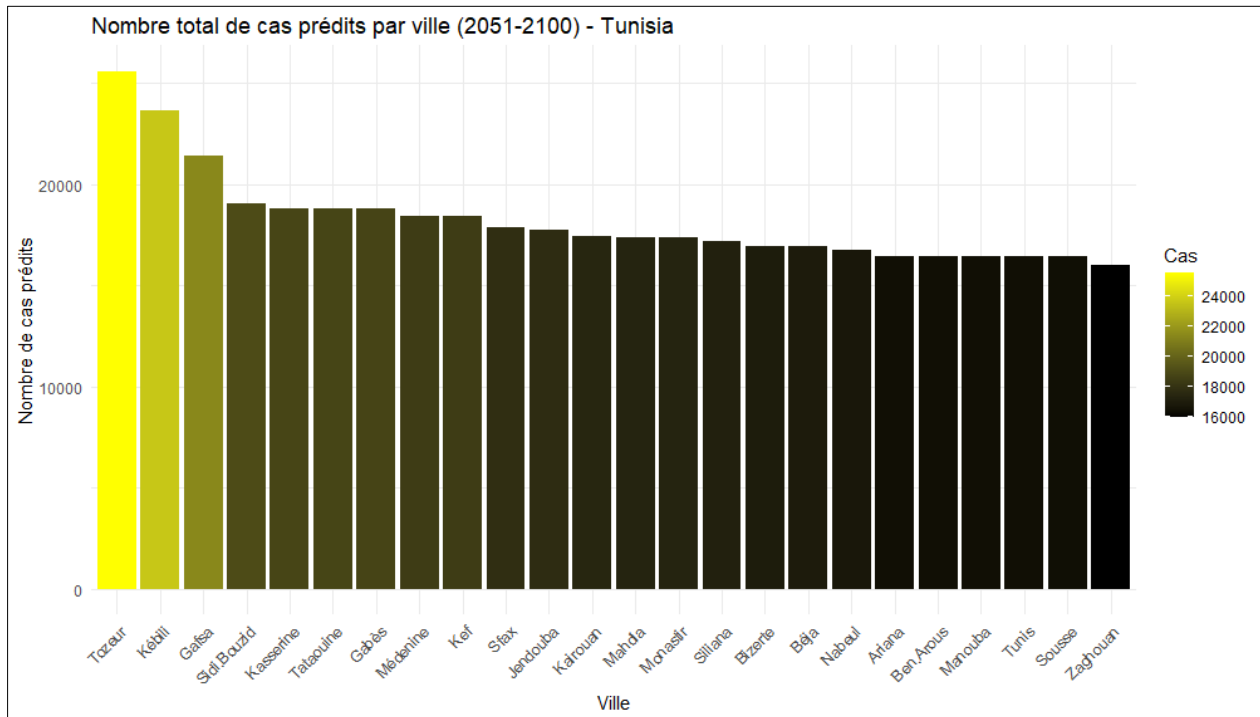


Figure 35 Nombre de cas de LC prédits par ville et par mois (2050-2100) – Tunisie

La **Figure 36** présente une analyse prospective de la distribution anticipée des cas de leishmaniose cutanée au Maroc, par ville, pour la période de 2021 à 2050. Cette analyse révèle une variation significative de l'incidence de la maladie, avec des chiffres estimés entre 12 000 et 16 000 cas. Durant cette première période, Sousse Massa, Méknès et Oriental se démarquent en enregistrant plus de 15 000 cas, soulignant ainsi leur susceptibilité à cette maladie en raison des conditions environnementales favorables. D'autres régions, telles que Fès, Marrakech, Tanger et Casablanca, devraient également

connaître une incidence modérée, avec plus de 13 000 cas. En revanche, Rabat et Doukkala-Abda devraient enregistrer un nombre inférieur à 13 000 cas.

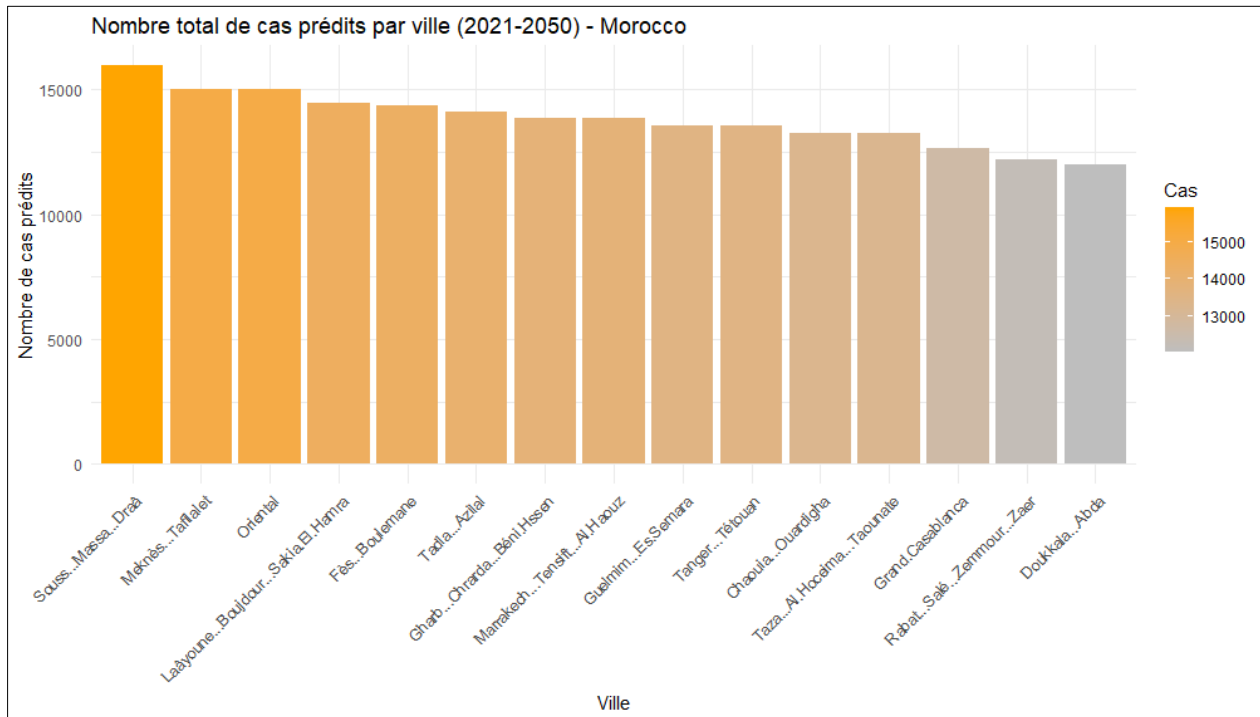


Figure 36 Nombre total de cas prédits par ville (2021-2050) – Maroc

La **Figure 37** offre une analyse prospective de la répartition anticipée des cas de leishmaniose cutanée au Maroc, par ville, pour la période de 2050 à 2100. Durant cette période, on prévoit une amplitude de cas allant de 18 000 à 24 000. Oriental devrait enregistrer le plus grand nombre de cas, approchant les 24 000, ce qui souligne sa vulnérabilité à la maladie. D'autres villes telles que Fès, Meknes, Souss-Massa-Drâa, Taza-Al Hoceïma et Gharb-Chrarda devraient également enregistrer un nombre élevé de cas, variant entre 22 000 et 20 000. En revanche, des villes telles que Tanger, Casablanca et Doukkala-Abda devraient connaître un nombre minimum de cas, estimé à 18 000.

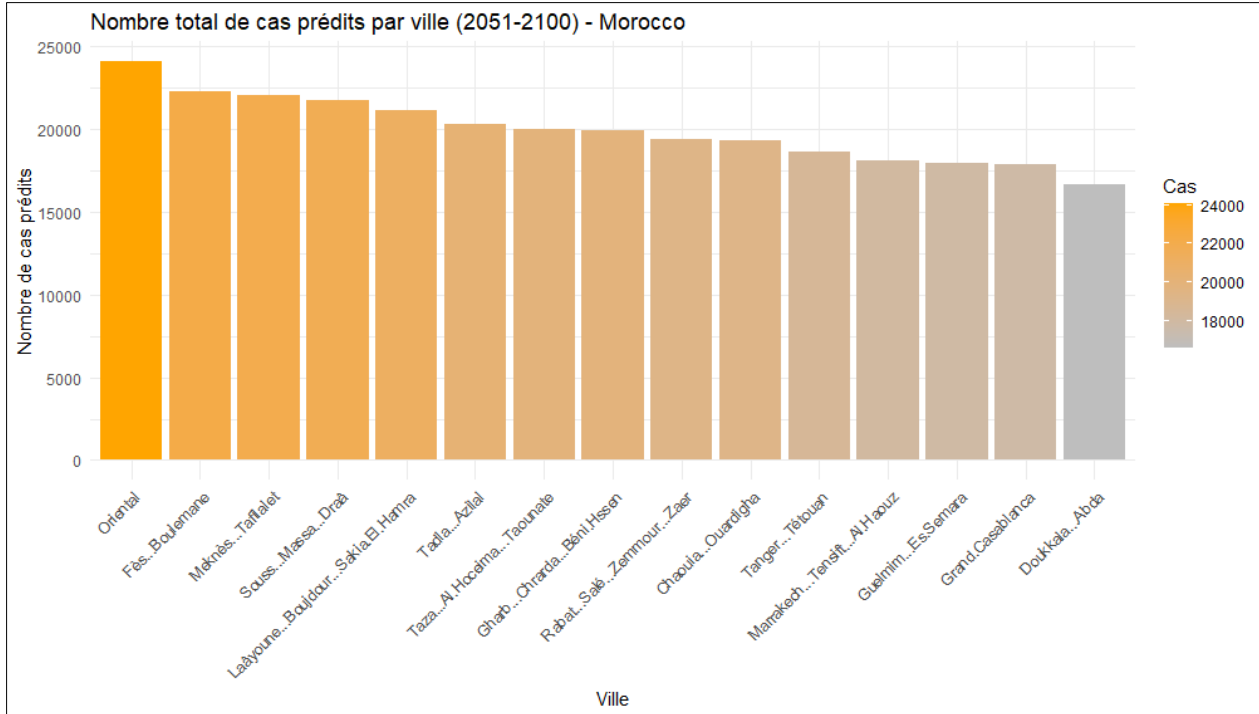


Figure 37 Nombre total de cas prédits par ville (2050-2100) – Maroc

III.4.4.4 Projection cartographique de l'évolution de la leishmaniose cutanée dans le Nord-Ouest de l'Afrique : Cas de l'Algérie, du Maroc et de la Tunisie.

Les résultats obtenus grâce au modèle additif généralisé (GAM) ont permis de formuler une équation de prédiction pour les cas de Leishmaniose cutanée, en tenant compte des variables climatiques futures jugées significatives pour cette maladie. Ces données ont été utilisées pour cartographier le risque de LC dans la région du Nord-Ouest de l'Afrique, sous l'influence du changement climatique future, en exprimant les cas de LC par région et par mois (cas/mois/50x50 km). **(Figure 38)**

Pour la période de référence de 2000 à 2020 à Ghardaïa, le nombre de cas mensuel de LC était de 37, et de 44 pour l'ensemble de l'Algérie. Au fil du temps, une augmentation des cas mensuels de LC est anticipée. Les projections révèlent des différences marquées dans les pics d'incidence entre les pays étudiés : en Algérie, un pic est prévu à court terme pour la période 2021-2041 (pic en 2025), au Maroc, un pic est prévu à moyen terme pour la période 2061-2081 (pic en 2065), et en Tunisie, un pic est prévu à long terme pour la période 2081-2100 (pic en 2085).

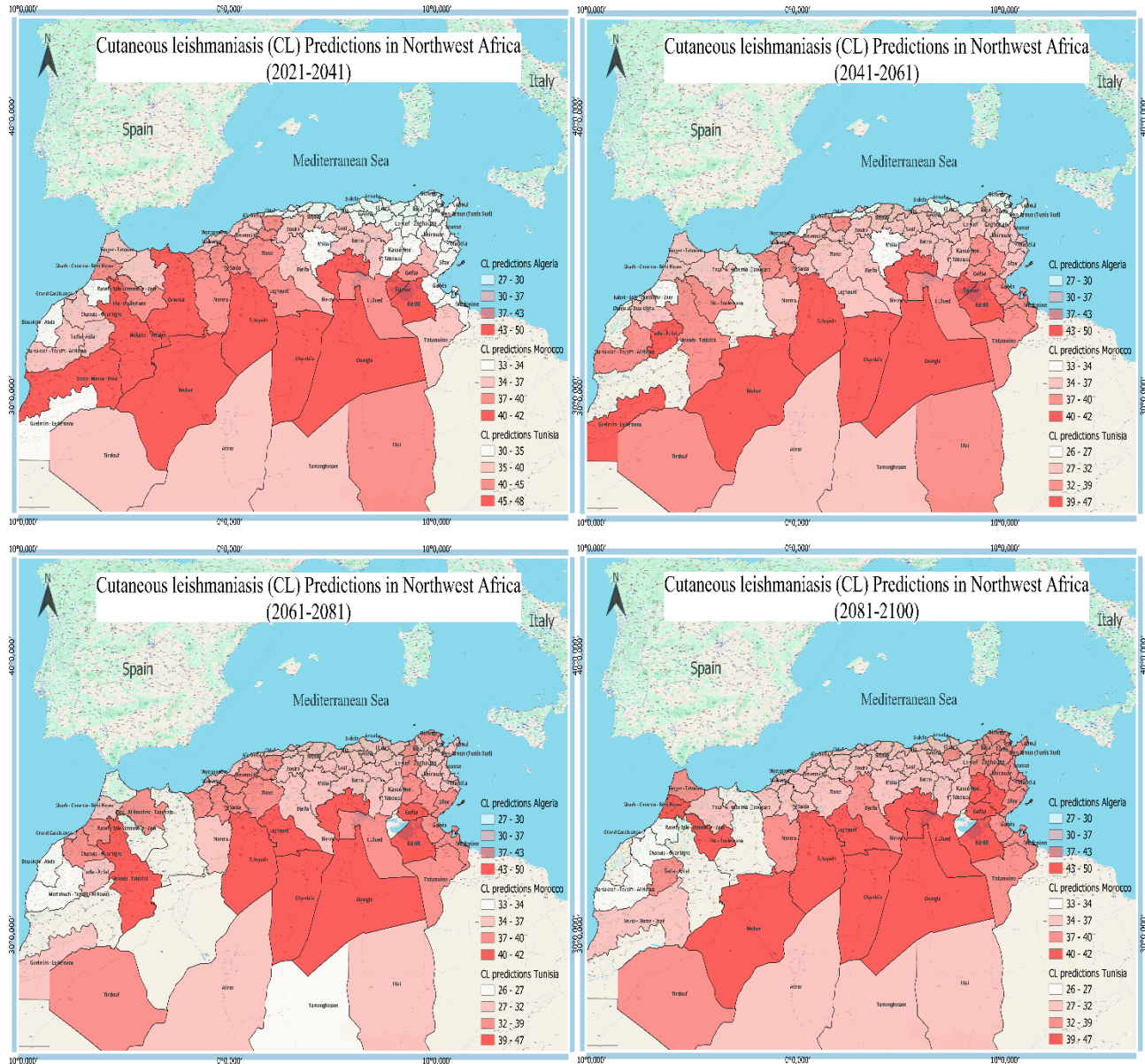


Figure 38 Prédiction de l'évolution spatiotemporelle de la leishmaniose cutanée (LC) en Afrique du Nord-Ouest 2021-2100

Outre les chiffres bruts, une analyse plus profonde met en lumière la dynamique spatiale de la maladie. L'expansion géographique de la LC vers les régions du nord-est est particulièrement frappante, avec des variations notables dans le temps et l'espace.

En effet, le risque d'émergence ou d'extension de la Leishmaniose cutanée est plus marqué dans les régions du Nord, notamment le long de la côte méditerranéenne des

trois pays étudiés. En revanche, les régions du Nord-Ouest comme le Maroc et les villes Algériennes de l'ouest semblent moins exposées au risque, avec une diminution observée du nombre de cas au fil des années. Les régions du Sud ne montrent pas de changements significatifs, avec des niveaux de cas et des taux d'incidence relativement stables. Cependant, une augmentation importante est observée dans le Nord, avec même une saturation prévue dans certaines régions, comme le Nord-Est de l'Algérie et toute la Tunisie.

III.5 Discussion

La Leishmaniose cutanée sévit en Algérie depuis longtemps, en particulier dans la région de Ghardaïa. Bien que l'occurrence de la LC ne soit pas stable, elle réapparaît de manière cyclique tous les 5 à 7 ans dans la plupart des régions du pays, ce qui est conforme aux conclusions de **Toumi et al. [121]** La distribution des cas de LC a présenté un schéma saisonnier distinct qui donne une idée des mois au cours desquels la maladie est la plus répandue chez les humains. Cependant, il est important de considérer que la période d'incubation de l'agent pathogène responsable de la LC symptomatique peut aller de quelques semaines à plusieurs mois. Par conséquent, bien que le schéma saisonnier offre des informations utiles, il est crucial d'adopter une vision à long terme lors de l'étude de l'épidémiologie de la LC [122-123].

L'analyse utilisant les GAM a révélé que le facteur climatique le plus significatif affectant l'occurrence des épidémies de LC est l'humidité relative. En effet le coefficient de corrélation est notablement révélateur et les deux GAM ont confirmé la relation avec des Valeurs p particulièrement significatif. Ces résultats suggèrent que les cas de LC sont très sensibles aux niveaux d'humidité dans l'environnement. Des recherches antérieures menées par **Toumi et al. [121]** ont démontré que l'humidité relative est un meilleur prédicteur de l'incidence de la LC que la pluviométrie. À vrai dire, la survie et la reproduction des phlébotomes, vecteurs de diverses maladies dont la leishmaniose, sont fortement influencées par les niveaux d'humidité, ils sont plus susceptibles de prospérer et de se multiplier dans des environnements plus humides, augmentant ainsi le risque de transmission de la maladie [124]. Selon une étude de **Talbi FZ et al.** Réaliser au Maroc, des niveaux d'humidité relative plus élevés étaient positivement corrélés avec une plus grande abondance de phlébotomes, ce qui est conforme à nos résultats qui supposent qu'une plage d'humidité de 25% à 55% augmente énormément le nombre de cas de LC dans la région de Ghardaïa [125]. Une autre étude de **Selmane S en 2015** menée dans la province de Biskra en Algérie a trouvé le même coefficient de corrélation entre l'humidité et les cas de LC [126]. Cependant, une recherche menée dans la province de Golestan, en Iran, a confirmé que les précipitations sont le facteur le plus important dans la densité des vecteurs de la LC [127] certes les phlébotomes ont besoin d'une certaine quantité d'humidité pour leur développement et leur survie, cependant de fortes

précipitations peuvent également tuer les adultes et les stades immatures des phlébotomes, ce qui explique pourquoi les précipitations sont généralement associées négativement à l'apparition de la LC [128-129-130]. En raison des effets complexes et indirects des précipitations sur la végétation, les rongeurs et les vecteurs, les conséquences qui en résultent sont difficiles à saisir et peuvent varier d'une région à l'autre [131]. Notre analyse avec les modèles GAM n'a pas révélé d'association significative entre les précipitations et l'apparition de cas de LC. Il est probable que la quantité et la durée des précipitations dans la région désertique de Ghardaïa, en Algérie, au cours de notre période d'étude de 20 ans, n'ont pas été suffisantes pour montrer un impact significatif sur l'incidence de la maladie. De plus, ces dernières années, les précipitations ont été encore plus faibles dans la région, ce qui a encore réduit l'impact potentiel de ce facteur sur la transmission de la LC. Ces résultats suggèrent que d'autres facteurs, tels que l'humidité relative et la température, peuvent être plus importants pour influencer l'incidence de la LC dans une zone de sécheresse comme Ghardaïa.

L'analyse de corrélation entre les températures (moyenne, maximale et minimale) et les cas de LC a révélé une relation négative significative. Ces résultats suggèrent que si la température ambiante est une bonne condition pour la transmission de la maladie, une augmentation de celle-ci n'est pas propice au développement de la LC. Cependant, les résultats des modèles GAM ont montré que l'impact de la température sur l'émergence de la LC est limité, avec des effets concentrés dans une gamme étroite de 20°C à 30°C. Cette plage de températures semble être particulièrement favorable à l'incidence de la LC en raison des conditions environnementales qui favorisent la prolifération des phlébotomes vecteurs. Ces vecteurs préfèrent des températures situées dans la même fourchette, comme l'a montré *Depaquit et al.* en 2009 La température joue un rôle crucial dans la transmission de la LC [141]. Comme le démontrent des études réalisées dans différentes parties du monde, telles que le Panama, l'Afghanistan, l'Algérie et la Tunisie [142-143-144-112]. Cependant, les températures en dehors de l'intervalle de 20°C à 30°C peuvent également avoir un impact significatif sur l'émergence de la LC. Par exemple, une petite augmentation de 1°C à 3°C de la température peut affecter la croissance des populations de vecteurs et diminuer leur densité pour l'année suivante [145]. Cette diminution pourrait résulter en une réduction du nombre de cas de LC dans la région

suyant ce réchauffement. Cependant, cela souligne également le fait que le réchauffement climatique dans les villes d'Afrique du Nord et en Europe représente un risque important pour la transmission de la LC en particulier et des maladies à transmission vectorielle en général dans un avenir proche.

La distribution de la variable représentatif du couvert végétal « NDVI » a révélé que la région de Ghardaïa a un très faible couvert végétal, avec un NDVI maximum de 0,21. La corrélation de Spearman a montré que le couvert végétal est positivement associé au nombre de cas de LC. L'impact limité du couvert végétal sur l'incidence de la LC peut être observé à partir des résultats du GAM, où l'effet n'est important que dans la plage de 0,01 à 0,2, bien que cet intervalle soit caractéristique de la région de Ghardaïa, cela pourrait également indiquer la véritable dynamique de la maladie, car d'autres études ont montré que le couvert végétal limité crée des conditions favorables aux phlébotomes en augmentant la température et l'évaporation [132]. En fait, une investigation sur la présence de *Ph. papatasi*, le principal vecteur de la LC, a été réalisée à l'aide d'algorithmes génétiques pour la production de jeux de règles (GARP) et de techniques d'entropie maximale (MaxEnt). Les deux modèles ont révélé que les régions centrales et septentrionales de la province étudiée, avec des zones de plaine, étaient plus sensibles à la propagation de *Ph. papatasi* que les régions méridionales, caractérisées par des zones montagneuses et forestières [133]. Une étude menée en Iran en 2014 a révélé que les parties méridionales de la province de Golestan, où les indices de végétation étaient élevés, présentaient les incidences les plus faibles de LC. À l'inverse, c'est dans les régions septentrionales de la province où le climat est aride et semi-aride et où l'indice de végétation est faible, que l'on trouve les communes présentant les taux d'incidence les plus élevés de la maladie. Cela suggère que l'absence ou la faible couverture végétale dans ces zones fournit une niche écologique favorable à l'apparition de la LC [134]. En fait, les phlébotomes sont attirés par la matière organique décomposée, qui constitue la principale source d'alimentation pour les larves de ces insectes [135]. Par ailleurs, ces environnements sombres et humides sont également caractérisés par la présence de sites propices au dépôt des œufs. Cependant, ils ont une forte préférence pour différentes sources de matière organique en décomposition, souvent d'origine fécale [136].

La vitesse du vent présente une corrélation négative avec l'incidence de la LC, comme l'indique le coefficient de corrélation obtenu. Nos résultats sont cohérents avec les conclusions d'une étude précédente faite dans le sud de l'Iran, qui a également rapporté une corrélation négative entre la vitesse du vent et la prévalence spatiale de la leishmaniose [137]. Cependant, l'analyse du modèle GAM a également montré que la vitesse du vent a un effet complexe sur l'incidence de la LC, un intervalle de 5 à 10 km/h étant associé à une augmentation des cas, tandis que les vitesses supérieures à 10 km/h ont conduit à une diminution des cas. Il est important de prendre en compte la force de la vitesse du vent dans les stratégies de contrôle et de prévention de la maladie, car elle peut influencer la transmission de la LC de différentes manières. En 2016, *Wu et al.* ont proposé que la vitesse du vent ait un double effet sur les cas de LC, en diminuant la probabilité de piqûres d'insectes tout en augmentant leur rayon d'action [138]. De même, une autre étude menée en Iran en 2018 a confirmé le rôle de la vitesse du vent comme l'un des multiples facteurs climatiques affectant l'émergence des cas de LC dans la zone d'étude, à l'aide d'un modèle d'arbre de décision [132].

Les résultats des GAM ont montré que l'ajout de la tendance temporelle améliorerait les statistiques d'ajustement et la précision des prédictions du modèle. Plus précisément, la valeur REML s'est améliorée, ce qui indique une meilleure adéquation du modèle aux données, c'est-à-dire qu'il explique une plus grande partie de la variabilité des données. En outre, la valeur AIC a diminué, ce qui suggère un meilleur compromis entre la complexité du modèle et la qualité de l'ajustement. Une valeur AIC inférieure indique un modèle plus parcimonieux qui explique néanmoins une proportion substantielle de la variabilité des données [139]. Le R^2 ajusté a également augmenté, un R^2 de 0,19 indique que seulement 19 % de la variabilité du facteur dépendant peut être expliquée par les prédicteurs inclus dans le modèle, tandis qu'un R^2 de 0,6 explique 60 % de la fluctuation de la variable réponse. Cela suggère que les prédicteurs supplémentaires inclus dans l'équation ont amélioré de manière significative la capacité du modèle à expliquer la variable épidémiologique.

Nous avons comparé les performances prédictives des deux modèles. Les résultats ont montré que le modèle GAM_02 présente une relation plus forte entre les prédictions et

les données de test, comparé au modèle GAM_01 qui affiche un coefficient de corrélation plus faible. Cela indique que GAM_02 offre une meilleure performance prédictive que GAM_01, comme l'illustrent les figures de prédiction (**Fig. 26-27**). En effet, dans le modèle GAM_02, la ligne rouge suit fidèlement la tendance réelle de la maladie, montrant ainsi une prédiction précise de la dynamique épidémique (**Fig.27**). En revanche, pour le modèle GAM_01, la ligne rouge est presque plate et ne reflète pas correctement la véritable dynamique de la maladie, suggérant ainsi une performance prédictive moins efficace (**Fig.26**). Ces résultats sont cohérents avec les recherches antérieures qui ont démontré l'importance de la sélection des modèles pour prédire avec précision les résultats [140]. En examinant les interactions entre les prédicteurs multiples, nous avons identifié les valeurs spécifiques et les seuils de chaque facteur qui peuvent déclencher la transmission de la maladie. Les prédicteurs les plus significatifs de la LC à Ghardaïa, en Algérie, étaient un facteur environnemental (indice de végétation) et deux facteurs climatiques (humidité relative et vitesse du vent). Nos résultats soulignent également l'importance de prendre en compte la variabilité temporelle lors de l'analyse de l'incidence de la maladie. Cependant, cette étude pourrait être améliorée en incorporant des statistiques supplémentaires sur les réservoirs, telles que la densité des rongeurs et l'indice de développement économique/humain dans la région. Cela permettrait de développer un modèle prédictif plus complet et un système d'alerte précoce efficace pour la prise de décision et la prévention de la transmission et de l'émergence de la maladie dans les nouvelles villes.

Dans le deuxième volet de cette étude, une analyse descriptive des paramètres météorologiques projetés a été entreprise afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'incidence de la leishmaniose cutanée (LC) en Afrique du Nord (Algérie, Maroc, Tunisie). Les résultats affirment une tendance à l'augmentation des températures moyennes dans une fourchette de 1 à 4 °C, variable selon les régions étudiées. Cette observation corrobore les conclusions **d'Abed et Selmane (2023)**, qui prévoient une augmentation des journées caractérisées par des conditions chaudes et arides. Par ailleurs, une diminution significative, du taux de précipitations est anticipée dans les trois pays, suggérant une transition vers un environnement nord-africain de type chaud et aride, mais paradoxalement très humide [146].

Concernant l'humidité, une variation régionale est observée, avec une stabilité dans les normes pour le Maroc, tandis que la Tunisie et l'Algérie devraient connaître une augmentation de ce paramètre. En ce qui concerne la vitesse du vent, aucune variation significative n'est prévue, avec des valeurs oscillant entre 10 et 20 km/h.

Cette anticipation climatique projetée, caractérisée par des températures plus élevées que la normale, une diminution de la pluviométrie, une humidité élevée, crée des conditions favorables au développement des phlébotomes, vecteurs de la LC, ainsi qu'à leurs hôtes rongeurs, qui manifestent une préférence pour les sols secs et sablonneux, tels que ceux habituellement rencontrés chez *les Meriones shawi* [147].

En somme, ces prédictions affirment l'idée d'une transition climatique dans la région maghrébine, avec des implications potentielles majeures sur la distribution et l'incidence de la leishmaniose cutanée. Notre étude présente les premières projections du risque de LC en Afrique du Nord, basées sur les scénarios de changement climatique du modèle Cordex. Ces projections reposent sur une modélisation empirique de l'incidence de la LC confirmée en laboratoire dans la région de Ghardaïa, une ville algérienne où la maladie sévit de manière prononcée depuis deux décennies. Nos résultats indiquent que le risque de LC est susceptible d'augmenter en Afrique du Nord en raison du changement climatique. Cependant, la quasi-totalité de cet excès de risque serait concentrée dans les zones côtières de la Méditerranée, en particulier dans l'est des pays nord-africains, notamment en Algérie et surtout en Tunisie, des régions qui sont plus caractérisées par un climat humide.

Bien que notre modélisation soit basée à la LC, ces résultats pourraient avoir des implications pour d'autres maladies transmises par les vecteurs. L'étude de **Bouzig et al. (2014)** met en évidence que les projections du risque de dengue, une autre maladie à transmission vectorielle, indiquent une concentration des zones à haut risque le long des littoraux méditerranéen et adriatique, ainsi que dans le nord de l'Italie, notamment dans la plaine du Pô. Cela suggère un pattern similaire d'augmentation du risque de ces maladies infectieuses/tropicales dans les régions méditerranéennes en raison des changements climatiques [148].

Ces résultats soulignent l'importance cruciale d'intégrer le changement climatique dans les stratégies de prévention et de contrôle de cette maladie. L'étude met en évidence la nécessité d'adopter une approche holistique de gestion des risques pour atténuer les impacts potentiels des modifications environnementales sur la santé publique régionale. Ainsi, la cartographie du risque de LC fournie par notre étude pourrait servir de base pour élaborer des stratégies de surveillance et de contrôle spécifiques, en identifiant les zones les plus exposées et en adaptant les interventions en fonction des prévisions climatiques.

III.6 Conclusion

Cette étude a permis de modéliser le risque de leishmaniose cutanée dans la ville de Ghardaïa en lien avec différents facteurs environnementaux et climatiques, ainsi qu'à évaluer les effets potentiels du changement climatique sur l'incidence de cette maladie vectorielle en Afrique du Nord (Algérie, Tunisie et Maroc). Les principaux résultats ont mis en évidence le rôle clé de l'humidité relative, de la vitesse du vent et dans une moindre mesure du couvert végétal sur la dynamique de transmission de la leishmaniose cutanée dans la région de Ghardaïa en Algérie. L'incorporation de la tendance temporelle dans les modèles a considérablement amélioré ces performances prédictives, soulignant l'importance de prendre en compte la variabilité interannuelle dans les études épidémiologiques.

Les projections des scénarios de changement climatique indiquent une hausse des températures, une diminution des précipitations, une augmentation de l'humidité relative dans certaines régions en Afrique du Nord. Ces changements environnementaux créeraient des conditions plus favorables au développement et à la prolifération des phlébotomes vecteurs et de leurs réservoirs rongeurs, augmentant ainsi le risque de transmission de la leishmaniose cutanée. Nos modélisations projettent effectivement une hausse de l'incidence dans les zones côtières méditerranéennes, en particulier dans l'est en Tunisie et en Algérie en particulier, avec ses vastes régions côtières et son climat de plus en plus chaud, elle doit se préparer à ces défis sanitaires.

La région Nord-Est de l'Algérie représente un exemple poignant de la manière dont le changement climatique peut intensifier les risques sanitaires. Effectivement, en Avril 2024 l'observatoire régional de santé de l'est a publié un Bulletin couvrant l'état sanitaire des dernières années (2019-2022 et 2023) ou il est rapporté que 97% des maladies vectorielles recensé dans l'est de l'Algérie sont des Leishmaniose cutanée. Egalement, le laboratoire de parasitologie et de mycologie médicale au CHU d'Annaba diagnostique régulièrement des cas de LC. Même si la plus part peuvent être des cas rapporté d'autres villes, les conditions climatiques favorables augmente énormément le risque d'expansion des vecteurs et donc de la maladie dans la région, cette situation a mener l'Institut national de santé publique a lancer des campagnes de sensibilisation en vers les

maladies vectorielles et les changements climatiques ainsi que de diagnostic de LC dans le secteur de santé publique.

Ces informations concordent avec les projections d'autres études sur diverses maladies à transmission vectorielle, suggérant une tendance régionale d'augmentation des risques sanitaires liés au changement climatique dans les zones maghrébines. Dans ce contexte, il est impératif d'exploiter pleinement les résultats d'études épidémiologiques et écologiques, telles que celle-ci, qui offrent des insights précieux sur les dynamiques de transmission de la leishmaniose cutanée et d'autres maladies vectorielles. En intégrant ces connaissances scientifiques dans les politiques de santé publique, les autorités seront mieux équipées pour anticiper les risques, allouer judicieusement les ressources et mettre en œuvre des interventions adaptées aux spécificités régionales et saisonnières de la maladie. Cette étude souligne l'importance cruciale d'intégrer les effets actuels et futurs du changement climatique dans les stratégies de surveillance, prévention et contrôle des maladies vectorielles, en particulier dans les régions méditerranéennes identifiées comme étant à haut risque. Une approche de gestion des menaces environnementales de manière anticipée et spatialement ciblée sera essentielle pour atténuer l'impact sanitaire de ces changements dans un futur proche. L'approche fondée sur des données probantes est essentielle pour relever les défis complexes posés par les maladies vectorielles dans un contexte de changement climatique, assurant ainsi une meilleure protection de la santé publique à long terme. En adoptant une telle stratégie, les autorités seront mieux préparées à faire face aux alertes sanitaires et à relever les défis émergents, contribuant ainsi à la résilience des systèmes de santé face aux changements environnementaux.

IV) Covid-19 en Algérie : Analyse Spatio-Temporelle et Relationnelle des Facteurs Climatiques et de la Qualité de l'Air avec la pandémie.

IV.1 Introduction

Le 30 janvier 2020, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a désigné la COVID-19 comme une urgence de santé publique de portée internationale, et le 11 mars 2020, elle a déclaré la première pandémie de coronavirus à l'échelle mondiale [149]. Un an après au 16 décembre 2020, on comptait plus de 1,65 million de morts dus au COVID-19 et plus de 74,7 millions d'infections confirmées dans 214 pays [150]. Les États-Unis, avec 23% des cas mondiaux, l'Inde avec 13,3%, et le Brésil avec 9,4%, figurent parmi les nations les plus touchées, représentant ensemble 38,5% des décès mondiaux dus à la maladie.

En Afrique, l'Égypte, l'Algérie et le Nigeria ont respectivement enregistré leurs premiers cas signalés par l'OMS les 14, 18 et 25 février 2020 [151]. Le système de santé algérien a été soumis à une forte pression en raison de la surcharge des capacités hospitalières et de la pénurie de personnel et de matériel médical. La pandémie a également révélé les inégalités d'accès aux soins selon les régions et les catégories sociales. La campagne de vaccination contre la COVID-19, lancée en janvier 2021 en Algérie, progressait lentement en raison du manque de doses et de la réticence d'une partie de la population [152].

La crise sanitaire mondiale a perturbé les échanges internationaux et nationaux de l'Algérie. Les exportations algériennes, notamment vers l'Union européenne, son principal partenaire commercial, ont diminué. Les importations ont également baissé en raison des restrictions mises en place pour préserver les réserves de change [153]. Au niveau national, la pandémie a limité la mobilité des personnes et des biens, entraînant une perturbation des activités économiques et sociales dans les différentes régions du pays [152].

Face à la pandémie, les gouvernements ont été contraints d'adopter des mesures restrictives, telles que la ségrégation sociale et le confinement, pour enrayer la propagation du virus et réduire le taux de mortalité [154]. Les systèmes de santé

internationaux ont mis en œuvre des mesures préventives non curatives, y compris des confinements totaux ou partiels, pour atténuer les effets du COVID-19 [155]. Des densités extrêmes, des réseaux de rues trop interconnectés, des communautés monofonctionnelles, une ventilation naturelle inadéquate et un manque de lumière du soleil sont des facteurs qui augmentent le risque d'épidémie et doivent être évités dans les actions de confinement spatial [156].

La plupart des pays africains ont instauré des mesures strictes d'intervention non pharmaceutique au début de l'épidémie pour ralentir la propagation du virus [157]. Ces mesures comprennent l'obligation de porter un masque, la ségrégation sociale, la fermeture des frontières, la fermeture des bâtiments publics, et la restriction des déplacements [158].

Paradoxalement, la pandémie a aussi affecté le climat. D'une part, les émissions de CO₂ ont diminué temporairement en raison du ralentissement de l'économie et des transports. D'autre part, les discussions internationales sur le climat ont été reportées et les financements pour la transition énergétique compromis [159]. Le climat lui-même peut influencer la transmission du COVID-19 de manière complexe et variable. Certaines recherches suggèrent que la température peut influencer la transmission du virus, mais il est prématuré de compter sur des températures plus chaudes pour réduire la transmissibilité du COVID-19 [160]. D'autres aspects du climat, comme l'humidité [161], les aérosols [162], ou encore la vitesse du vent [163], sont également étudiés. Les températures extrêmes peuvent affecter la viabilité du virus, et les variations climatiques peuvent influencer les comportements humains, ce qui peut à son tour affecter la transmission du virus [164].

D'autres études se sont penchées sur l'impact de la qualité de l'air sur la propagation et la gravité de la COVID-19. Une étude menée à Bucarest, en Roumanie, a examiné la relation entre la pollution de l'air et les variables climatiques avec l'incidence et la mortalité liées à la COVID-19. Les résultats ont montré une corrélation positive entre la pollution de l'air et l'aggravation de la pandémie, mettant en évidence l'importance de réduire les

émissions anthropiques pour atténuer les effets de la pollution sur la transmission du virus **[165]**.

D'autres études, menées en Chine ont également trouvé des associations significatives entre l'exposition à court terme à la pollution de l'air et l'augmentation des cas confirmés de COVID-19, fournissant ainsi des indications sur l'impact potentiel de la pollution atmosphérique sur la propagation de la maladie. Ces résultats soulignent l'importance de comprendre le rôle des facteurs environnementaux, tels que le climat et la qualité de l'air dans la dynamique de la pandémie de COVID-19 **[166]**.

Dans ce chapitre, notre recherche vise d'abord à réaliser une analyse descriptive des 26 villes d'Algérie en étudiant la distribution des températures (moyenne, maximale, minimale), de l'humidité, des précipitations et de la vitesse du vent, ainsi que la distribution des cas de COVID-19 et des décès au cours de la période du 3 mai 2020 au 31 mars 2022. Ensuite, une analyse de corrélation sera effectuée pour détecter les relations potentielles entre les conditions climatiques et les cas/ décès lié au Covid-19. En parallèle, une étude de cas spécifique à Alger, sera menée pour examiner l'impact du polluant atmosphérique PM2.5 sur l'incidence ainsi que l'aggravation des cas et l'augmentation du taux de mortalité de la maladie dans cette région.

IV.2 Généralité sur la pandémie Covid-19

Le virus SARS-CoV-2 est la maladie infectieuse connue sous le nom de coronavirus (COVID- 19). La majorité des personnes infectées par le virus développent d'une maladie respiratoire légère à modérée et se rétablissent sans avoir besoin de soins particuliers. Cependant, certaines personnes deviennent très malades et ont besoin de soins médicaux. Une variante grave est plus susceptible de se produire chez les personnes âgées et celles qui souffrent d'une affection sous-jacente, telle qu'un cancer, un diabète, une maladie respiratoire chronique ou une maladie cardiovasculaire. Toute personne, quel que soit son âge, qui contracte le COVID-19 souffre d'une maladie grave, voire en meurt. Connaître la maladie et le mode de propagation du virus est la meilleure stratégie pour prévenir et retarder la transmission. En maintenant une distance d'au moins un mètre

entre les personnes, en portant un masque bien ajusté et en se lavant souvent les mains, on peut prévenir l'infection chez soi et chez les autres [167].

IV.2.1 Origine

Le SARS-CoV2, le nouveau coronavirus à l'origine du COVID-19, pourrait trouver son origine à Wuhan, en Chine [168-169]. Les premières recherches ont révélé que les chauves-souris pourraient être à l'origine du virus CoV-2 du SRAS. Selon des études, le CoV-2 du SARS partage 96 % de ses nucléotides avec un coronavirus de chauve-souris [170]. La ou les sources exactes et les méthodes de transmission du SRAS-CoV-2 restent encore inconnues. Bien que le contact direct avec des animaux hôtes intermédiaires ou l'ingestion d'animaux sauvages aient été initialement considérés comme les principales voies de transmission du virus à l'homme, l'identité précise de ces hôtes intermédiaires n'a toujours pas été établie avec certitude. [171].

Des recherches ont permis de découvrir que l'épidémie était due à un virus à ARN appartenant à la même famille de coronavirus que ceux qui ont provoqué la pandémie du syndrome respiratoire du Moyen-Orient (MERS) en 2012 et celle du syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS) en 2003, respectivement [172].

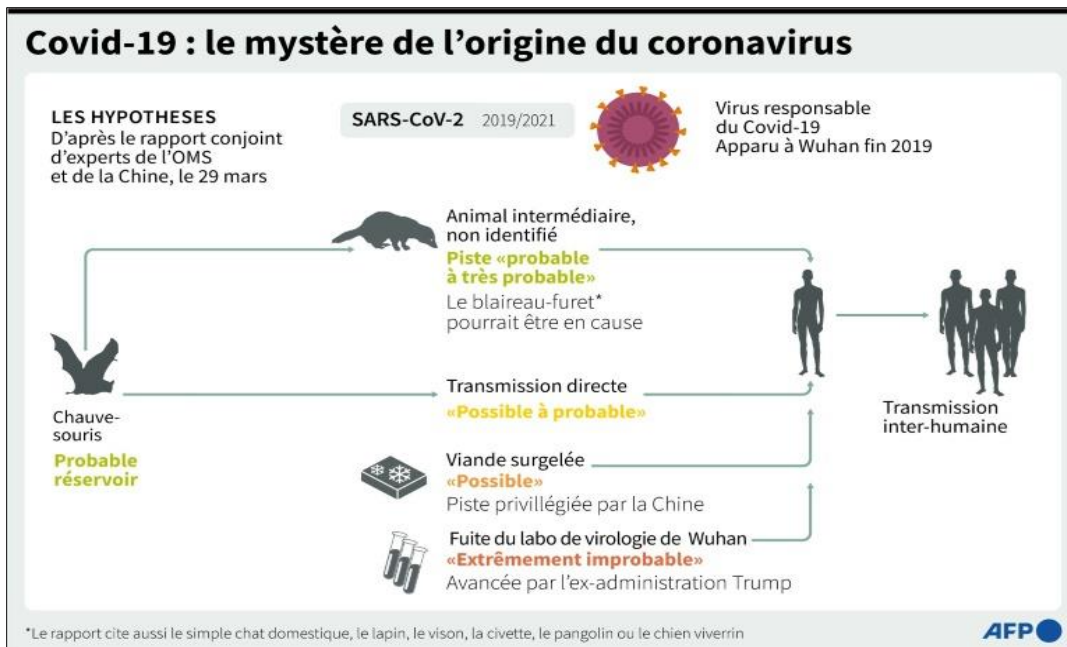


Figure 39 Origine du virus covid-19 (Selon l'OMS Mars 2021)

IV.2.2 Les vagues de Covid-19 dans le monde

Les vagues de COVID-19 dans le monde ont été marquées par une série de hausses et de baisses des cas et des décès, souvent provoquées par l'émergence de nouveaux variant du virus. Chaque vague a présenté des caractéristiques distinctes en termes de contagiosité, de gravité et de réponse des systèmes de santé [200].

La première vague a débuté en Chine fin 2019 et s'est rapidement propagée en Europe et aux États-Unis début 2020. Cette vague a entraîné des confinements stricts dans de nombreux pays pour tenter de contenir la propagation du virus.

À l'automne 2020, une deuxième vague a frappé, touchant principalement l'Europe et l'Amérique du Nord. Cette recrudescence des cas a été en grande partie attribuée à l'émergence du variant Alpha.

La troisième vague, qui s'est étendue de la fin 2020 au printemps 2021, a eu un impact majeur en Amérique latine, en Afrique et en Asie du Sud-Est. Elle était dominée par le variant Beta.

L'été et l'automne 2021 ont vu l'arrivée de la quatrième vague, provoquée par le variant Delta. Ce variant, très contagieux, a entraîné une forte augmentation des hospitalisations et des décès, et ce malgré les campagnes de vaccination en cours dans de nombreux pays.

Enfin, la cinquième vague a commencé fin 2021 et s'est poursuivie début 2022. Elle a été attribuée au variant Omicron, caractérisé par une contagiosité très élevée. Cependant, la gravité des infections était généralement moindre, surtout chez les personnes vaccinées ou ayant déjà contracté le virus [173].

Ces vagues de Covid-19 ont causé plus de 760 millions de cas et 6,9 millions de décès enregistrés dans le monde à ce jour. Les campagnes de vaccination ont joué un rôle crucial pour atténuer la gravité des vagues successives, bien que de nouveaux variant continuent d'émerger et de poser des défis pour les professionnels de santé. [200]

IV.2.3 Les vagues de Covid-19 en Algérie

L'Algérie a connu plusieurs vagues de covid-19 depuis le début de la pandémie.

- **La première vague** de Covid-19 a commencé en mars 2020 et s'est prolongée jusqu'en juin 2020. Elle a entraîné un confinement strict dans tout le pays pour freiner la pandémie.
- **La deuxième vague** a eu lieu entre octobre 2020 et février 2021, avec une recrudescence des cas en raison du variant Alpha. Elle a été marquée par une saturation des hôpitaux et des cimetières, ainsi que par une pénurie d'oxygène médical.
- **La troisième vague** a débuté en avril 2021 et s'est intensifiée en juillet 2021, touchant surtout les jeunes et les personnes non vaccinées. Elle a été provoquée par le variant Delta, apparu en Inde en avril 2021 et qui s'est répandu dans le monde entier au cours de l'été 2021. Elle a entraîné une explosion des cas et des décès, malgré la progression de la vaccination.
- **La quatrième vague** est attribuée au variant Omicron, découvert en Afrique du Sud en novembre 2021 et qui se caractérise par une contagiosité très élevée. Elle a entraîné une hausse des cas dans le pays, mais aussi une baisse de la gravité des infections chez les personnes vaccinées ou ayant déjà contracté le virus [174].

IV.2.4 Classification

Table 12 Taxonomie du coronavirus 2 (SARS-CoV-2) [175]

| Type | <i>Virus</i> |
|--------------------------|--|
| Domaine | <i>Riboviria</i> |
| Règne | <i>Orthornavirae</i> |
| Embranchement | <i>Pisuviricota</i> |
| Classe | <i>Pisoniviricetes</i> |
| Ordre | <i>Nidovirales</i> |
| Sous-ordre | <i>Cornidovirineae</i> |
| Famille | <i>Coronaviridae</i> |
| Sous-famille | <i>Orthocoronavirinae</i> |
| Genres de rang inférieur | <i>Alpha coronavirus, Beta coronavirus, Gamma coronavirus, Delta coronavirus</i> |

IV.2.5 Cycle viral

La **figure 40** représente le cycle viral du SARS-CoV-2 qui commence par son attachement à la surface d'une cellule hôte, une étape cruciale pour son entrée dans la cellule. Cette liaison est médiée par les spicules viraux, en particulier la protéine S (spike), qui se lie à un récepteur cellulaire appelé ACE2 (enzyme de conversion de l'angiotensine 2). Une fois attaché, le virus pénètre dans la cellule hôte en fusionnant avec sa membrane cellulaire, permettant ainsi la libération de son ARN viral dans le cytoplasme cellulaire. À l'intérieur de la cellule, le virus exploite les machineries cellulaires pour la synthèse de ses propres composants viraux, y compris les protéines nécessaires à la formation de nouvelles particules virales. Ces composants viraux sont assemblés et libérés de la cellule hôte, prêts à infecter d'autres cellules et à poursuivre le cycle infectieux. Ce processus de réplication virale détourne les processus cellulaires normaux au profit de la production de nouveaux virus, ce qui contribue à la propagation de l'infection d'une manière plus rapide.

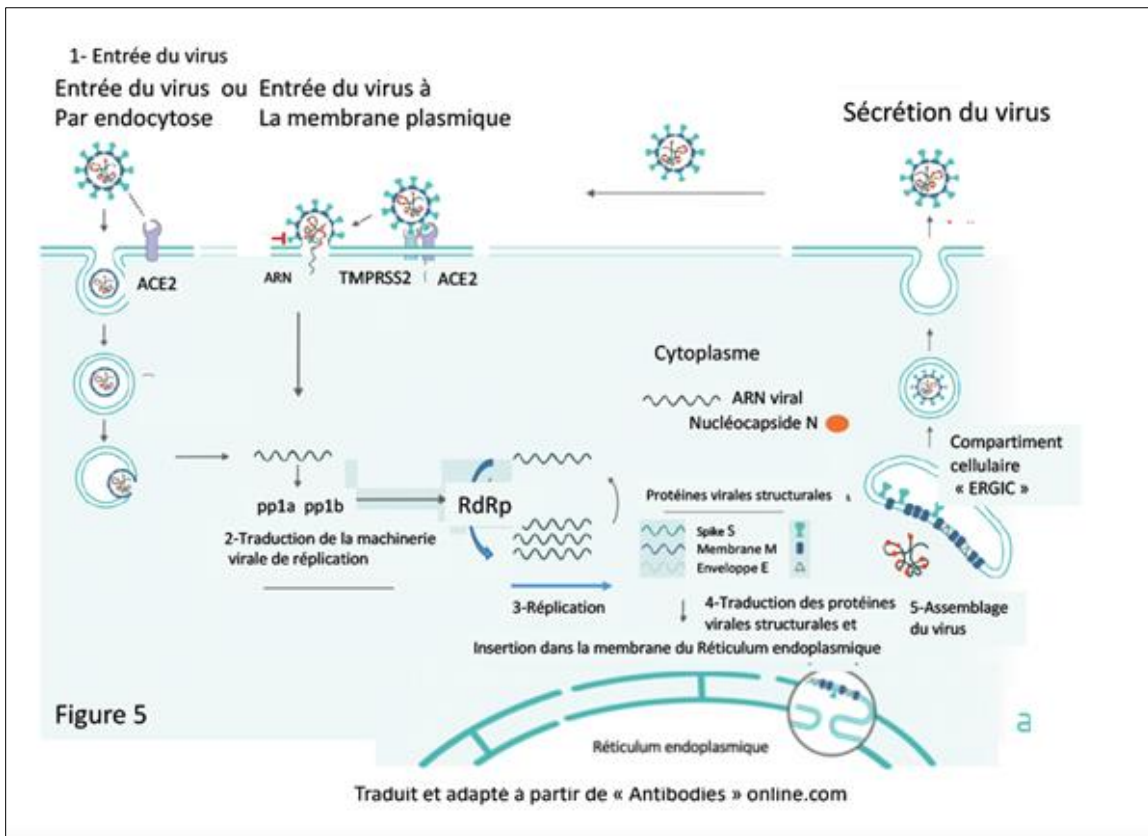


Figure 40 Cycle viral de SARS-CoV2 dans la cellule hôte [176]

IV.2.6 Symptômes

Table 13 Symptômes du Covid-19 [OMS]

| Groupe | Symptômes |
|--|---|
| Symptômes typiques | Fièvre |
| | Toux sèche |
| | Faiblesse |
| Symptômes moins courants | Perte de goût et d'odorat |
| | Obstruction nasale |
| | Yeux rouges dus à la conjonctivite |
| | Douleur à la gorge |
| | Maux de tête |
| | Gêne articulaire ou musculaire |
| | De nombreux types d'éruptions cutanées |
| | Vomissements ou nausées |
| | Diarrhée |
| | Vertiges ou frissons |
| Symptômes graves | Difficultés respiratoires |
| | Diminution de l'appétit |
| | Etat confusionnel |
| | Raideur ou douleur persistante dans la poitrine |
| | Température élevée (plus de 38 °C) |
| Symptômes moins fréquents | L'irritabilité |
| | Un état de confusion |
| | Des troubles de la conscience (parfois accompagnés de crises d'épilepsie) |
| | Des troubles de l'anxiété |
| | Troubles du sommeil |
| | Dépression |
| | Les accidents vasculaires cérébraux |
| | Les inflammations cérébrales |
| La folie, lésions nerveuses sont des effets secondaires neurologiques plus graves et moins fréquents | |

IV.2.7 Transmission

Le SARS-CoV-2 est l'un des virus responsables des infections respiratoires modéré à aiguë et peut être transmis des animaux aux êtres humains et vice versa ou d'Homme à Homme. Actuellement, les hôtes intermédiaires mammifères sont utilisés pour transférer les virus SARS-CoV-1, MERS-CoV et SARS-CoV2 d'un humain à l'autre. On sait que les

chauves-souris sont à l'origine des deux premiers virus. Le SARS-CoV-2 entre très probablement dans cette catégorie également [177].

Cette infectiosité et la transmission par aérosol d'une personne à l'autre, ainsi que le contact entre les mains infectées et les surfaces contaminées lorsqu'elles sont portées sur le visage. Par contact direct avec une muqueuse (transmission directe) ou par contact indirect avec une surface infectée via les muqueuses nasales, buccales ou conjonctivales, ces gouttelettes remplies de particules virales peuvent infecter un patient sensible [166]. L'ARN viral a également été trouvé dans les selles et le sang des patients infectés, ainsi que dans des échantillons respiratoires. La transmission peut également se produire lors d'un contact avec les matières fécales, les mains ou le sang [178].

IV.2.8 Effets réciproques entre le climat et la COVID-19

La pandémie de COVID-19 et le climat entretiennent une relation bidirectionnelle complexe, où chacun influence l'autre de manière significative. D'une part, les conditions climatiques jouent un rôle crucial dans la propagation du virus. Des études montrent que le virus responsable de la COVID-19 survit moins longtemps dans des conditions humides et chaudes, alors qu'il persiste davantage dans des environnements secs et froids [179]. Cela pourrait expliquer pourquoi la pandémie a été plus sévère dans les régions tempérées comparativement aux régions tropicales. En effet, des facteurs tels que la température, l'humidité, la vitesse du vent, les précipitations et la qualité de l'air affectent la survie du virus dans l'environnement et sa transmission par l'air ou par les surfaces. La radiation solaire, avec son effet désinfectant, peut aussi jouer un rôle en réduisant la viabilité du virus sur les surfaces exposées [180].

Cependant, le climat n'est pas le seul déterminant de la transmission de la COVID-19. D'autres éléments, comme le comportement des individus, les mesures de contrôle sanitaire, l'immunité collective et les variantes du virus, jouent également des rôles essentiels [156]. Par conséquent, il n'est pas possible de prédire avec certitude l'évolution de la pandémie en fonction des seules saisons ou des régions climatiques.

D'autre part, la pandémie a eu des impacts notables sur le climat. Les mesures de confinement mises en place pour contrôler la propagation du virus ont conduit à une réduction significative des activités économiques, entraînant une baisse des émissions de CO₂. En 2020, les émissions de CO₂ provenant de la combustion des énergies fossiles ont chuté de 7 %, une diminution sans précédent. Cette réduction a été observée principalement en raison de la baisse des déplacements, la suspension des activités industrielles et la réduction du trafic aérien et routier. Les niveaux de dioxyde d'azote NO₂ ont également diminué de manière significative dans plusieurs grandes villes à travers le monde. Toutefois, cette baisse temporaire n'a pas suffi à freiner l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère, qui a atteint des niveaux record la même année. **[181]**.

Certains ont utilisé la relance économique pour renforcer leur soutien aux énergies fossiles, cherchant à stimuler rapidement l'économie, tandis que d'autres ont accentué leurs efforts vers une transition écologique, investissant dans les énergies renouvelables et des projets de développement durable.

Cette expérience mondiale met en lumière l'importance d'une action coordonnée et durable pour lutter contre le changement climatique, même en période de crise sanitaire.

IV.3 Matériels et Méthodes

IV.3.1 Analyse Descriptive et Corrélations entre les Facteurs Climatiques et Épidémiologiques de la Covid-19 en Algérie

IV.3.1.1 Zones d'Étude : L'Algérie

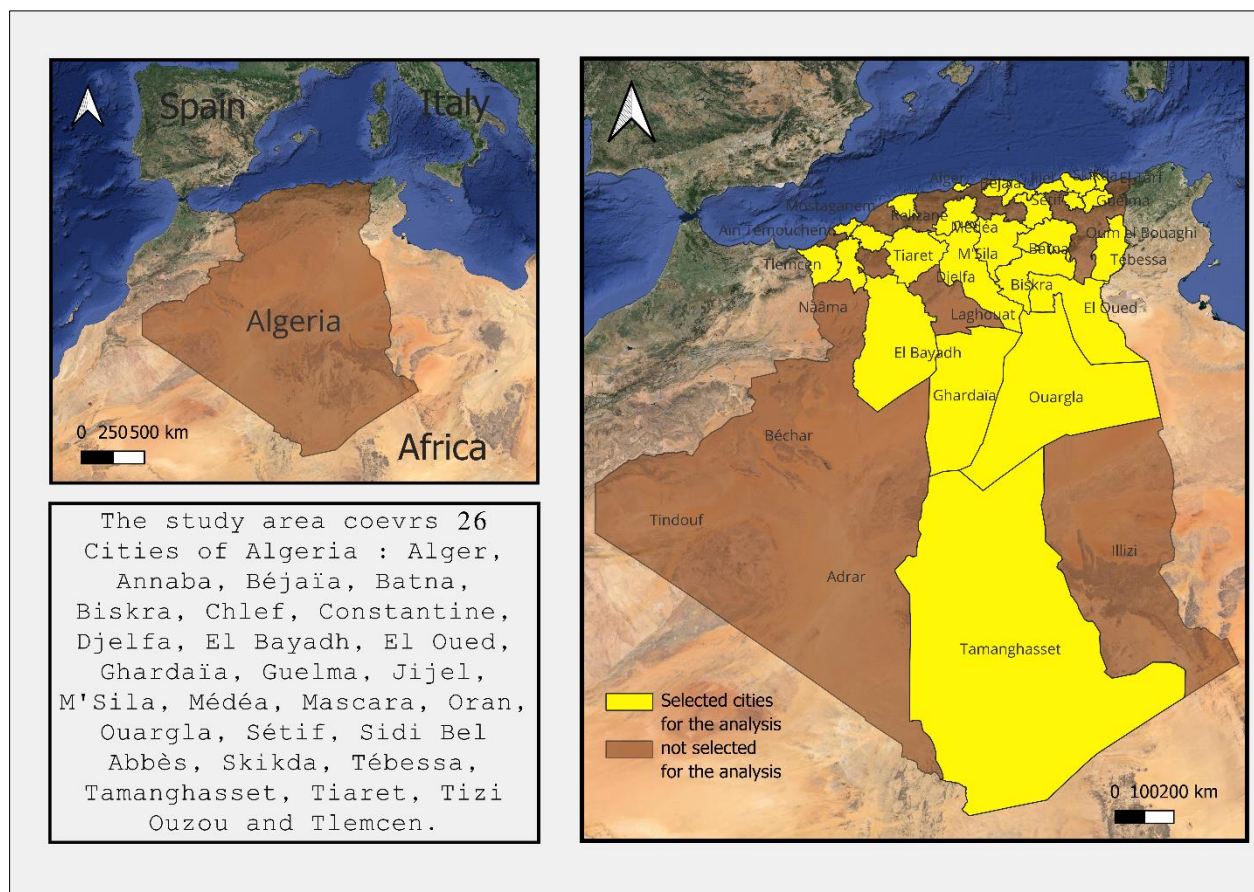


Figure 41 Localisation des Wilayas prises en compte pour l'analyse du Covid-19 et du Climat en Algérie. (QGIS)

IV.3.1.1.1 Géographie

Située au nord de l'Afrique, l'Algérie, avec une étendue de 2.381.741 km², est le plus grand pays du continent et de la région méditerranéenne. Sa position géostratégique lui confère un littoral méditerranéen de plus de 1.600 km, facilitant les échanges maritimes internationaux. La géographie de l'Algérie révèle une diversité régionale significative :

La région côtière et les plaines littorales du nord : Sous l'influence d'un climat méditerranéen favorable à l'agriculture, ces zones abritent les principales villes telles qu'Alger, Oran et Annaba.

L'Atlas Tellien : Cette chaîne montagneuse, traversant le pays d'ouest en est, joue un rôle crucial dans la régulation climatique, la rétention des eaux et le maintien de la biodiversité. Les massifs des Aurès et de Kabylie y culminent à des altitudes importantes.

Les Hautes Plaines : Situées après l'Atlas Tellien, ces plaines à climat semi-aride descendent progressivement vers la dépression du Hodna. Les steppes des Hautes Plaines oranaises et algéroises sont propices au pastoralisme.

Le Sahara algérien : Recouvrant environ 80% du territoire, ce vaste désert, avec ses conditions hostiles (températures extrêmes, dunes, regs), est riche en ressources naturelles, notamment en hydrocarbures. Les oasis de Tamanrasset et Illizi permettent la subsistance des populations nomades et semi-nomades.

Cette diversité géographique et bioclimatique influence fortement le climat, les ressources naturelles et les modes de vie en Algérie [182].

IV.3.1.1.2 Population

En 2024, la population de l'Algérie est estimée à environ 46,2 millions d'habitants, avec un taux de croissance démographique de 1,42% par an. La majorité de la population se concentre dans les grandes villes du nord, telles qu'Alger, Oran et Constantine, reflétant un taux d'urbanisation de près de 70%. Cette urbanisation rapide, alimentée par l'exode rural, pose des défis en termes d'étalement urbain, de logement et d'infrastructures [183].

IV.3.1.1.3 Climat

L'Algérie présente une grande diversité climatique due à sa vaste superficie et sa topographie variée. Le climat du pays se divise en deux grandes zones distinctes :

Le nord de l'Algérie : Cette région jouit d'un climat méditerranéen, avec des étés chauds et secs, où les températures atteignent souvent 30-35°C, et des hivers doux et pluvieux,

avec des températures moyennes autour de 10-15°C. Les précipitations annuelles varient entre 400 et 1000 mm, principalement durant l'hiver, grâce aux vents maritimes humides.

Le Sahara algérien : Dominé par un climat désertique, cette région, qui couvre environ 80% du territoire national, connaît des températures estivales souvent supérieures à 40°C et des hivers doux. Les précipitations y sont rares, souvent inférieures à 50 mm par an, rendant l'environnement extrêmement aride. Les écarts de température entre le jour et la nuit y sont également significatifs.

Entre ces deux zones principales, les Hauts Plateaux présentent des caractéristiques intermédiaires, avec des étés chauds et des hivers froids, souvent marqués par des gelées. Les précipitations y sont plus modérées par rapport au nord, oscillant entre 200 et 400 mm par an.

Depuis les années 1960, l'Algérie observe une augmentation générale des températures moyennes annuelles, avec un réchauffement d'environ 2,7°C par siècle. Les précipitations, bien que variables d'année en année, montrent une tendance à la baisse d'environ 12,4 mm par siècle. Cette variabilité climatique pose des défis uniques en matière de gestion des ressources en eau et de lutte contre la désertification, tout en nécessitant une adaptation aux impacts du changement climatique [184].

IV.3.1.2 Collecte de données

Pour cette partie de l'étude une base de données de 17672 observations de 17 variables relative au climat et à la maladie a été construite.

Les données épidémiologiques sur la Covid-19 collectées du site officiel de l'Institut National de Santé Publique (INSP). Cet institut a publié des bulletins quotidiens sur la situation épidémiologique du coronavirus en Algérie, du Bulletin N°1 du 18 avril 2020 au Bulletin N°268 du 27 mai 2022, les autorités responsables ont décrit et discuté la situation de l'épidémie aux niveaux local, régional et national dans les établissements de santé publique algériens.

Nous avons entrepris la collecte de données de 26 wilayas du 03 Mai 2020 au 31 mars 2022. Ces wilayas ont été sélectionnées de manière à couvrir l'ensemble du territoire algérien : Alger, Annaba, Bejaïa, Batna, Biskra, Chlef, Constantine, Djelfa, El Bayadh, El Oued, Ghardaïa, Guelma, Jijel, M'Sila, Médéa, Mascara, Oran, Ouargla, Sétif, Sidi Bel Abbès, Skikda, Tébessa, Tamanghasset, Tiaret, Tizi Ouzou et Tlemcen.

Les facteurs épidémiologiques étudiés pour chaque ville incluent : nouveaux cas (NC), cas cumulés (CC), nouveaux décès (ND), décès cumulés (D), taux d'incidence (IR), et taux de mortalité (MI) **[185]**.

En complément, les données climatiques ont été recueillies sur le site web [Tutiempo](#) pour les mêmes 26 wilayas à travers l'Algérie, couvrant la période du 3 mai 2020 au 31 mars 2022. Les différents facteurs climatiques utilisés dans notre étude sont : température minimum (MNT), température maximum (MXT), température moyenne (AT) en C°, humidité (HM) %, vitesse du vent (WS) Km/h et précipitation (RF) mm **[186]**. Les données démographiques de chaque ville ont été établies à partir du recensement réalisé par l'Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière (ANIREF) **[187]**.

IV.3.1.3 Analyse statistique

L'objectif de cette section est d'explorer de manière exhaustive la distribution et les tendances de la pandémie de Covid-19 à travers les différentes régions et vagues en Algérie, ainsi que d'examiner les variables climatiques pertinentes. Nous avons utilisé une approche descriptive pour fournir un aperçu approfondi des données, permettant de comprendre la répartition de la maladie et ses variations temporelles et spatiales. En parallèle, nous avons étudié des variables climatiques telles que la température, l'humidité, la vitesse du vent et les précipitations afin de déterminer leur impact potentiel sur la dynamique de la pandémie.

Pour approfondir notre compréhension des relations entre cet ensemble de variables, nous avons calculé le coefficient de corrélation de Spearman R_s qui est une mesure non paramétrique utilisée pour évaluer la force et la direction de la relation monotone entre

deux variables ordonnées. Contrairement au coefficient de Pearson, il n'est pas affecté par les valeurs extrêmes ou la non-normalité des données.

Les valeurs de R_s sont comprises entre -1 et 1, où -1 indique une forte corrélation négative, 1 une forte corrélation positive, et 0 l'absence de corrélation.

Le coefficient de Spearman est particulièrement approprié lorsque les données ne suivent pas une distribution normale, que la relation n'est pas linéaire, Il évalue la relation monotone sans faire d'hypothèse sur sa nature.

Le calcul de R_s est basé sur l'équation :

$$R_s = 1 - \left(6 * \sum d^2 \right) / (n * (n^2 - 1))$$

Où :

R_s = Coefficient de corrélation

$\sum d^2$ = somme des différences de rangs au carré

n = taille de l'échantillon

Le reste de l'équation avec les multiplicateurs 6 et $(n^2 - 1)$ est simplement un facteur d'ajustement mathématique pour produire un coefficient borné entre -1 et 1 **[188]**.

IV.3.2 Analyse de la Qualité de l'Air et de l'Impact du Confinement sur la Dynamique de la Covid-19 à Alger

IV.3.2.1 Zones d'Étude : Alger

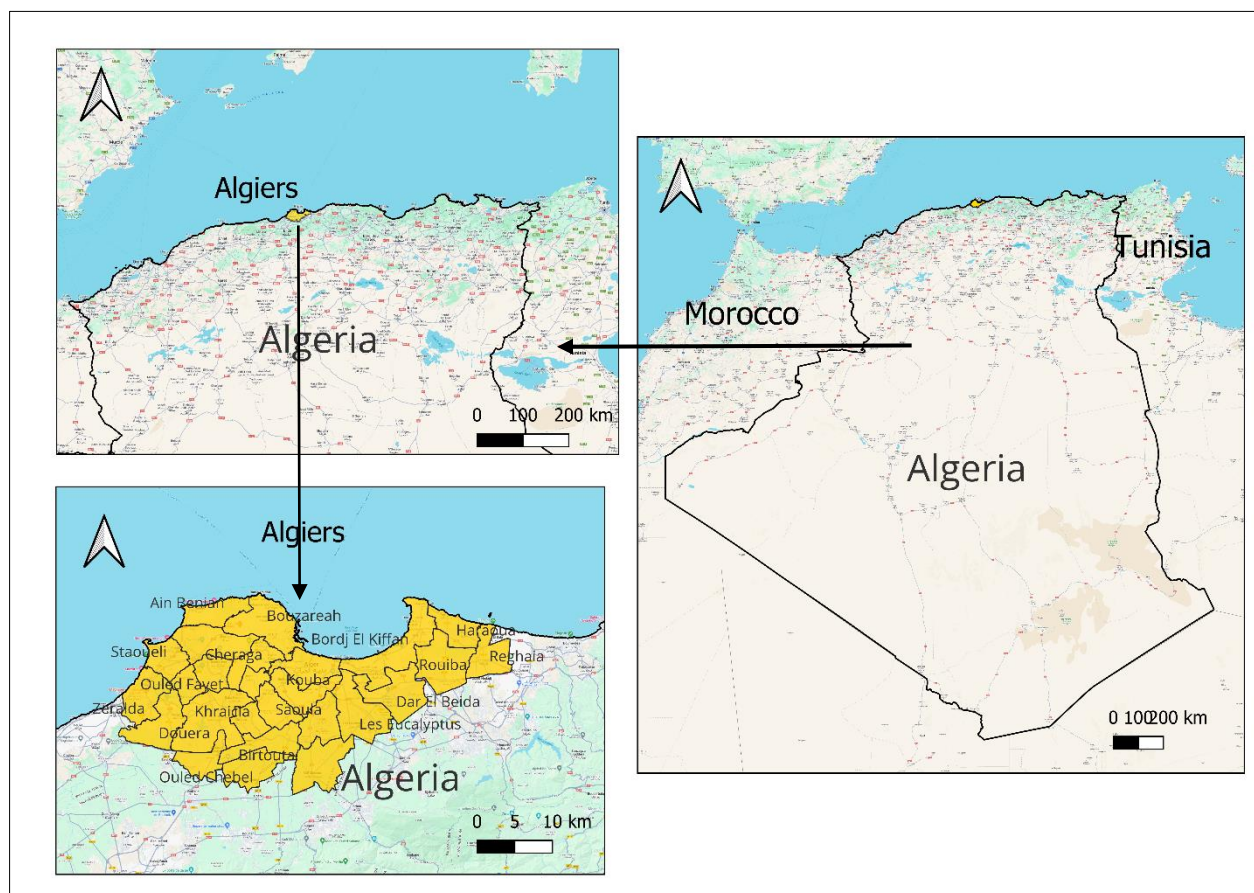


Figure 42 Localisation de la zone d'étude "Capitale Alger" (QGIS)

Alger, capitale d'Algérie, se trouve au centre du pays bordée par la mer Méditerranée au nord. Avec une superficie de 809 km², la ville comprend 57 municipalités, dont 19 sont situées le long de la côte. Sa position sur la côte méditerranéenne en fait un hub économique crucial. La ville se distingue par une forte densité de population et une urbanisation rapide [189]. Selon l'annuaire des statistiques de la wilaya d'Alger sa population est estimée à 3,3 millions en 2020 [187]. Une croissance démographique qui a entraîné une extension notable des zones urbaines. Le climat méditerranéen d'Alger, avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides, influence fortement les conditions locales. La qualité de l'air est un enjeu majeur en raison de la densité de la population et de l'urbanisation rapide, qui contribuent à des niveaux élevés de pollution

atmosphérique, notamment en particules fines (PM2.5). La pollution atmosphérique à Alger, est un problème majeur qui affecte la qualité de l'air dans la ville. Selon le Ministère de l'Environnement algérien [190]. Le trafic routier est identifié comme la principale source de pollution de l'air à Alger, contribuant de manière significative aux niveaux élevés de particules fines et de polluants atmosphériques. De plus, les études du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) [191] soulignent que les émissions industrielles non traitées ont également un impact négatif sur la qualité de l'air dans la région MENA, y compris à Alger. Ces sources de pollution combinées entraînent des concentrations de particules fines (PM10 et PM2.5) dépassant régulièrement les normes recommandées par l'OMS, ce qui a des conséquences directes sur la santé des habitants de la ville. Il est impératif de mettre en œuvre des mesures efficaces pour réduire les émissions polluantes, en particulier dans les secteurs du transport et de l'industrie, afin d'améliorer la qualité de l'air et de protéger la santé publique à Alger et dans toutes les villes d'Algérie en général.

IV.3.2.2 Collecte de données

La base de données pour cette partie de l'étude est composée de 694 observations de 6 variables.

⇒ **Données relatives à la pandémie de COVID-19**

Les données ont été obtenues à partir des publications et des bulletins périodiques de l'Institut National de Santé Publique d'Algérie (*INSP*). Les paramètres analysés incluent l'indice d'incidence, l'indice de mortalité.

⇒ **Données météorologiques**

Les données météorologiques de la ville d'Alger ont été extraites du site (*NASA POWER Data Access Viewer*) (consulté en novembre 2023). Les variables climatiques considérées dans cette étude sont : la température, la vitesse du vent, les précipitations et l'humidité [192].

⇒ **Données de la pollution de l'air 'AQI'**

« Air Quality Index » est un indice représentant le niveau quotidien de pollution atmosphérique. Il est calculé à partir des concentrations des cinq polluants principaux : l'ozone, les particules fines (PM2.5), les particules grossières (PM10), le monoxyde de carbone et le dioxyde d'azote. L'AQI est basé sur le polluant présentant la concentration la plus élevée ce jour-là. Il varie de 0 à 500 et est divisé en six catégories de "Bon" à "Dangereux" [193] Les données de l'IQA ont été fournies par IQAir, une organisation suisse spécialisée dans le monitoring de la qualité de l'air à l'échelle mondiale. Les données utilisées concernent l'indice de qualité de l'air basé sur la concentration de PM2.5, mesurée par la station de monitoring située à l'ambassade des États-Unis à Alger (Reçu en novembre 2023) [194].

IV.3.2.3 Analyse statistique

Une approche méthodologique a été employée pour étudier la distribution et les effets réciproques du polluant PM2.5 sur la pandémie (Incidence/mortalité), de plus une variable binaire « Confinement » a été ajoutée pour représenter le statut de confinement ou non confinement dans l'état algérien lors de la pandémie pour l'intégrer dans l'analyse et détecter la conséquence de cette dernière sur la propagation du virus et de la qualité de l'air dans la wilaya d'Alger.

IV.3.2.3.1 Normalisation des données de pollution de l'air

Avant tout, il est crucial de normaliser les données de qualité de l'air en fonction des conditions météorologiques pour supprimer les fluctuations des concentrations de polluants et de permettre une exploration solide des tendances et des impacts des interventions dans le contexte de cette étude [195]. Le package 'Rmweather' a été utilisé pour normaliser les données de qualité de l'air en fonction des données météorologiques (température, vitesse et direction du vent, précipitations, humidité et pression). C'est une technique qui utilise des modèles de forêts aléatoires pour prédire les concentrations dans des conditions météorologiques "moyennes", éliminant ainsi les effets des conditions météorologiques variables [196]. Cela permet une meilleure compréhension des impacts

environnementaux et sanitaires liés à la pollution atmosphérique. En résultats nous auront deux variables représentatifs des facteurs atmosphériques (***AQI_predict*** et ***PM2.5_predict***) Ces variables représentent les variables indépendantes qui seront utilisées pour l'analyse de régression multiple.

IV.3.2.3.2 Calcul du nombre de reproduction effectif (R)

L'étape suivante consiste à estimer **le nombre de reproduction effectif $R(t)$** à partir des cas cumulés. Pour ce faire, on utilise le package 'estimateR'. Cette fonction permet de calculer $R(t)$ à partir de données corrélées dans le temps, en tenant compte des délais entre l'infection et l'observation des cas ainsi que de l'intervalle de série c'est-à-dire le délai entre l'apparition des symptômes chez un cas primaire (personne infectée) et l'apparition des symptômes chez les cas secondaires qu'il a lui-même infectés. Les principaux paramètres à spécifier sont la distribution des périodes d'incubation et de délai avant notification des cas, l'intervalle de série moyen et son écart-type, ainsi que la méthode d'estimation souhaitée. Le résultat est une estimation du nombre de reproduction effectif $R(t)$ au cours du temps, stockée dans la variable (***Re_estimate***). Cette variable représente la variable dépendante qui sera utilisée pour l'analyse de régression multiple [197].

IV.3.2.3.3 Régression linéaire multiple avec simulation Monte-Carlo

La dernière étape consiste à exécuter des simulations répétées en générant des valeurs aléatoires pour la variable dépendante (*Re_estimate*) afin de réaliser une régression linéaire multiple avec les deux variables indépendantes (*AQI_predict* et *PM2.5_predict*). Nous intégrerons une simulation Monte-Carlo pour générer des valeurs aléatoires dans un intervalle de confiance de 95%.

Les simulations consistent à tirer aléatoirement 10000 valeurs pour *Re_estimate* selon une distribution prédéfinie, tout en utilisant les valeurs réelles des deux variables indépendantes. En collectant un nombre suffisant de résultats, nous constituerons un échantillon représentatif de toutes les combinaisons possibles.

Cette approche par simulation Monte-Carlo permet d'obtenir une distribution des valeurs probables pour la variable dépendante, plutôt qu'une seule valeur fixe. Elle offre ainsi une meilleure compréhension de l'incertitude et des risques associés au modèle de régression linéaire multiple.

Équation représentative de la Simulation Monte-Carlo dans le contexte de la Régression Linéaire Multiple :

La régression linéaire multiple est représentée par l'équation suivante :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \epsilon$$

Où :

Y est la variable dépendante, β_0 est l'ordonnée à l'origine, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ sont les coefficients des variables indépendantes X_1, X_2, \dots, X_p et ϵ est le terme d'erreur [198].

Dans notre cas la simulation de Monte-Carlo consiste à générer des valeurs aléatoires pour la variable dépendante $Re_estimate$ dans le modèle afin de quantifier l'incertitude dans les prédictions. Le travail de **Bonate, 2001** décrit cette méthode en utilisant des distributions probabilistes pour générer des valeurs de simulation. L'équation représentative dans le contexte de notre analyse est formulée comme suit :

$$\text{Simulated } Re_estimate_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot AQI_predict_i + \beta_2 \cdot PM2.5_predict_i + \epsilon_i$$

Où

ϵ_i est un terme d'erreur aléatoire tiré d'une distribution normale $N(0, \sigma^2)$, dans notre cas on **répète le processus** pour 10000 simulations afin de générer une distribution de valeurs possibles pour $Re_estimate$ pour alimenter notre équation de régression linéaire multiple. [199].

Toutes les analyses statistiques de ce travail ont été effectuées à l'aide des logiciels **RStudio et Spyder**.

IV.4 Résultats

IV.4.1 Distribution spatio-temporelle des variables climatiques en Algérie 2020-2022.

IV.4.1.1 Les températures

Les cartes ci-dessous illustrent la répartition des variables climatiques à travers les 26 wilayas d'Algérie qui constituent notre base de données pour les années 2020, 2021 et début 2022.

IV.4.1.1.1 Température maximale

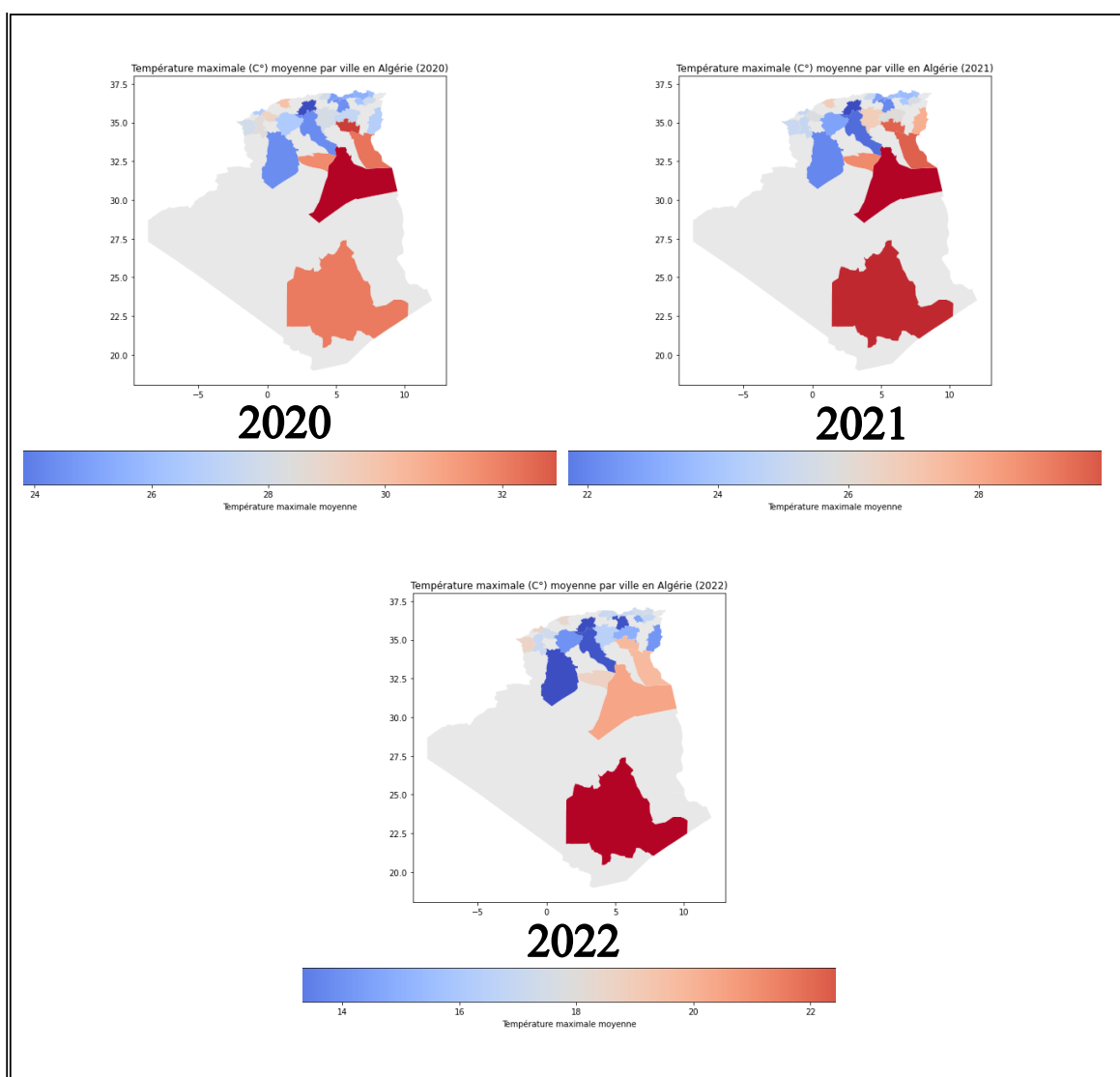


Figure 43 Distribution des températures maximale (C°) dans les villes d'Algérie 2020-2022

En 2020, la température maximale enregistrée varie entre 20°C et 36°C. Les villes les plus touchées par les températures élevées sont celles du sud et du centre-est du pays. En revanche, les villes du nord et du centre-ouest enregistrent des températures plus faibles, oscillant entre 24°C et 28°C.

En 2021, les températures maximales enregistrées sont comprises entre 22°C et 30°C. Les villes les plus chaudes demeurent celles du sud et du centre-est du pays. On observe également une hausse des températures dans les villes du nord-est, tandis que les villes du nord-ouest connaissent un léger refroidissement.

En 2022, les données disponibles pour les trois premiers mois de l'année montrent des températures maximales variant de 14°C à 22°C. Les températures les plus élevées sont enregistrées dans le sud, tandis que les villes du nord affichent des températures allant de 18°C à 22°C (**Figure 43**).

IV.4.1.1.2 Température minimale

En 2020, les températures minimales enregistrées varient entre 10°C et 22°C. Les villes du sud, en raison de leur climat désertique, ainsi que certaines villes côtières de la Méditerranée, enregistrent des températures minimales plus élevées. En revanche, les villes situées dans les hauts plateaux du centre du pays affichent des températures plus basses. En 2021, les températures minimales varient de 9°C à 27°C. Cette année-là, les températures sont généralement supérieures à 16°C ou 18°C dans le sud. Les villes du nord, notamment celles situées dans les hauts plateaux, enregistrent des températures comprises entre 10°C et 16°C. Cependant, Biskra se distingue avec une température minimale moyenne élevée de 26°C. En 2022, bien que les données ne couvrent que les trois premiers mois de l'année, les tendances montrent des températures minimales particulièrement basses, variant de 2°C à 6°C. Biskra continue de se démarquer avec une température minimale moyenne de 10°C. Annaba enregistre un pic inhabituel avec des températures minimales dépassant 14°C, et Skikda, ville frontalière d'Annaba, affiche également des températures minimales de 12°C (**Figure 44**).

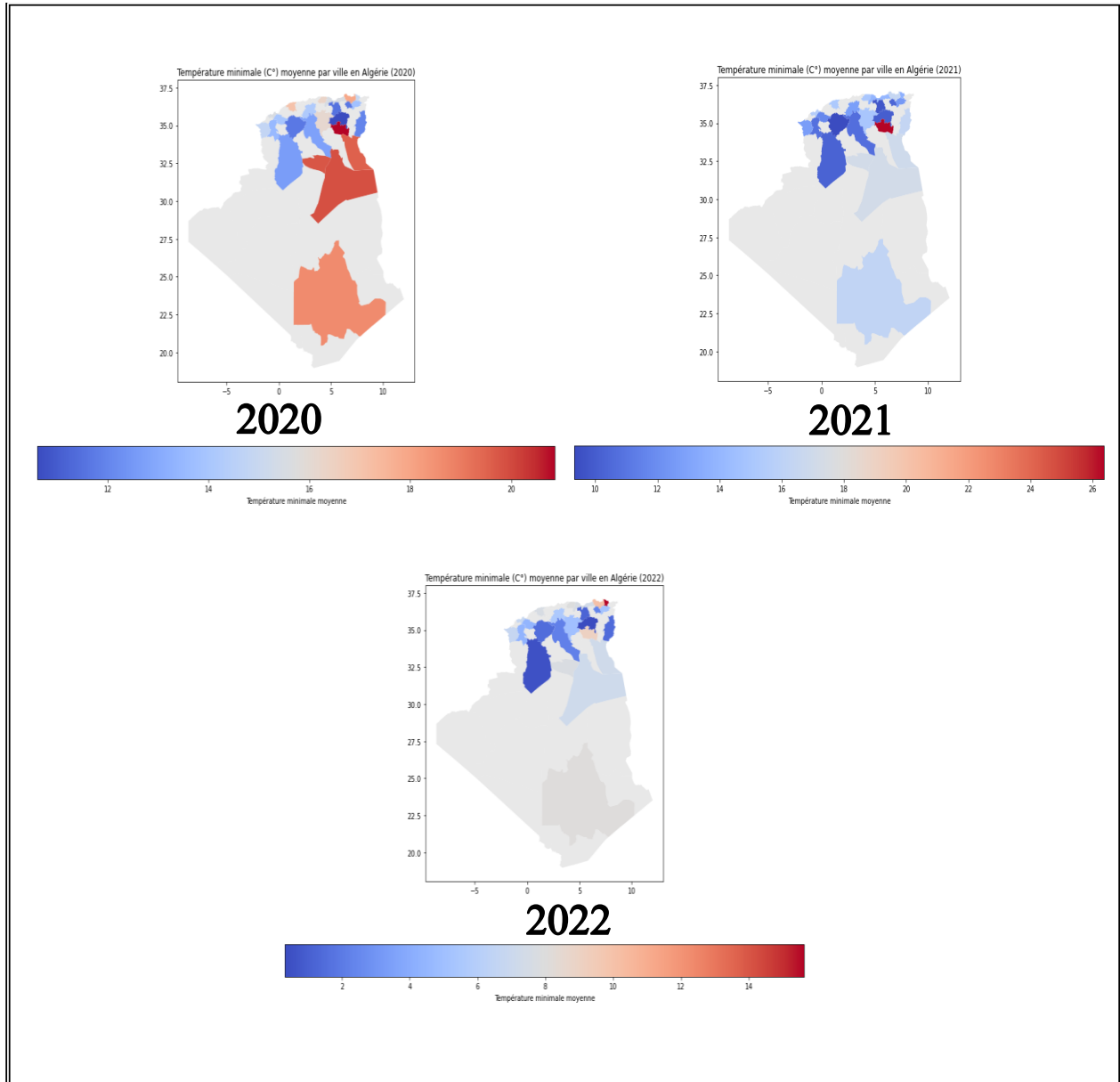


Figure 44 Distribution des températures minimales (C°) en Algérie 2020-2022

IV.4.1.1.3 Températures moyennes

En 2020, la température moyenne se situe entre 10°C et 30°C. Les villes les plus chaudes sont celles du centre et du désert, tandis que les villes du nord enregistrent des températures faibles à modérées. En 2021, l'année suivant la pandémie de Covid-19 et les confinements, nous remarquons une légère augmentation des températures dans les régions du sud, avec un refroidissement de quelques degrés en allant vers le nord. En 2022, bien que seules les températures des trois premiers mois aient été monitorées,

certaines villes du nord comme Skikda et Oran affichent des températures supérieures à 16°C. Ces valeurs sont caractéristiques de régions désertiques, ce qui est inhabituel pour cette saison (**Figure 45**).

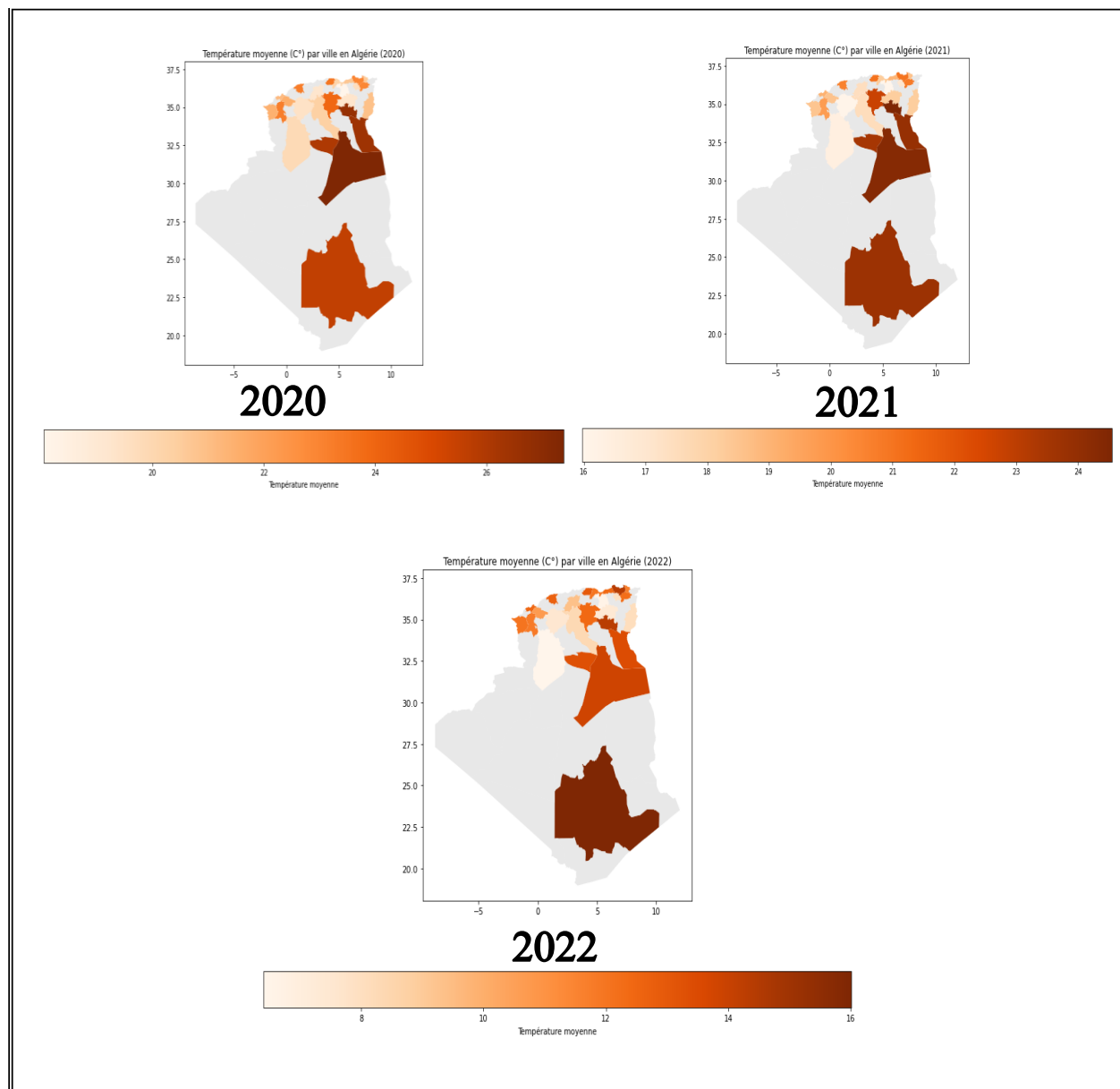


Figure 45 Distribution des températures moyennes(C°) en Algérie 2020-2022

IV.4.1.2 Précipitations

En 2020, les précipitations enregistrées varient de 0 à 3 millimètres de moyenne annuelle. Les villes côtières du nord-est, telles qu'Annaba, Skikda, Jijel et Béjaïa, ont enregistré les

plus fortes quantités de précipitations. Les villes des hauts plateaux ont enregistré des précipitations moyennes de 1 millimètre, tandis que les régions du sud ont enregistré moins de 0,5 millimètre. En 2021, les précipitations varient de 0,25 à 2 millimètres de moyenne annuelle. Les villes les plus riches en précipitations restent celles du nord-est, ainsi que des hauts plateaux. Les régions du sud, enregistrent des précipitations inférieures à 0,5 millimètre.

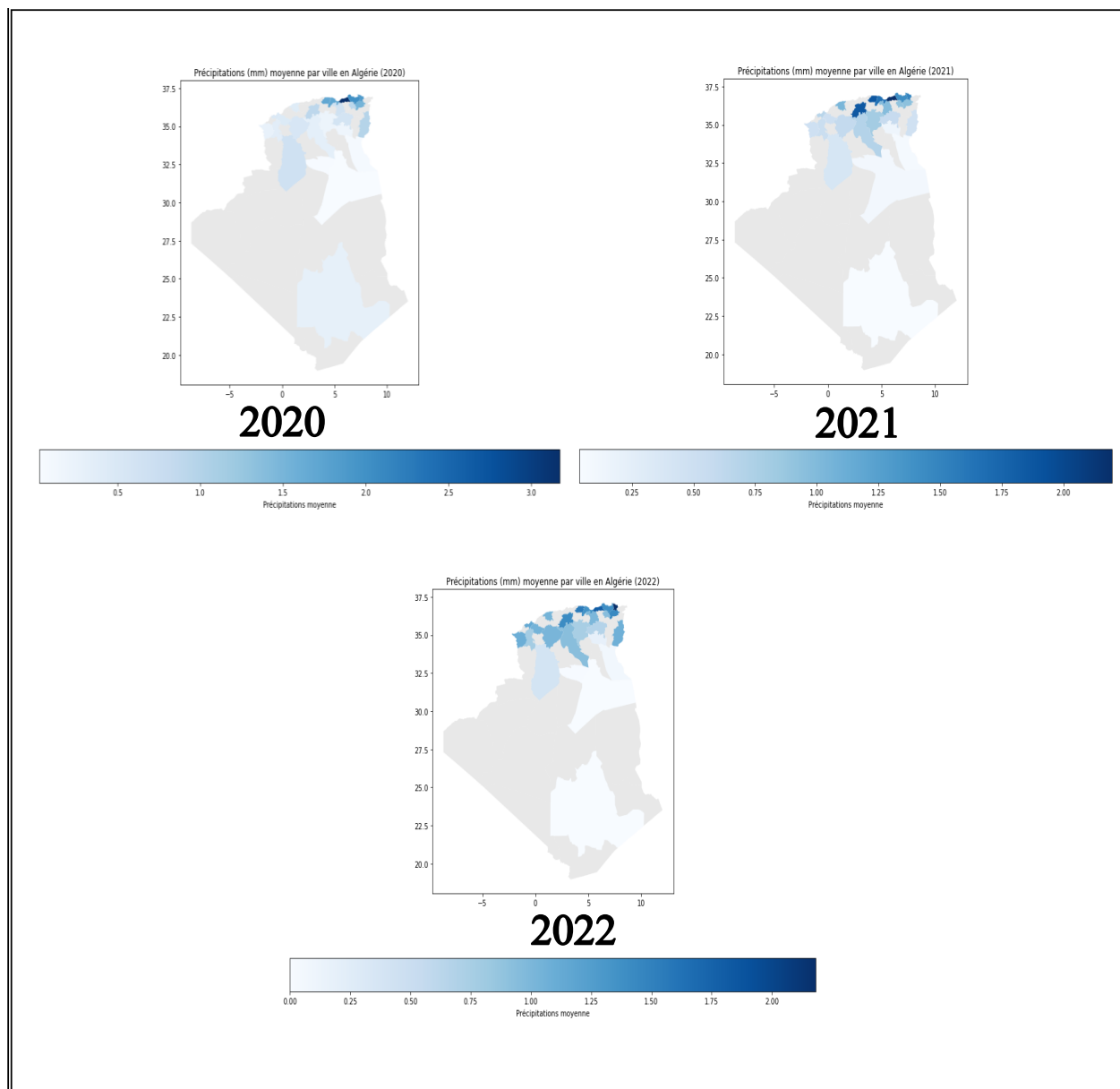


Figure 46 Distribution des précipitations (mm) en Algérie 2020-2022

En 2022, pendant les trois premiers mois de l'année, les précipitations varient de 0 à 2 millimètres ou plus. Les villes du nord-est, de l'ouest, et des hauts plateaux ont été les plus touchées par les précipitations. Les régions du sud, quant à elles, restent sous le seuil de 0,25 millimètre. **(Figure 46)**

IV.4.1.3 Humidité

En examinant les données d'humidité pour les années 2020, 2021 et 2022, plusieurs tendances intéressantes émergent. En 2020, nous avons observé une variation significative de l'humidité, allant de 20% à 70%. Les régions du Sud et de l'extrême Sud ont enregistré des niveaux inférieurs à 20%, tandis que les zones plus au Nord ont connu une augmentation, atteignant jusqu'à 30%. Sur les hauts plateaux, l'humidité s'est maintenue principalement entre 40% et 50%. Les villes côtières ont enregistré des taux extrêmes, dépassant parfois les 70%, notamment dans les régions nord-est telles qu'Annaba, Skikda, Béjaïa et Jijel.

En 2021, les tendances ont persisté, avec des niveaux d'humidité généralement similaires dans le Sud, oscillant entre 30% et 40%, tandis que les hauts plateaux ont commencé à enregistrer des valeurs légèrement plus élevées, atteignant jusqu'à 60%. Les villes côtières du Nord ont également connu une augmentation, avec des valeurs extrêmes observées à la fois dans le Nord-Est et l'extrême Ouest du pays.

Les premiers mois de 2022 ont été marqués par une stabilité relative dans les régions désertiques, avec des niveaux d'humidité restant autour de 20%. Les régions du centre-sud, caractérisées par un climat aride, ont enregistré des taux de 30% à 50%. En revanche, les hauts plateaux et les régions côtières ont connu des niveaux élevés, allant de 60% à 80%. Cette tendance peut être attribuée à la pluviométrie habituellement plus élevée pendant les premiers mois de l'année, mais elle pourrait également refléter un changement climatique dans la région nord de l'Algérie. **(Figure 47)**

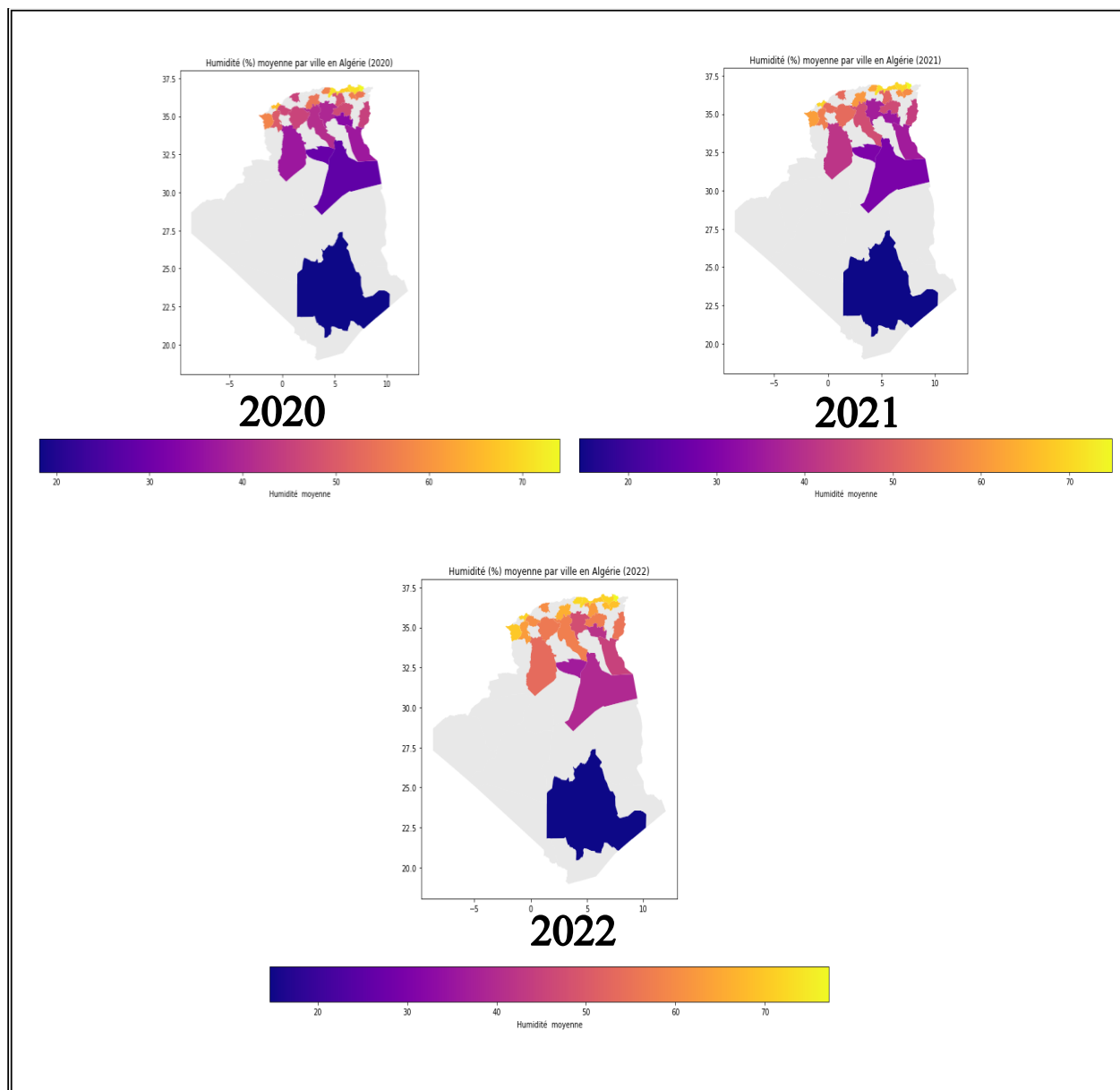


Figure 47 Distribution de l'Humidité (%) en Algérie 2020-2022

IV.4.1.4 Vitesse du vent

Les données de vitesse du vent pour les années 2020, 2021 et 2022 révèlent des variations intéressantes à travers les différentes régions. En 2020, les moyennes enregistrées variaient de 4 à 18 km/h. Les régions côtières ont enregistré des vitesses plus élevées, tandis que dans les hauts plateaux, les vitesses se sont maintenues entre 8 et 14 km/h. En 2021, l'intervalle de vitesse s'est élargi, allant de 8 à 24 km/h. La plupart des villes ont enregistré des vitesses inférieures à 14 km/h, à l'exception notable de Biskra

et El Bayadh, qui ont enregistré des valeurs élevées de 18 à 24 km/h. En 2022, la tendance s'est maintenue sur l'ensemble du territoire, avec des vitesses oscillant entre 7 et 28 km/h. Notamment, la ville d'Oran a enregistré un pic maximum de vitesse moyenne avec 28 km/h cette année. **(Figure 48)**

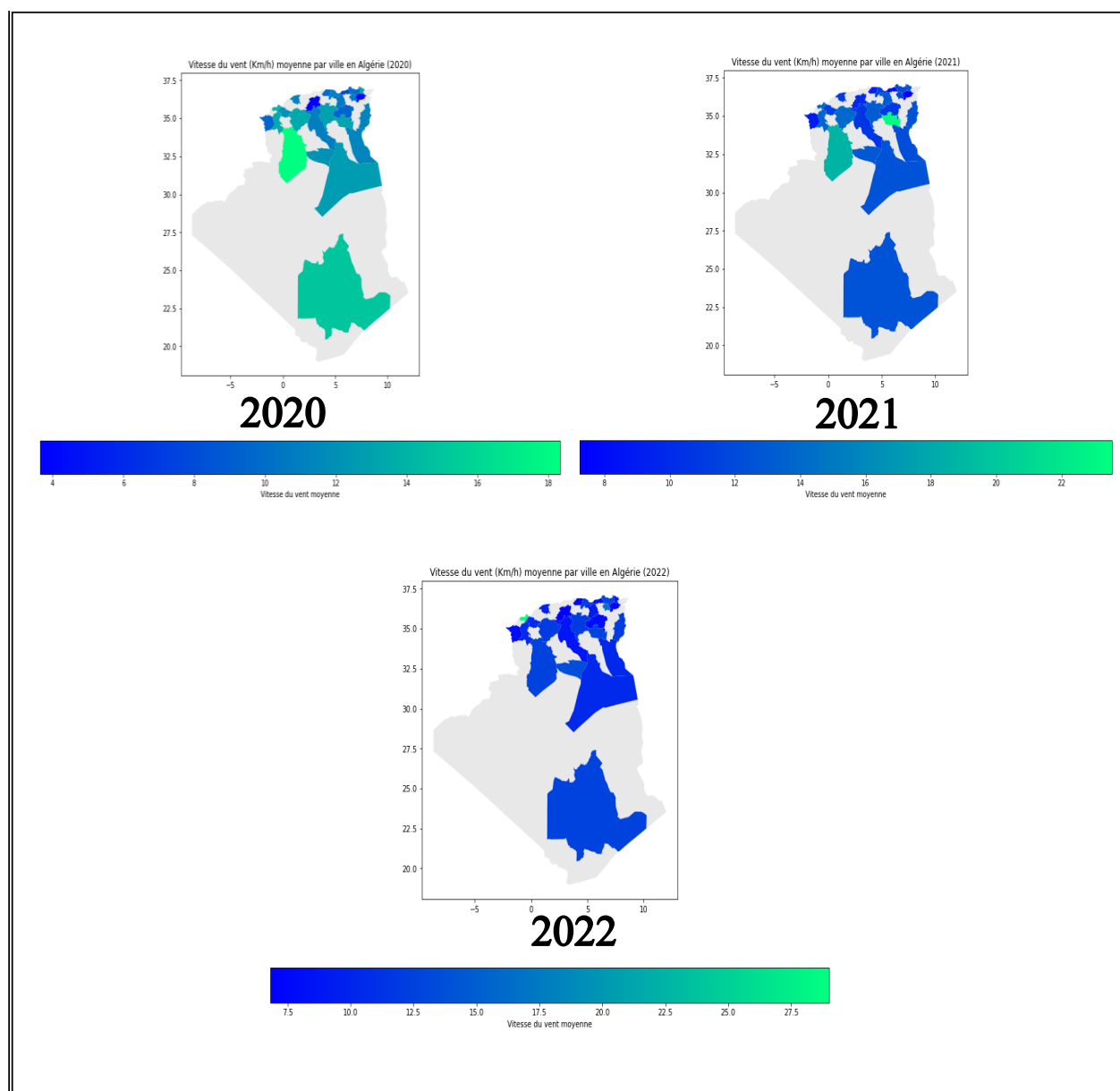


Figure 48 Distribution de la vitesse du vent (Km/h) en Algérie 2020-2022

IV.4.2 Distribution spatio-temporelle des variables épidémiologiques

IV.4.2.1 Cas cumulés du Covid-19

La **Figure 49** présente une classification descendante des villes enregistrant le plus grand nombre de cas jusqu'au 31 mars 2022. Alger occupe la première place avec 46 715 cas, suivie par Oran et Batna. Cette classification témoigne de l'importance de la démographie régionale, car ces trois villes sont parmi les plus peuplées d'Algérie. D'autre part, des villes comme Tamanghasset, El Bayadh et Ghardaïa ont enregistré moins de cas. Cette situation pourrait s'expliquer par le fait que ces régions sont situées plus au sud et moins fréquentées que les grandes villes. Cependant, cela pourrait également être lié à d'autres facteurs environnementaux, tels que le climat désertique de ces régions, ou encore aux modes et à la qualité de vie des populations locales.

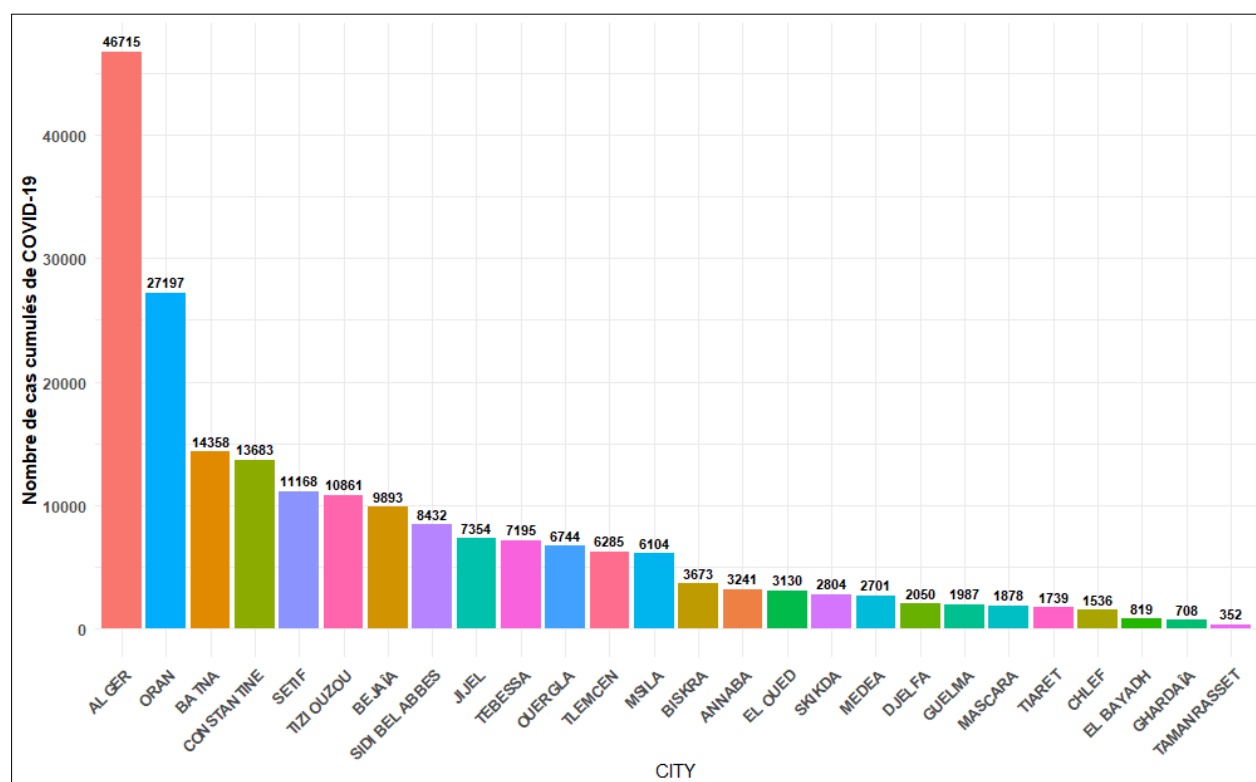


Figure 49 Nombre de cas cumulés de COVID-19 dans 26 villes d'Algérie 2020-2022

IV.4.2.2 Décès cumulés du Covid-19

La **Figure 50** présente une classification descendante des décès cumulés dans les villes d'Algérie. Alger a été la ville qui a enregistré le plus de décès, suivie de Tizi Ouzou et Sétif. Ceci démontre que le nombre élevé de cas ne signifie pas nécessairement un nombre élevé de décès lors d'une épidémie. Au contraire, certaines régions parviennent mieux à contrôler la propagation d'une épidémie en raison d'un meilleur système de santé, une immunité développée de la population, des conditions climatiques moins favorables ou d'une pollution moins prédominante.

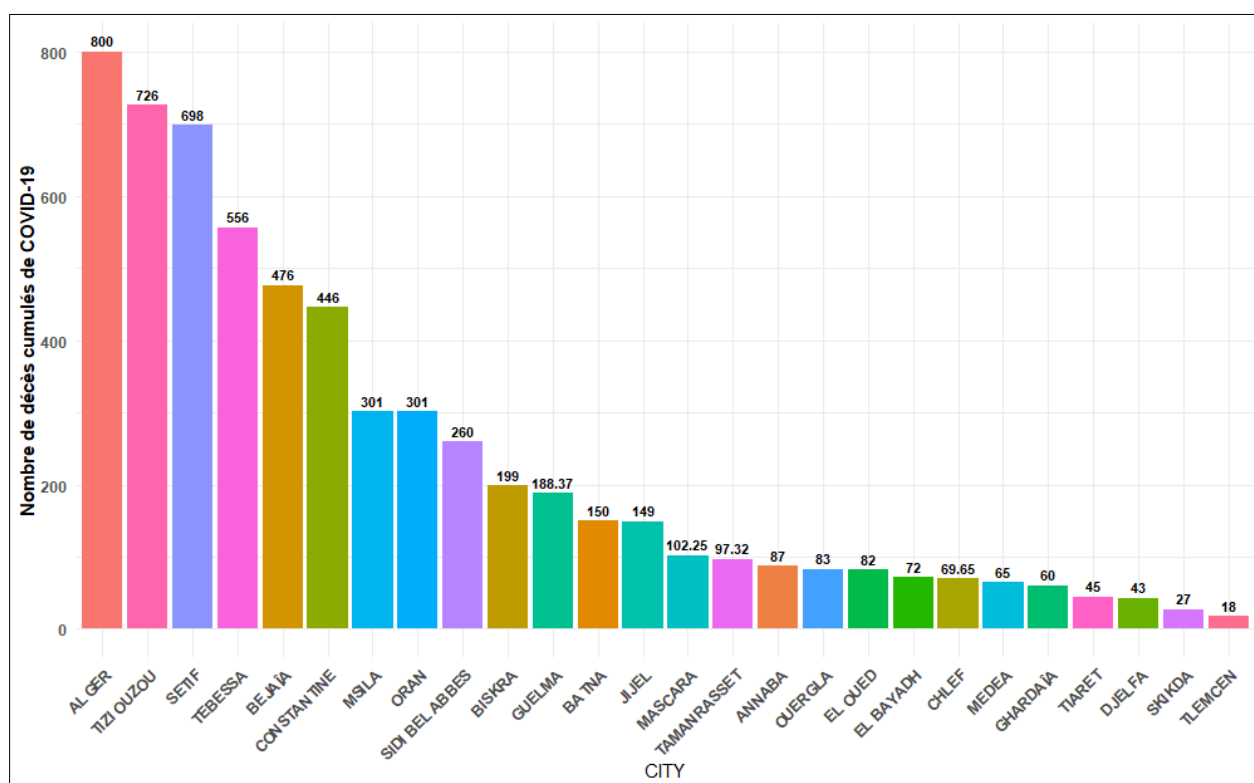


Figure 50 Nombre de décès cumulés de covid-19 dans 26 villes d'Algérie 2020-2022

IV.4.3 Corrélation entre Climat et Covid-19 en Algérie

La **Table 14** représente un résumé des analyse de corrélation entre les variables épidémiologiques '**NC**' Nouveau cas, '**ND**' Nouveau décès, '**IR**' Taux d'incidence, '**MR**' Taux de mortalité et les variables climatiques '**AT**' Température moyenne (C°), '**MXT**'

Température maximale (C°), **'MNT'** Température minimale (C°), **'RF'** Précipitation (mm), **'HM'** Humidité(%), **'WS'** Vitesse du vent (Km/h).

Les résultats montrent une corrélation positive et statistiquement significative entre l'incidence de la COVID-19 et l'humidité. On observe également une faible corrélation négative, statistiquement significative, entre le taux d'incidence et les variables de température et de vitesse du vent. Quant aux précipitations, elles affichent une valeur p non significative, ce qui nous amène à écarter cette variable des effets potentiels sur la propagation de la maladie dans ces régions.

Table 14 Correlation entre les variables climatiques et épidémiologiques de 26 villes d'Algérie

| | <i>NC</i> | <i>ND</i> | <i>IR</i> | <i>MR</i> | <i>AT</i> | <i>MXT</i> | <i>MNT</i> | <i>RF</i> | <i>HM</i> | <i>WS</i> |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|
| <i>NC</i> | | | | | | | | | | |
| <i>ND</i> | 0.303 (<i><.001</i>) | | | | | | | | | |
| <i>IR</i> | 0.306 (<i><.001</i>) | 0.173 (<i><.001</i>) | | | | | | | | |
| <i>MR</i> | 0.218 (<i><.001</i>) | 0.272 (<i><.001</i>) | 0.784 (<i><.001</i>) | | | | | | | |
| <i>AT</i> | 0.080 (<i><.001</i>) | 0.078 (<i><.001</i>) | -0.282 (<i><.001</i>) | -0.182 (<i><.001</i>) | | | | | | |
| <i>MXT</i> | 0.055 (<i><.001</i>) | 0.056 (<i><.001</i>) | -0.284 (<i><.001</i>) | -0.192 (<i><.001</i>) | 0.964 (<i><.001</i>) | | | | | |
| <i>MNT</i> | 0.115 (<i><.001</i>) | 0.103 (<i><.001</i>) | -0.221 (<i><.001</i>) | -0.148 (<i><.001</i>) | 0.939 (<i><.001</i>) | 0.851 (<i><.001</i>) | | | | |
| <i>RF</i> | 0.009 (.245) | 0.009 (.234) | 0.119 (<i><.001</i>) | 0.081 (<i><.001</i>) | -0.269 (<i><.001</i>) | -0.326 (<i><.001</i>) | -0.162 (<i><.001</i>) | | | |
| <i>HM</i> | 0.164 (<i><.001</i>) | 0.086 (<i><.001</i>) | 0.277 (<i><.001</i>) | 0.125 (<i><.001</i>) | -0.543 (<i><.001</i>) | -0.626 (<i><.001</i>) | -0.363 (<i><.001</i>) | 0.397 (<i><.001</i>) | | |
| <i>WS</i> | -0.087 (<i><.001</i>) | -0.033 (<i><.001</i>) | -0.101 (<i><.001</i>) | -0.039 (<i><.001</i>) | 0.134 (<i><.001</i>) | 0.105 (<i><.001</i>) | 0.178 (<i><.001</i>) | 0.057 (<i><.001</i>) | -0.175 (<i><.001</i>) | |

Computed correlation used spearman-method with listwise-deletion.

IV.4.4 Analyse de l'effet de la Qualité de l'air et du confinement sur la Pandémie Covid-19 à Alger.

IV.4.4.1 Paramètres climatiques de la ville d'Alger

IV.4.4.1.1 Les températures

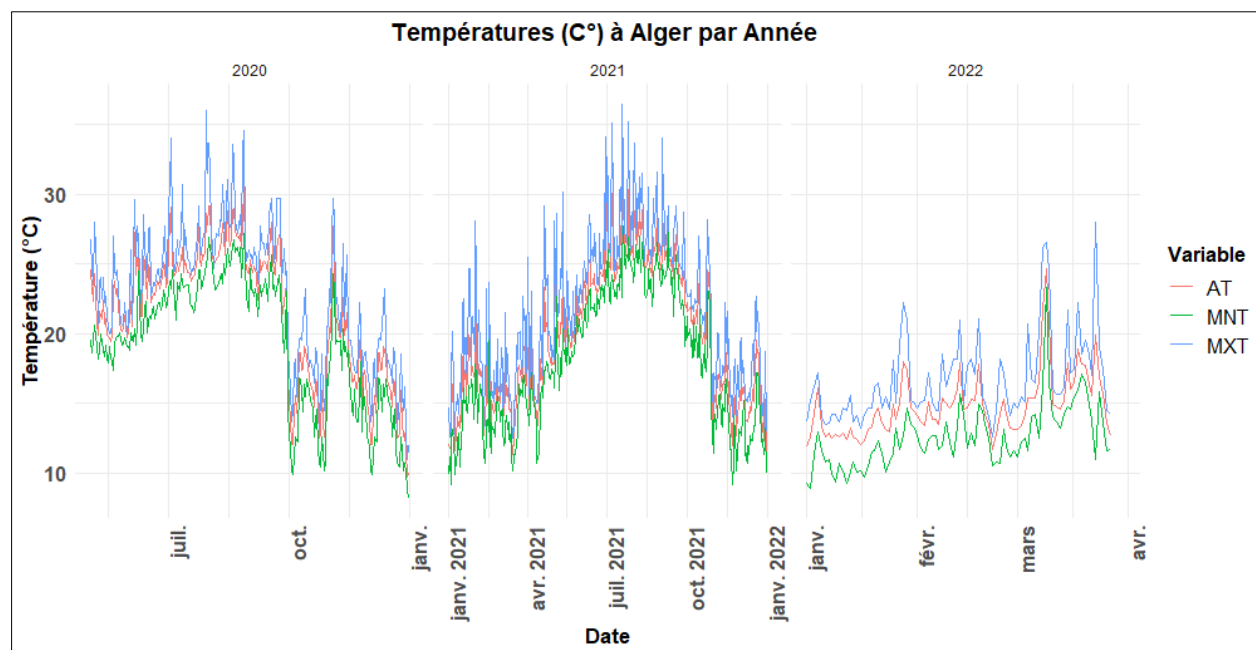


Figure 51 Températures (C°) à Alger par Année 2020-2022

Les variables climatiques représentatives de la ville d'Alger sont illustrées dans les **Figures 51 à 54**. Les tendances de température sont stables sur la période d'étude, oscillant entre 9°C et 37°C. La température maximale a observé une augmentation en 2021, avec plusieurs vagues de chaleur et des pics notifiés tout au long de l'année, dès janvier, atteignant un sommet en août, puis diminuant complètement début octobre (**Figure 51**).

IV.4.4.1.2 Précipitations

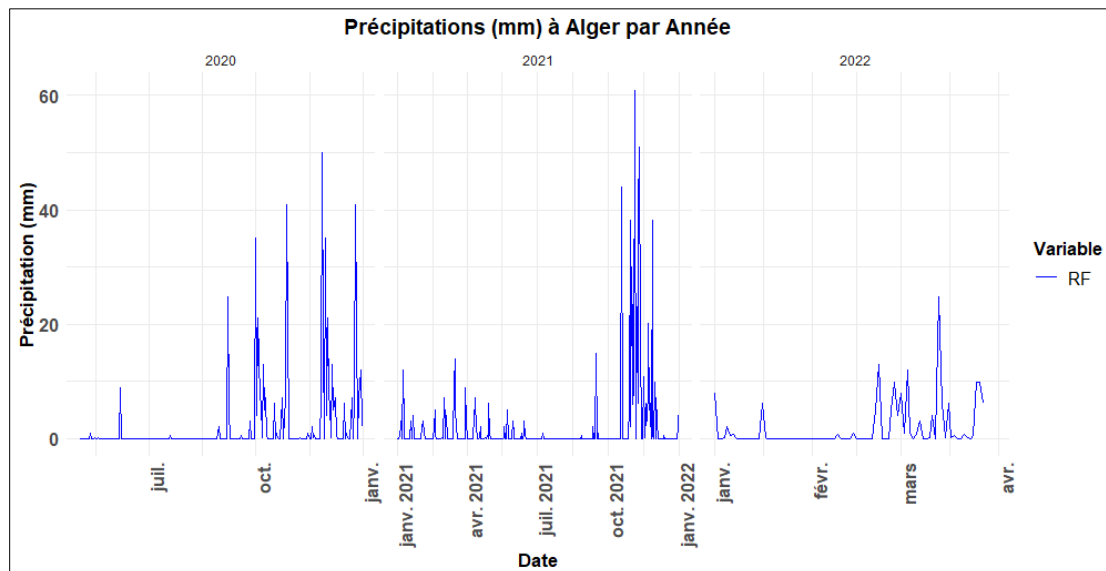


Figure 52 Précipitations (mm) à Alger par Année 2020-2022

Les précipitations sont plus abondantes en automne, avec des valeurs minimales enregistrées entre 0 et 10 mm et des maxima atteignant 50 à 60 mm (**Figure 52**).

IV.4.4.1.3 Humidité

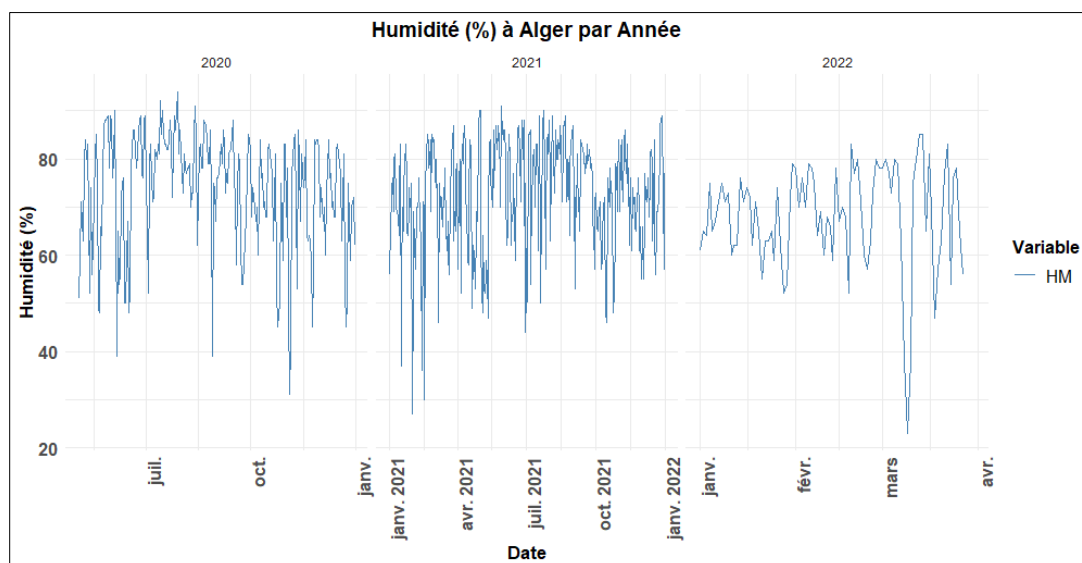


Figure 53 Humidité à Alger par Année 2020-2022

L'humidité est le paramètre climatique le plus stable qui varie de 10 % à 80 %, bien qu'elle puisse atteindre des records de plus de 90 % comme observé en 2020 (**Figure 53**).

IV.4.4.1.4 Vitesse du vent

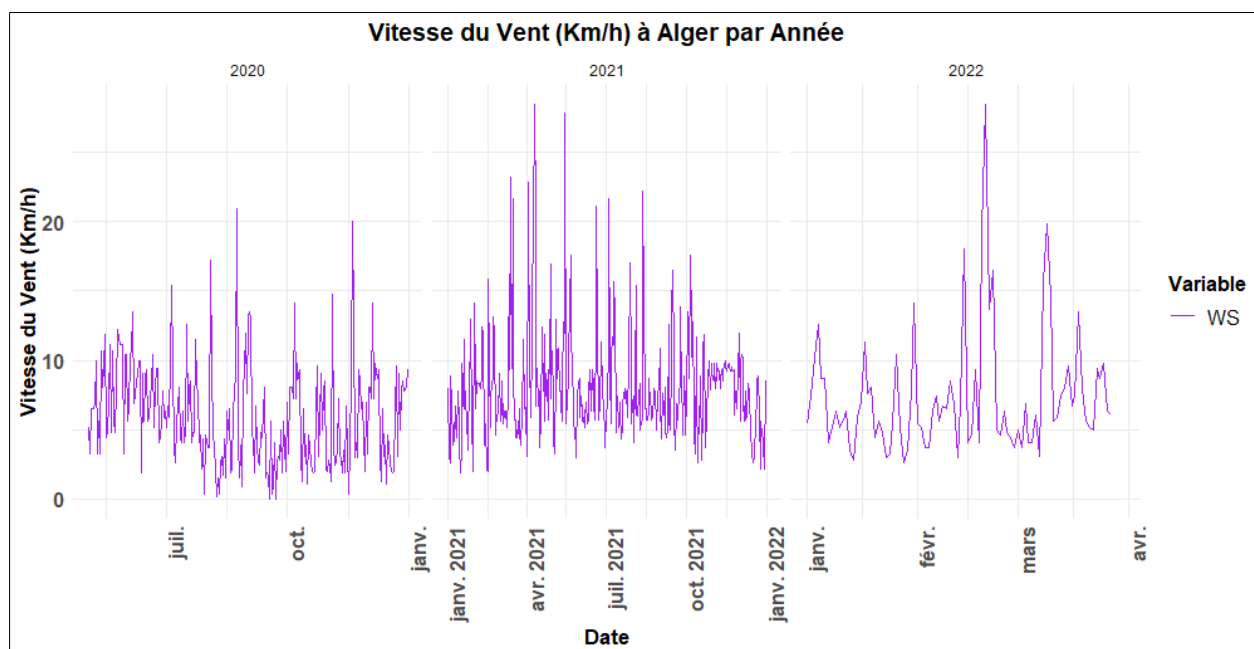


Figure 54 Vitesse du Vent à Alger par Année 2020-2022

La vitesse du vent est généralement modérée, variant de 0 à 20 km/h, mais a atteint des pics de 30 à 35 km/h en 2021 et au début de 2022 (**Figure 54**).

IV.4.4.2 Paramètres de pollution atmosphérique de la ville d'Alger

IV.4.4.2.1 Statistiques récapitulatives

Le **Table 15** représente la distribution des valeurs des paramètres polluants enregistrés au niveau d'Alger de Mai 2020 à Mars 2022.

Table 15 Statistiques récapitulatives des paramètres de pollution atmosphériques

| Paramètre | Indice de Qualité de l'air (AQI) | Les particules fines (PM _{2.5} µg/m ³) |
|----------------|----------------------------------|---|
| Valeur minimal | 63.96 | 18.50 |
| Moyenne | 65.92 | 19.07 |
| Valeur maximum | 67.88 | 19.78 |

Les catégories de conversion des taux de l'indice de qualité de l'air (AQI) se situent dans une plage comprise entre 60 et 70 et de 18 à 20 pour le polluant (PM_{2.5}). Ces valeurs indiquent que la catégorie AQI pour la ville d'Alger sur cette période est classée comme « Modérée ».

IV.4.4.2.2 Distribution temporelle de l'indice de qualité de l'air et PM_{2.5}

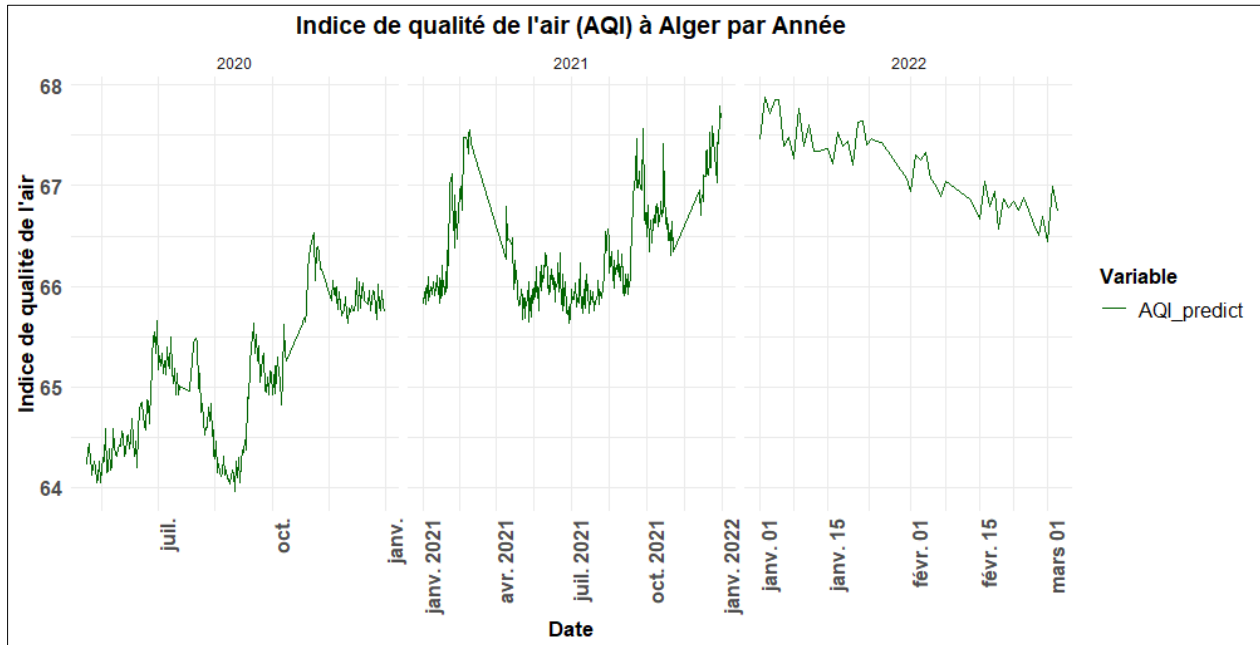


Figure 55 *Indice de qualité de l'air (AQI) à Alger par Année 2020-2022*

Les **Figures 55 et 56** représente la distribution des concentrations des polluant normalisés à Alger sur trois périodes spécifique à la pandémie Covid-19 et les différentes périodes de confinement en Algérie, les graphes montrent une tendance à l'augmentation dans le AQI et le (PM_{2.5} µg/m³) en 2021, effectivement l'année 2021 a été sujette à une grande restriction régional et national de confinement pour limiter la propagation de la maladie ceci pourrait fortement expliquer cette hausse flagrante dans les concentration des polluants atmosphérique de la ville d'Alger.

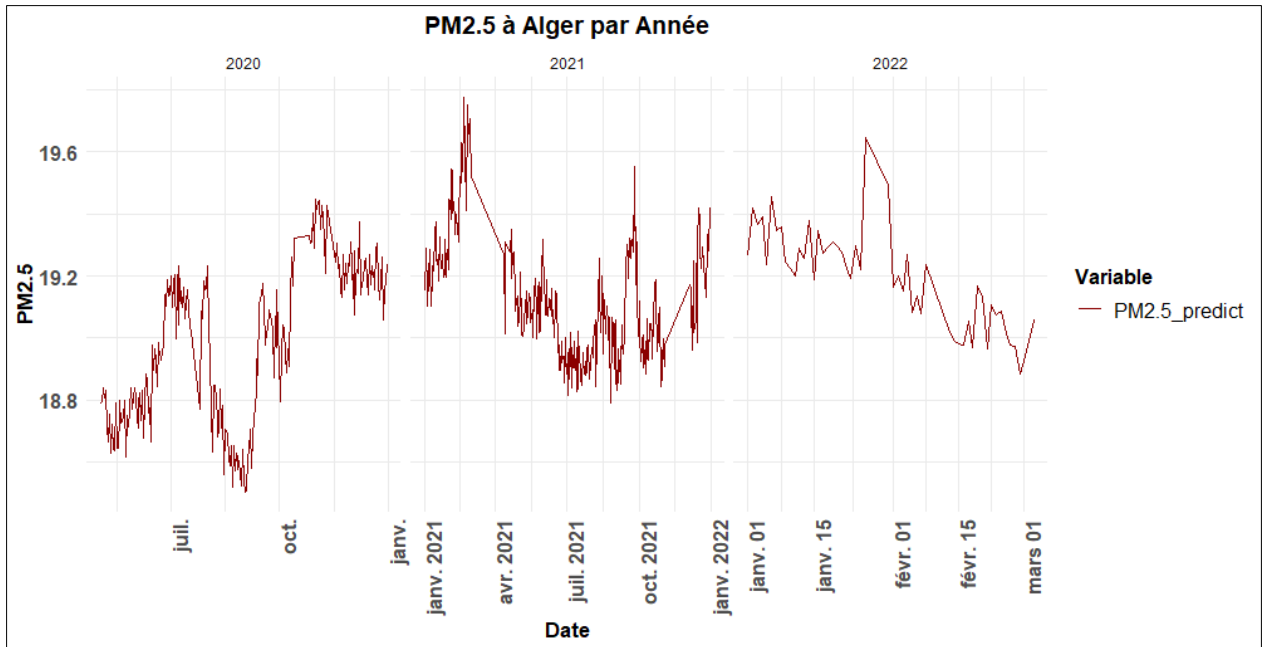


Figure 56 PM2.5 à Alger par Année 2020-2022

IV.4.4.2.3 Vagues de Covid-19 et périodes de confinements en Algérie

L'Algérie est l'un des rares pays à avoir imposé un confinement de niveau mondial à sa population. Des restrictions sur les activités des fonctionnaires, des écoles, des

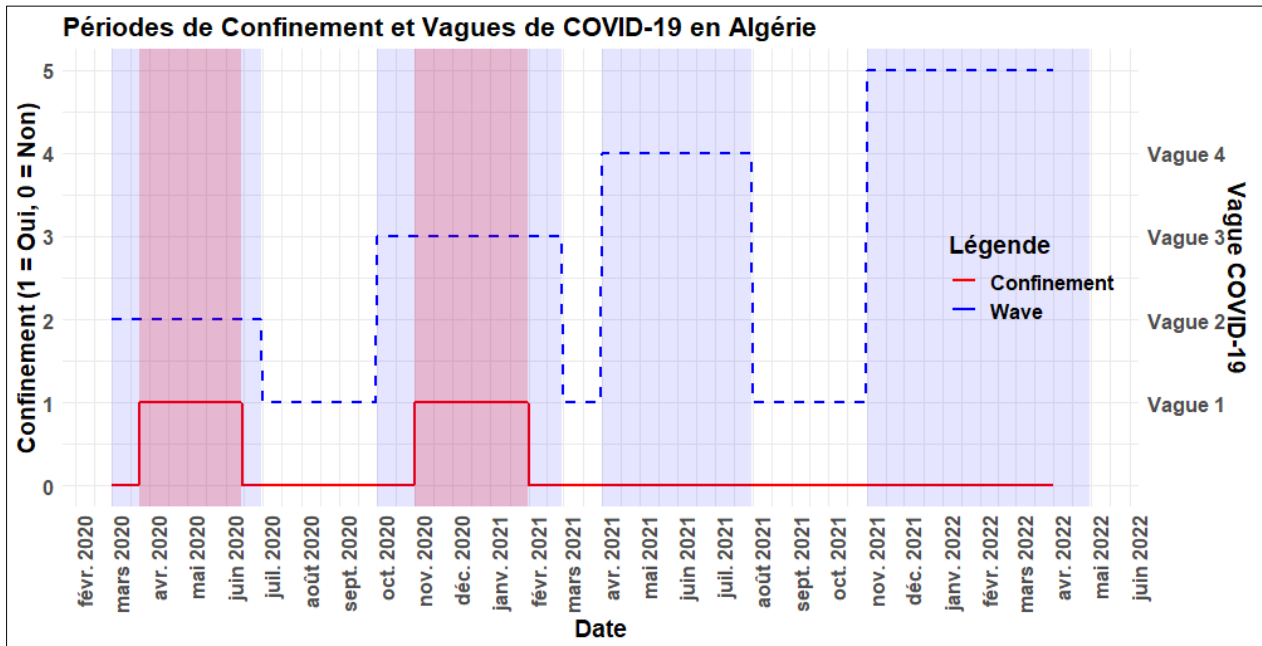


Figure 57 Périodes de Confinement et Vagues de COVID-19 en Algérie

universités, ainsi que sur les transports terrestres et aériens ont été mises en place durant la pandémie de COVID-19. La **Figure 57** illustre les périodes de confinement, leur durée, ainsi que les vagues les plus importantes que le pays a connues.

IV.4.4.2.4 Corrélation entre Pollution, Covid-19 et Confinement à Alger

L'analyse de la corrélation entre les facteurs de pollution atmosphérique et les paramètres épidémiologiques a révélé des résultats significatifs. Une corrélation positive très significative a été observée entre l'incidence et la mortalité du COVID-19 et l'indice de qualité de l'air (AQI), ainsi qu'entre l'incidence et la mortalité du COVID-19 et les niveaux de PM2.5. Inversement, une corrélation négative très significative a été trouvée entre l'incidence et la mortalité du COVID-19 et les mesures de confinement. En outre, une corrélation négative très significative a été identifiée entre l'AQI et les mesures de confinement. En résumé, une mauvaise qualité de l'air est associée à une augmentation des cas et des décès liés au COVID-19, tandis que les mesures de confinement contribuent à réduire ces taux et à améliorer la qualité de l'air (**Table 16**).

Table 16 *Corrélation entre l'incidence et la mortalité du COVID-19, les paramètres de pollution de l'air et les périodes de confinement à Alger (2000-2022)*

| | <i>IR</i> | <i>MR</i> | <i>AQI_predict</i> | <i>PM2.5_predict</i> | <i>Confinement</i> |
|--|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|--------------------|
| <i>IR</i> | | | | | |
| <i>MR</i> | 0.994 (<i><.001</i>) | | | | |
| <i>AQI_predict</i> | 0.845 (<i><.001</i>) | 0.841 (<i><.001</i>) | | | |
| <i>PM2.5_predict</i> | 0.288 (<i><.001</i>) | 0.291 (<i><.001</i>) | 0.620 (<i><.001</i>) | | |
| <i>Confinement</i> | -0.458 (<i><.001</i>) | -0.452 (<i><.001</i>) | -0.304 (<i><.001</i>) | 0.052 (.222) | |
| <i>Computed correlation used spearman-method with listwise-deletion.</i> | | | | | |

IV.4.4.3 Analyse de régression linéaire avec simulation Monte-Carlo

Les résultats de cette étude fournissent des informations importantes sur la relation entre la qualité de l'air et la dynamique de la transmission du COVID-19 à Alger. En utilisant des méthodes de régression linéaire multiple et la simulation Monte Carlo, nous avons pu examiner l'effet des prédicteurs AQI_predict et PM2.5_predict sur le nombre de reproduction effectif (Re_estimate) qui est représentatif des cas cumulé de la maladie à Alger pendant la période d'étude.

IV.4.4.3.1 Interprétation des Résultats du Modèle Original (sans simulation)

Les résultats du modèle de régression linéaire multiple original indiquent que les variables de qualité de l'air indépendantes 'AQI_predict' et 'PM2.5_predict' sont significativement associées à la variable épidémiologique dépendante 'Re_estimate'.

- L'ordonnée à l'origine (β_0) est estimé à 1.774118, avec une erreur standard de 0.106455, ce qui est statistiquement significatif ($P < 2e - 16$).
- Le coefficient pour AQI_predict (β_1) est de -0.029726, avec une erreur standard de 0.001929, également très significatif ($P < 2e - 16$). Cela suggère qu'une augmentation de l'AQI est associée à une diminution de 'Re_estimate', ce qui pourrait sembler contre-intuitif mais peut nécessiter une analyse plus approfondie.
- Le coefficient pour PM2.5_predict (β_2) est de 0.063753, avec une erreur standard de 0.007887, et est aussi significatif ($P = 4.09e - 15$). Cela indique qu'une augmentation des niveaux de PM2.5 est associée à une augmentation de 'Re_estimate'.

Table 17 Performance du modèle linéaire simple

| Erreur standard des résidus | R^2 | R^2 ajusté | Statistique F | Valeur-p |
|-----------------------------|--------|--------------|--------------------|---------------|
| 0.02919 | 0.3194 | 0.3169 | F-statistic: 127.9 | < 2.2e-16 *** |

Le R^2 ajusté montrent que le modèle explique environ 31.94% de la variance de la variable dépendante 'Re_estimate' est expliquée par les variables indépendantes du modèle (Table 17).

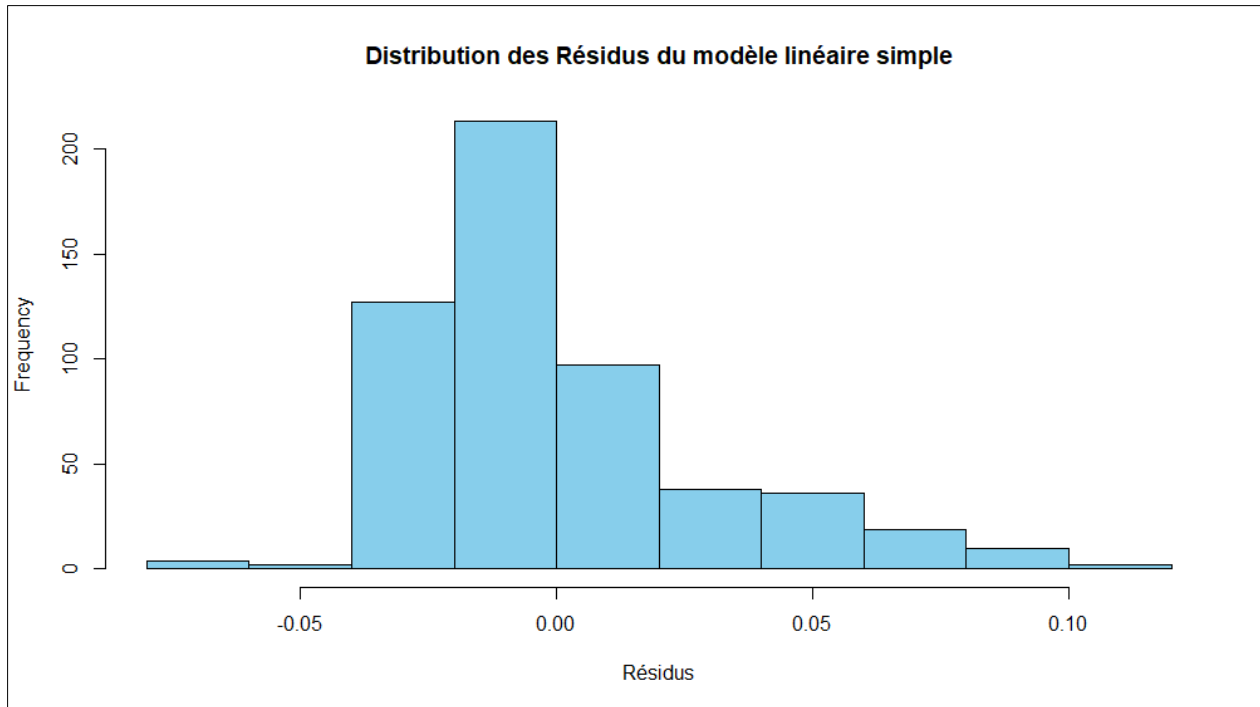


Figure 58 Distribution des Résidus du modèle linéaire simple

Dans la **Figure 58** l'examen de la distribution des résidus du modèle linéaire simple révèle une asymétrie légère avec une queue plus longue du côté droit. Bien qu'une majorité de résidus soient concentrés autour de zéro, cette asymétrie indique une plus grande occurrence ou variabilité des résidus positifs comparés aux négatifs. Cela pourrait indiquer la présence de valeurs aberrantes ou de facteurs non pris en compte par le modèle actuel. Dans l'ensemble, la distribution des résidus dévie quelque peu d'une normalité parfaite, ce qui pourrait nécessiter des analyses additionnelles ou un ajustement du modèle.

La **Figure 59** d'homoscédasticité des résidus met en évidence une hétéroscédasticité présente dans le modèle linéaire simple. On constate que la variance des résidus s'accroît avec l'augmentation des valeurs prédites, violant ainsi l'hypothèse d'homoscédasticité. Ceci suggère que le modèle actuel ne capture pas parfaitement la relation entre les variables prédictives et la variable à prédire. Ces observations indiquent que des ajustements au modèle seraient souhaitables afin d'améliorer la précision des prédictions.

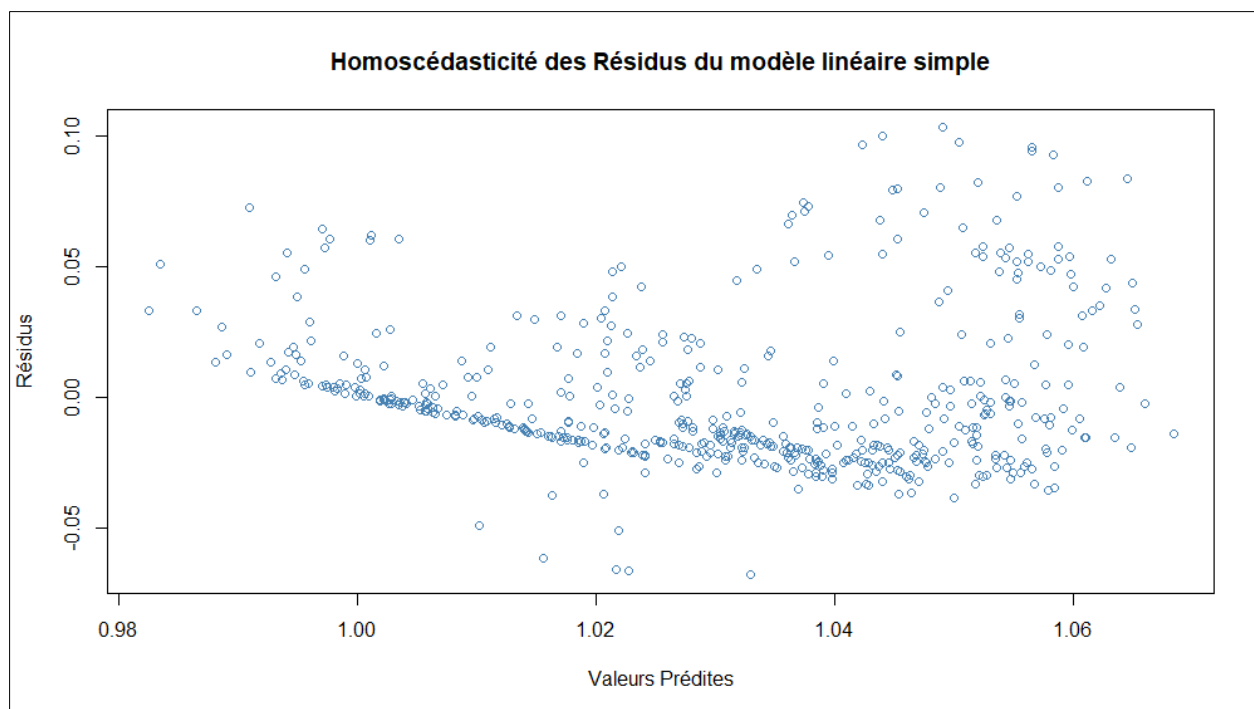


Figure 59 Homoscédasticité des Résidus du modèle linéaire simple

IV.4.4.3.2 Résultats des Simulations de Monte Carlo

Pour améliorer la robustesse de notre modèle de régression linéaire multiple et tenir compte de l'incertitude inhérente à l'estimation du paramètre 'Re_estimate', une simulation de Monte Carlo a été réalisée. Cette méthode permet de générer des distributions de coefficients en répétant de nombreuses fois les estimations des paramètres à partir d'échantillons aléatoires, ce qui donne une vision plus complète et probabiliste des coefficients estimés. Les résultats principaux de cette simulation sont présentés dans le **Tableau 18**.

Table 18 Distributions des coefficients des simulations Monte-Carlo

| Coefficients | l'intercepte | AQI_predict | PM2.5_predict |
|-------------------|--------------|-------------|---------------|
| Moyenne | 0.00557 | 1.06245 | 1.06226 |
| Ecart-type | 3.62321 | 0.07483 | 0.27155 |
| Q25 | -2.44232 | 1.01225 | 0.88003 |
| Médiane | 0.00085 | 1.06266 | 1.05938 |
| Q75 | 2.44692 | 1.11473 | 1.24912 |

Le Tableau 18 présente les distributions des coefficients issus des simulations de Monte Carlo pour l'intercepte, l'AQI (indice de qualité de l'air) prédit, et le PM2.5 prédit. Les statistiques descriptives de ces distributions, telles que la moyenne, l'écart-type, ainsi que les quantiles (Q25, médiane, Q75), fournissent des informations sur la variabilité et la stabilité des estimations des coefficients de régression et d'évaluer la fiabilité des prédictions du modèle.

Table 19 Résumé des simulations de Monte Carlo pour le R-carré

| Moyenne | SD | Q25.25% | Médiane | Q75.75% |
|---------|------|---------|---------|---------|
| 0.58 | 0.02 | 0.56 | 0.58 | 0.59 |

Les résultats montrent que la moyenne des coefficients pour l'AQI et le PM2.5 est supérieure à 1, ce qui suggère une relation positive entre ces variables et le paramètre 'Re_estimate'. Les écarts-types relativement faibles pour l'AQI (0.07483) et le PM2.5 (0.27155) indiquent une variabilité modérée autour des moyennes, reflétant une certaine stabilité dans les estimations des coefficients.

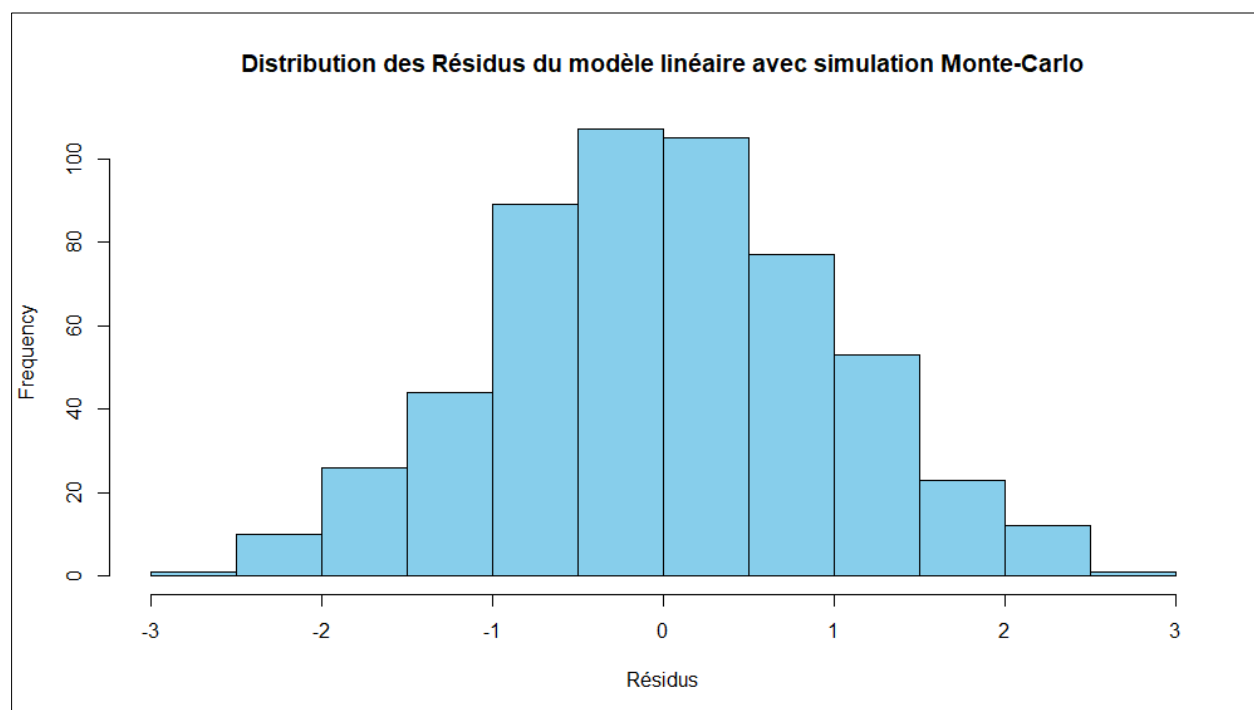


Figure 60 Distribution des Résidus du modèle linéaire avec simulation Monte-Carlo

La **figure 60** montre que la distribution des résidus du modèle linéaire intégrant une simulation de Monte-Carlo est plus symétrique et suit une loi normale plus resserrée que celle du modèle linéaire simple. De même, la **figure 61** représentant l'homoscédasticité des résidus du modèle linéaire avec simulation de Monte-Carlo affiche une variance des résidus plus constante à travers les différentes valeurs prédites, en comparaison au modèle simple. Cela suggère que l'intégration de la simulation de Monte-Carlo a permis de stabiliser la variance des résidus et contribué à réduire l'hétéroscédasticité, améliorant ainsi l'ajustement global du modèle.

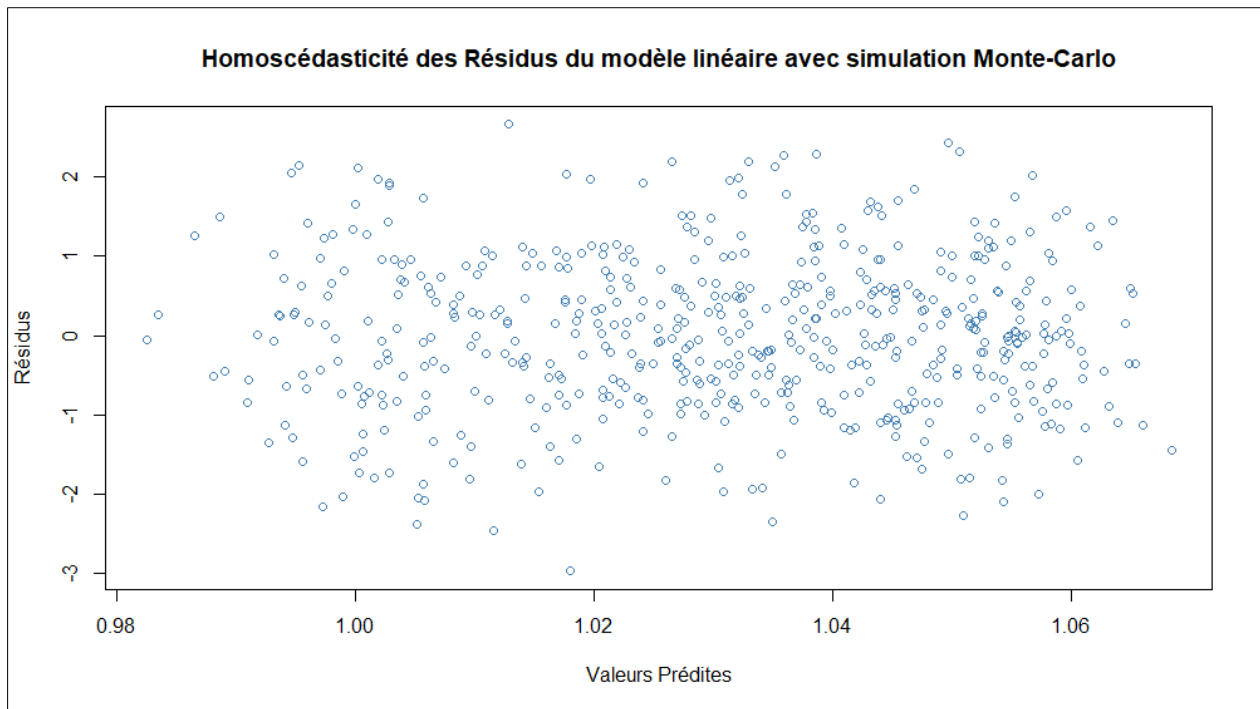


Figure 61 Homoscédasticité des Résidus du modèle linéaire avec simulation Monte-Carlo

IV.5 Discussion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une analyse complète de la pandémie de Covid-19 en Algérie. Des données climatiques, épidémiologiques et atmosphériques provenant de 26 villes (**Figure 41**) ont été soumises à plusieurs analyses statistiques de corrélation et de régression. Les résultats ont mis en évidence les différents aspects des conséquences du climat, de la qualité de l'air et des mesures de restriction sur l'évolution de l'épidémie.

En première partie, une analyse de la distribution nationale des paramètres climatiques (**Figure 43-48**) ainsi que des cas et des décès cumulés a été privilégiée (**Figure 49-50**). Bien que la distribution de la maladie soit élevée, elle est relativement faible au niveau mondial en termes de sévérité de transmission. Par exemple, la Tunisie, pays voisin, a connu des vagues de Covid-19 beaucoup plus intenses avec un total de 1 035 822 cas et 28 258 décès, contrairement à l'Algérie qui a enregistré 265 691 cas et 6 875 décès jusqu'au 31/03/2022. [200]. Une étude comparative sur 30 pays africains [201] montre que l'Algérie a été durement touchée lors de la première vague de Covid-19, avec un taux de reproduction (R_0) élevé. Cependant, lors des vagues suivantes, l'Algérie a connu des niveaux de transmission plus faibles à modérés grâce à l'imposition de périodes de confinement total dès le début de la deuxième vague (**Figure 57**). Les observations des paramètres météorologiques collectés dans 26 villes nous ont permis de calculer les valeurs moyennes des principaux facteurs climatiques pour 2020, 2021 et le début 2022. De manière générale, les températures moyennes varient entre 5°C et 30°C (**Figure 45**), les précipitations sont très faibles pour un vaste pays comme l'Algérie avec 0 à 3 mm en moyenne (**Figure 46**), l'humidité oscillant de 10% dans les régions désertiques du Sahara à 90% dans les villes côtières de la Méditerranée (**Figure 47**). Les vents soufflent à une vitesse moyenne de 3 à 28 km/h dans la majorité des régions étudiés (**Figure 48**).

Des observations, issues de l'étude d'**Ahmani et Meddi (2009)** réalisé dans l'Ouest de l'Algérie démontrent la variabilité climatique dans les régions arides et semi-arides du pays. Ces zones sont caractérisées par des fluctuations importantes des précipitations, alternant entre des périodes humides et sèches. Une illustration frappante de ce

phénomène est la sécheresse sévère qui a touché l'ouest de l'Algérie de 1975 à 2004. Les indices climatiques révèlent un climat semi-aride avec des hivers froids. Depuis 1975, une tendance préoccupante à la baisse des précipitations a été observée. Cette diminution, couplée à une évapotranspiration potentielle élevée, aggrave le déficit hydrique dans la région. Le réchauffement climatique se manifeste également de manière significative avec une augmentation de la température moyenne de 1,6°C qui a été enregistrée au cours de cette étude. Cette hausse substantielle souligne l'impact tangible du changement climatique sur la région [202].

Dans notre étude, on s'est concentré sur les facteurs climatiques qui favorisent la transmission de la covid-19 dans 26 villes d'Algérie précédemment citées entre 2020 et 2022.

IV.5.1 Climat et Covid-19 en Algérie

L'analyse de corrélation a révélé que les températures moyennes, maximales et minimales ainsi que la vitesse du vent étaient négativement corrélées avec l'incidence et la mortalité du covid-19, tandis que l'humidité et les précipitations étaient positivement corrélées avec l'incidence et la mortalité du Covid-19 dans ces régions (**Table.14**)

Dès l'émergence de la pandémie de SARS-CoV-2, de nombreux chercheurs à l'échelle mondiale ont entrepris des études épidémiologiques et étiologiques approfondies. Leur objectif était d'élucider les mécanismes pathogéniques et les facteurs de risque associés à cette nouvelle maladie infectieuse. Le COVID-19, caractérisé comme une affection respiratoire aiguë, peut provoquer une pneumonie virale sévère, potentiellement létale. Cette pathologie a entraîné une mortalité significative à l'échelle planétaire, suscitant un intérêt scientifique sans précédent pour comprendre ses interactions avec divers paramètres environnementaux et physiologiques [167-203]. La température est le paramètre le plus étudié dans le contexte du covid-19, une étude menée à Rio de Janeiro a eu les mêmes résultats concernant les températures et la vitesse du vent avec des corrélations fortement négatives [204]. Certaines études au Pakistan ont démontré que les températures ont une corrélation positive avec les cas journalier de covid-19 [205] alors que d'autres chercheurs au New Delhi [206] ont adopté une technique de ce que

l'on appelle l'effet retardé d'une variables, ils ont étudié les corrélations entre la variable température du même jour, avant 7 et 14 jours et les nouveaux cas et décès enregistrés, leurs résultats montrent que les températures moyennes et maximales sur les 3 périodes d'étude présentent une corrélation positive forte avec les cas confirmés quotidiens et les cas de guérison, de plus, les températures du même jour sont également significatives pour les cas de décès quotidiens selon leur étude. Une autre analyse au Bangladesh a prouvé le contraire en utilisant un modèle linéaire leurs résultats ont démontré qu'une température haute réduisait la transmission du virus [207].

Ces différents résultats affirment que les variations environnementales et climatiques déterminent la propagation d'une maladie, en grande partie associée aux conditions géographiques de chaque région étudiée, par conséquent le facteur de chaleur ou de température a été évalué dans le contexte médical du virus, cette investigation a démontré que les températures élevées endommagent la couche lipidique du virus, ce qui diminue sa stabilité et son potentiel d'infection, et peuvent même entraîner l'inactivation du virus, ce qui réduit le taux de transmission de la maladie [208-209].

Dans notre étude, la vitesse du vent a également montré une corrélation négative avec les cas de Covid-19, en accord avec les résultats d'un travail mené au Brésil [204]. En effet, des recherches antérieures [210] ont démontré qu'en extérieur, une vitesse de vent plus élevée contribue à la dilution et à l'élimination des gouttelettes respiratoires, réduisant ainsi la concentration du virus dans l'air et diminuant le potentiel de transmission du virus SARS-CoV-2. De plus, dans les environnements intérieurs, il a été constaté que des vitesses de vent plus élevées réduisent la charge virale, ce qui peut prévenir les épidémies de SARS [212]. La concentration de polluants atmosphériques joue également un rôle significatif dans la propagation du SARS-CoV-2 [211].

Cependant, d'autres études ont trouvé une corrélation positive entre la vitesse du vent et les cas de Covid-19, suggérant que plus la vitesse du vent augmente, plus les cas de Covid-19 sont fréquents. Une analyse au Ghana [213] a utilisé un modèle additif généralisé (GAM) pour modéliser la relation entre la vitesse du vent et les cas de Covid-19. Leurs résultats suggèrent une relation linéaire positive entre la vitesse du vent et la propagation de la maladie. Selon cette étude, le risque de propagation de Covid-19

augmente de manière significative avec chaque augmentation de 1 km/h de la vitesse du vent. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'une vitesse de vent élevée favorise la dispersion des gouttelettes respiratoires en suspension dans l'air, augmentant ainsi le risque d'inhalation par les personnes présentes dans cet environnement. De même, les conclusions de **Şahin (2020)** indiquent que la propagation du virus augmente avec des vitesses de vent élevées [214]. Toutefois, certaines études n'ont pas trouvé de relation significative [215] et d'autres ont rapporté une corrélation négative entre la vitesse du vent et la propagation de la Covid-19 [216-217]

L'analyse de corrélation a démontré que l'humidité a une relation positive avec l'incidence et la mortalité du Covid-19 dans la population algérienne, suggérant qu'un environnement humide pourrait favoriser la dispersion ou la persistance du virus. Une étude réalisée en 2020 utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique [218] a confirmé l'effet positif de l'humidité sur les cas de Covid-19. Bien que l'humidité semble être un paramètre favorable, la plupart des recherches ont trouvé des corrélations négatives avec cette dernière. Cela est dû au fait qu'une humidité plus élevée est corrélée avec une température plus basse, alors qu'une température plus élevée indique un climat plus sec. Les villes les plus peuplées d'Algérie, et donc plus susceptibles d'avoir plus de cas, se distinguent par un climat méditerranéen très humide et chaud, ce qui modifie la relation entre Covid-19 et humidité en fonction de la température. En effet, des températures et une humidité élevées réduisent la transmission de la grippe, ce qui peut s'expliquer par plusieurs raisons possibles : premièrement, le virus de la grippe par exemple est plus stable à basse température et les gouttelettes respiratoires restent plus longtemps en suspension dans l'air sec. Deuxièmement, le froid et la sécheresse peuvent également affaiblir l'immunité des hôtes et les rendre plus vulnérables au virus. Troisièmement, un taux d'humidité élevé contribue à prévenir l'infection en gardant les membranes du nez et de la gorge humides, permettant ainsi de capturer les particules, bactéries et virus avant qu'ils n'atteignent les poumons [207].

Une étude réalisée par Predict Services en France en 2020 s'est penchée sur les effets de la température et de l'humidité absolue. Cette recherche a révélé que 90% des infections au début de la pandémie se sont produites dans des régions où les conditions

météorologiques présentait un indice de température et de concentration d'humidité élevé, c'est-à-dire avec des températures comprises entre 3 et 17°C et une humidité absolue entre 4 et 9 g/m³ (équivalent à une humidité relative de 35 à 85%). Ces plages de température et d'humidité sont propices à la suspension des gouttelettes virales dans l'air, favorisant ainsi la transmission aérienne du SARS-CoV-2. Les chercheurs ont observé une forte corrélation entre les régions présentant des valeurs favorables d'IPTCC (*Index PREDICT de transmissivité climatique de la COVID-19 - index qui caractérise la potentialité de transmission du virus SARS-CoV-2 selon les conditions climatiques, notamment la température et l'humidité*) et celles qui ont connu une augmentation significative des cas de Covid-19 lors de la première vague de la pandémie au printemps 2020. Ce phénomène a été particulièrement marqué en Europe de l'Ouest, où l'épidémie s'est rapidement propagée entre mars et avril 2020. Durant cette période, l'IPTCC calculé était très élevé sur une vaste zone géographique s'étendant de l'Espagne au Benelux, en passant par la France et l'Italie [219]. Une autre expérience a révélé que la probabilité de survie du SARS-CoV-2 est environ cinq fois plus élevée dans des conditions humides que dans des conditions sèches [220]. Les résultats de la corrélation ont également montré une relation positive entre les précipitations, l'incidence et la mortalité du covid-19, plusieurs recherches ont affirmé ces résultats, une étude qui a été menée sur quatre provinces au Pakistan à trouver une corrélation positive forte avec la moyenne des précipitations journalière sur 3 des quatre villes étudiées [205]. Une autre étude au Pakistan a examiné les corrélations entre les précipitations et les cas de Covid-19 dans différentes villes. À Lahore, les précipitations ont montré une corrélation négative avec les cas de COVID-19, suggérant que des niveaux plus élevés de précipitations étaient associés à une diminution des infections. Pour Karachi, les précipitations étaient également négativement corrélées avec les cas de COVID-19 indiquant un effet similaire. À Peshawar, une corrélation négative a également été observée, tandis qu'à Islamabad, les précipitations n'ont pas montré de corrélation significative avec les cas de COVID-19. [221].

Bien que plusieurs études aient examiné la relation entre les précipitations et les cas de COVID-19, les résultats sont mitigés. Certaines recherches suggèrent que les

événements pluvieux entraînent une diminution de 18 à 24% des cas de COVID-19, probablement en raison de l'élimination humide des particules virales de l'air. [222].

En résumé, l'impact des précipitations sur la transmission du COVID-19 reste peu clair et nécessite davantage de recherches pour clarifier la relation entre les schémas de précipitations et la propagation du SRAS-CoV-2.

La discussion des différents facteurs environnementaux dans le contexte d'une maladie contagieuse respiratoire est une tâche complexe. Bien que les analyses réalisées montrent des résultats significatifs, leur interprétation et comparaison avec d'autres régions est quelquefois contradictoire ou, au contraire, présente des similarités à un très haut niveau, comme par exemple le même coefficient de corrélation entre deux variables identiques. Les variations, quant à elles, restent très normales car les régions d'études avec lesquelles nos résultats ont été comparés peuvent être des pays voisins ou des localisations lointaines, sans oublier les méthodes d'analyse des données spécifiques à chaque chercheur. Ceci dit, les plus grandes fluctuations sont d'origine démographique, liées à l'immunité de la population, aux différents systèmes de santé ou encore aux restrictions imposées dans chaque pays.

IV.5.2 Pollution atmosphérique et Covid-19 à Alger

Dans la phase suivante de notre analyse, nous avons investigué l'impact de la pollution atmosphérique ainsi que des mesures de confinement sur l'incidence et la mortalité du Covid-19, tout en considérant l'effet secondaire du confinement sur la qualité de l'air. Pour cette analyse approfondie, nous avons sélectionné Alger comme cas d'étude (**Figure 42**) en raison de la disponibilité des données relatives à l'Indice de Qualité de l'Air (AQI) et aux particules fines (PM2.5) [195-196].

Préalablement, nous avons entrepris une normalisation des données de pollution atmosphérique avec une base de données de facteurs climatiques. Cette normalisation est primordiale pour écarter l'effet potentiellement extrémiste de l'impact des conditions météorologiques sur l'ampleur de la pollution.

La **Table 15** montre la distribution des moyennes des valeurs des indices de qualité de l'air à Alger. Le 'AQI' pendant la pandémie Covid-19 était « modéré » au lieu de « Bon »

selon les recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé en conditions de vie normale pour le bien-être de la population. [223].

La corrélation de Spearman dans la **Table 16** offre des résultats précieux, l'incidence et la mortalité du Covid-19 ont une très forte et positive corrélation très significative avec l'indice de qualité de l'air et les PM2.5 et une corrélation négative avec le confinement. Ceci veut dire qu'un indice de qualité de l'air et de particules fines PM2.5 élevé est considéré comme un facteur favorisant l'incidence et la mortalité du Covid-19, et les périodes de confinements et de restrictions à Alger ont considérablement diminué l'incidence et la mortalité du Covid-19. Une étude similaire en Chine a indiqué que les villes enregistrant des niveaux de pollution atmosphérique élevée sont également caractérisées par un nombre élevé d'infections et de décès dus au COVID-19 de différentes tranches d'âge [224]. Une autre étude menée sur une large base de données des villes des USA a analysé l'association des polluants atmosphériques avec l'incidence et la mortalité du Covid-19 bien que leurs résultats ont montré une association avec les niveaux de NO₂ l'association avec les particules fines PM2.5 a donné une corrélation négative [225]. La région d'Alger est malheureusement celle qui a le plus enregistré de mortalité liée à la pandémie de coronavirus, notamment dans les provinces d'Alger, Sétif et Blida. Les analyses statistiques révèlent une corrélation frappante entre la dégradation de la qualité de l'air et l'incidence élevée de cas de COVID-19. Une revue récente à examiner plusieurs analyses et productions scientifiques qui ont étudié la relation climat-Covid et pollution atmosphérique-Covid leur principaux résultats concluent que l'effet des particules fines sur la propagation de la maladie est indéniable [226].

À l'heure actuelle, les substances polluantes considérées comme nocives pour la santé humaine et l'environnement sont : le monoxyde de carbone, le plomb, le dioxyde d'azote, l'ozone, les oxydes de soufre et les particules présentes dans l'air ambiant. Les particules en suspension dans l'atmosphère sont reconnues comme étant des véhicules permettant le transport de nombreux contaminants chimiques et biologiques, y compris les virus [227-228]. En effet, l'exposition prolongée à certains polluants atmosphériques, notamment le dioxyde d'azote et les particules fines, entraîne une surproduction d'une enzyme clé appelée enzyme de conversion de l'angiotensine 2 (ACE-2) à la surface des cellules des

voies respiratoires. Cette enzyme sert de porte d'entrée aux coronavirus comme le SARS-CoV-2, responsable de la COVID-19. Une quantité accrue d'ACE-2 facilite ainsi l'infection virale et aggrave les symptômes. Ce phénomène explique en partie pourquoi les régions comme l'Inde, la Chine, l'Italie, la Russie, le Chili et le Qatar correspondent à des taux élevés d'infections par COVID-19. Ceci est dû à la corrélation positive entre les niveaux de pollution atmosphérique et l'expression de l'ACE-2. Les particules fines en suspension peuvent également transporter le virus sur de longues distances, contribuant à sa propagation. D'autres facteurs comme l'hypertension augmentent également les risques liés à une surexpression de l'ACE-2. En somme, la pollution de l'air chronique crée un terrain favorable aux coronavirus en augmentant la présence de leurs récepteurs dans les poumons, d'où l'importance de réduire les émissions polluantes pour mieux se prémunir contre de futures pandémies virales [229]. Parallèlement le confinement a montré une corrélation négatives très significative avec la qualité de l'air ce qui suggère que la restriction due au covid-19 à améliorer dans une certaine mesure la qualité de l'air à Alger. Les **Figures 55-56** présentent d'une manière plus claire la distribution de l'Indice de Qualité de l'Air (AQI) et des niveaux de PM_{2.5} sur les trois années d'étude à Alger. Une nette augmentation des concentrations des deux paramètres est observée en janvier 2021, suite à la levée du deuxième confinement, illustrant une tendance d'augmentation continue. Une investigation intéressante à analyser les conséquences des restrictions imposées lors de la pandémie Covid-19 sur l'état de la qualité de l'air à New Delhi en inde, les résultats affirment que les polluants atmosphériques en générale ont nettement diminué, spécifiquement les particules fines PM₁₀ et PM_{2.5} ont diminué de 50% [230]. Une autre étude en Turquie a utiliser des données de particules fines de 79 pays pour analyser leur concentration pendant les 5 premiers mois de l'an 2019 et les 5 premiers mois de l'an 2020, leurs résultats affirment une diminution des concentrations des PM_{2.5} et PM₁₀ avec des intervalles de différences entre chaque région [231]. Egalement des chercheurs à Wuhan, en Chine, ont analysé l'indice moyen mensuel de la qualité de l'air (IQA) pendant et après le confinement du 23 janvier 2020. Ils ont observé que l'IQA était de 59,7, ce qui représente une diminution de 33,9 % par rapport à la période précédant le confinement et une réduction de 47,5 % par rapport à la période correspondante de 2015 à 2019, où l'IQA était de 113,6 [232].

Ces résultats offrent un aperçu fascinant du rôle des autorités et de l'impact des actions humaines dans la gestion des événements climatiques et de la pollution. En mettant en lumière l'augmentation significative des niveaux de pollution atmosphérique en janvier 2021, suite à la levée du deuxième confinement, nous sommes confrontés à la réalité de notre capacité à influencer directement la qualité de l'air que nous respirons.

Après avoir identifié des corrélations significatives entre les variables de qualité de l'air, d'incidence et de mortalité à travers une analyse de corrélation, une régression linéaire multiple a été réalisée pour plusieurs raisons essentielles. La régression linéaire multiple permet de quantifier l'effet spécifique de chaque variable indépendante sur l'incidence de nouveaux cas, tout en contrôlant les autres variables du modèle. Cette approche fournit une compréhension plus précise des contributions individuelles de chaque facteur, permettant de gérer les effets confondants potentiels.

L'analyse de la relation entre la qualité de l'air et la dynamique de transmission du COVID-19 à Alger, en utilisant une approche de simulation Monte Carlo appliquée à des séries temporelles transformées en $R(t)$, offre plusieurs points de discussion importants :

- La transformation des données (Cas cumulés) en nombre de reproduction effectif $R(t)$ a permis de mieux capturer la dynamique de transmission du virus. Cette approche a amélioré la pertinence des analyses en tenant compte de la dépendance temporelle, ce qui n'est pas possible avec une régression linéaire classique. Le $R(t)$ fournit une mesure plus directe de la propagation de l'infection, rendant les résultats plus robustes.
- L'utilisation de simulations de Monte Carlo pour estimer l'incertitude autour des $R(t)$ a permis de mieux gérer la variabilité et les incertitudes inhérentes aux données. En répétant les régressions avec des valeurs de $R(t)$ tirées de l'intervalle de confiance, nous avons obtenu des estimations plus fiables des effets des prédicteurs de la qualité de l'air.

IV.5.3 Régression Linéaire multiple

La régression linéaire multiple initiale a montré que les variables de qualité de l'air « *AQI_predict* et *PM2.5_predict* », sont significativement associées au nombre de

reproduction effectif $R(t)$. Bien que les coefficients aient été significatifs mais les relations observées peuvent sembler contradictoires. Par exemple, l'association négative entre $AQI_{predict}$ et $R(t)$ pourrait nécessiter une interprétation plus approfondie.

La performance globale du modèle était modérée avec un R^2 de 0.3194, indiquant qu'une proportion importante de la variance dans (t) n'était pas expliquée par les variables incluses dans le modèle. **(Table 17)**

L'examen des résidus a révélé une légère asymétrie avec une queue plus longue du côté droit, suggérant une variabilité plus élevée des résidus positifs. Cela pourrait indiquer la présence de facteurs non pris en compte ou de valeurs aberrantes **(Figure 58-59)**.

IV.5.4 Régression Linéaire multiple avec Simulations de Monte Carlo

Pour améliorer la robustesse et la fiabilité de nos estimations, nous avons intégré des simulations de Monte Carlo dans notre modèle de régression linéaire multiple. Cette technique avancée permet de quantifier et d'incorporer l'incertitude inhérente aux estimations de $R(t)$ en répétant les régressions avec des valeurs aléatoirement échantillonnées au sein de l'intervalle de confiance des paramètres estimés.

L'utilisation des simulations de Monte Carlo offre plusieurs avantages cruciaux dans notre analyse épidémiologique : elle permet une quantification précise de l'incertitude, renforce la robustesse des prédictions en atténuant l'impact des valeurs aberrantes, facilite l'exploration de scénarios hypothétiques en modifiant les distributions des variables explicatives. Cette approche sophistiquée améliore considérablement la fiabilité des prédictions de $R(t)$ en réduisant le risque de sur-ajustement du modèle,

Les simulations ont produit des distributions des coefficients plus stables avec une moyenne proche des valeurs initiales, mais avec une réduction de l'incertitude. Par exemple, la moyenne et l'écart-type des coefficients pour $AQI_{predict}$ et $PM2.5_{predict}$ étaient plus cohérentes, ce qui renforce la confiance dans les résultats. **(Table 18)**

La moyenne du R^2 ajusté à travers les simulations était de 0.58, montrant une meilleure capacité explicative par rapport au modèle linéaire simple. Cela indique que les

simulations de Monte Carlo ont aidé à capturer davantage de variabilité dans $R(t)$ (**Table 19**).

Les analyses des résidus des modèles avec simulations de Monte Carlo ont montré des améliorations notables, la distribution des résidus du modèle linéaire avec simulation de Monte Carlo était plus symétrique et proche d'une distribution normale, réduisant ainsi les biais observés dans le modèle initial (**Figure 60**).

L'homoscédasticité qui représente la variance des résidus était plus constante à travers les différentes valeurs prédites dans le modèle avec simulation de Monte Carlo. Cela a réduit l'hétéroscédasticité observée dans le modèle initial, suggérant que le modèle enrichi est mieux ajusté et plus fiable (**Figure 61**).

IV.5.5 Implications des Polluants Atmosphériques sur les cas de Covid-19 à Alger

Les résultats de cette analyse montrent que les polluants atmosphériques, en particulier les particules fines (PM2.5), ont un impact significatif sur le nombre de reproduction effectif $R(t)$. Une augmentation des niveaux de PM2.5 est associée à une augmentation de $R(t)$, soulignant l'importance de la qualité de l'air dans la propagation du COVID-19.

L'association entre la qualité de l'air et $R(t)$ met en lumière la nécessité d'intégrer des mesures de contrôle de la pollution dans les stratégies de gestion des pandémies spécialement dans les grandes villes où la population est plus concentrée et l'activité entropique est plus intense. Réduire la pollution de l'air pourrait potentiellement diminuer la transmission de certains virus et maladies, en plus des bénéfices généraux pour la santé publique.

En intégrant la simulation de Monte Carlo dans la régression linéaire multiple, nous obtenons une équation de prédiction qui reflète la moyenne des coefficients estimés à partir de ces simulations.

L'équation de prédiction basée sur ces coefficients est :

$$\hat{R}(t) = 0.00557 + 1.06245 \cdot AQI_predict + 1.06226 \cdot PM2.5_predict$$

Où :

$\hat{R}(t)$ Représente le nombre de nouveaux cas Covid-19 dans un temps (t)

Application de l'équation dans un exemple :

Pour un jour où $AQI_{predict} = 80$ et $PM2.5_{predict} = 20$, substituons ces valeurs dans l'équation :

$$\hat{R}(t) = 0.00557 + 1.06245 \cdot \underline{80} + 1.06226 \cdot \underline{20}$$

$$\hat{R}(t) = 0.00557 + 84.996 + 21.2452$$

$$\hat{R}(t) = 0.00557 + 106.2412$$

$$\underline{\hat{R}(t) = 106.24677}$$

Donc, selon notre modèle de régression linéaire multiple, le nombre de reproduction effectif $R(t)$ et donc de cas de Covid-19 serait estimé à environ 106 cas pour un jour où $AQI_{predict} = 80$ et $PM2.5_{predict} = 20 \mu\text{g} / \text{m}^3$

Cette estimation utilise les coefficients moyens obtenus des simulations Monte Carlo pour fournir une prédiction plus fiable en intégrant l'incertitude observée dans les données.

Les résultats soulignent l'importance des indicateurs de qualité de l'air, tels que $AQI_{predict}$ et $PM2.5_{predict}$, dans la prédiction du nombre de reproduction effectif $R(t)$ respectif au Covid-19.

Cette approche avancée démontre la nécessité de prendre en compte la qualité de l'air dans les stratégies de gestion de la pandémie de COVID-19 et offre des outils précieux pour des interventions de santé publique plus efficaces.

IV.6 Conclusion

Cette étude a révélé les facteurs climatiques et atmosphériques primordiaux influençant la propagation du Covid-19 dans un cadre géographique spécifique. Les niveaux élevés de particules fines (PM2.5) et un indice de qualité de l'air médiocre ont été fortement associés à une augmentation des cas et des décès liés au virus, soulignant ainsi l'urgence de réduire la pollution atmosphérique pour contrôler la transmission des maladies respiratoires virales.

Concernant les conditions météorologiques, des températures plus basses, une humidité relative élevée et des précipitations accrues semblent favoriser la persistance et la dispersion du virus dans l'air. Cependant, l'impact de l'humidité peut varier selon les conditions thermiques, tandis qu'une vitesse de vent plus élevée a tendance à diluer les gouttelettes virales en suspension, réduisant ainsi les risques de contamination.

En outre, les mesures de confinement et de restrictions de mouvement ont été efficaces pour freiner la transmission du Covid-19, soulignant l'importance des interventions gouvernementales. Ces périodes de confinement ont également temporairement amélioré la qualité de l'air dans la zone d'Alger.

En conclusion, cette recherche met en lumière la nécessité d'une approche globale intégrant la surveillance des conditions météorologiques, le contrôle des émissions polluantes et la mise en œuvre de mesures sanitaires appropriées pour lutter efficacement contre les épidémies de maladies respiratoires émergentes.

Conclusion générale

Dans cette recherche, nos résultats mettent en évidence l'importante relation entre la santé et l'environnement. Bien que les impacts du changement climatique sur la santé soient souvent complexes, rarement directs et ne se limitent pas à une simple augmentation des températures moyennes, leur influence est indéniable. En explorant les différents aspects de maladies pandémiques telles que le Covid-19 ou d'épidémies comme la Leishmaniose Cutanée, nous avons pu démontrer une relation entre l'environnement et l'intensification, l'émergence, la réémergence ou la propagation de ces maladies vers de nouveaux horizons, favorisés par des conditions environnementales propices.

Les résultats de cette étude montrent que des facteurs météorologiques tels que la température, l'humidité, la vitesse du vent et les précipitations influencent la durée de vie et la persistance d'un pathogène au sein d'une population. De plus, des facteurs environnementaux comme l'indice de végétation, même faiblement présent, contribue à la distribution de la leishmaniose cutanée, en particulier dans des régions arides telles que Ghardaïa. Par ailleurs, les scénarios de changements climatiques appliqués à notre modèle de prévision ont démontré l'ampleur et l'urgence de réagir dès maintenant face aux risques d'une pandémie de Leishmaniose et autres maladies à transmissions vectorielles.

L'analyse menée dans la région d'Alger met également en évidence les conséquences graves d'une mauvaise qualité de l'air, en particulier à la lumière de l'étude du Covid-19. Cependant, un aspect positif de cette recherche réside dans la constatation que les restrictions mises en place pendant la pandémie de Covid-19 pour contenir la propagation de la maladie ont eu un effet bénéfique sur les concentrations de PM2.5 et de l'indice de qualité de l'air (AQI) dans la ville d'Alger.

Cette constatation souligne l'importance de telles mesures et incite les écologues, les défenseurs de l'environnement et les chercheurs à encourager les acteurs politiques et décideurs à intégrer de telles restrictions pour réduire l'impact de l'activité humaine sur

Conclusion générale

notre planète. Cela permettrait de favoriser la régénération de notre environnement et, par conséquent, d'améliorer notre qualité de vie et la santé publique

Perspective

Cette thèse de recherche repose principalement sur l'exploitation de bases de données portant sur la situation épidémiologique et climatique en Algérie. L'acquisition de ces données s'est avérée être un défi de taille en raison de leur disponibilité limitée, ce qui a engendré de nouveaux problèmes.

En juin 2023, le ministère de la Santé a publié le Décret exécutif n° 22-250, qui a révisé l'ensemble des aspects du système de santé algérien. Ce décret a notamment établi une mise à jour de la liste des maladies à déclaration obligatoire pour la surveillance nationale et internationale, et a transformé l'établissement public "Agence nationale de documentation de la santé", créé en 1995, en "Agence nationale de numérisation en santé". Cette nouvelle agence est chargée de mettre en place les outils numériques indispensables dans le domaine de la santé, de développer la formation en ligne pour les professionnels de santé, d'assurer une veille sanitaire, de numériser les archives médicales, de sécuriser l'identification numérique des acteurs de la santé, d'élaborer des mesures législatives et de produire des rapports sur l'évolution du secteur numérique de la santé.

Dans cette lignée et pour répondre aux besoins des chercheurs, du gouvernement et surtout pour la santé publique en Algérie, nous avons lancé un projet dans le cadre du programme de start-up 2024. Ce projet consiste en la création d'une application web dédiée au personnel de santé : médecins, infirmiers et chefs de laboratoire hospitalier. Cette initiative, baptisée "Epidzair", vise principalement à établir une surveillance efficace de la santé en Algérie. C'est une plateforme qui se positionne comme un outil essentiel pour contrôler, prévenir et réagir rapidement en cas d'épidémie ou de tout changement anormal dans la santé de la population.

Ses objectifs spécifiques incluent la collecte de données sur les symptômes inhabituels et les maladies dans des régions spécifiques de l'Algérie, la facilitation de la communication entre les professionnels de la santé pour partager les diagnostics et

Perspective

informer des situations épidémiologiques, ainsi que la mise en place de systèmes de prévention, de vaccination et de confinement en réponse aux données collectées, favorisant ainsi une approche collaborative pour anticiper les besoins en prévention et en traitement, et répondre de manière ciblée aux défis de santé émergents et ré-émergents.

Références

1. McMichael AJ, Woodruff RE, Hales S. Climate change and human health: present and future risks. *Lancet* 2006;367:859-69.
2. Chastel, C. *Changements climatiques et maladies infectieuses Climate change and infectious diseases que doit-on entendre par "changements climatiques"*
3. MATE, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'environnement (Ministry of Land Planning and Environment). Rapport sur la stratégie de lutte contre les changements climatiques, 2010, Algiers
4. Sahnoune, F., et al. « Climate Change in Algeria: Vulnerability and Strategy of Mitigation and Adaptation ». *Energy Procedia*, vol. 36, 2013, p. 1286-94, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.145>
5. Lévi, Y. (2020). Les considérables progrès de la santé environnementale. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 204, 1061-1068. Disponible en ligne sur ScienceDirect.
6. D'Amato G, Bergmann KC, Cecchi L, Annesi-Maesano I, Sanduzzi A, Liccardi G, et al. Climate change and air pollution: effects on pollen allergy and other allergic respiratory diseases. *Allergo J Int* 2014;23:17–23.
7. Schlienger, Jean-Louis. « Petite histoire de l'épidémiologie de l'Antiquité à nos jours ». *Médecine des Maladies Métaboliques*, vol. 16, n° 2, 2022, p. 191-99, <https://doi.org/10.1016/j.mmm.2021.11.006>
8. Hethcote, H. W. (2008). *THE BASIC EPIDEMIOLOGY MODELS: MODELS, EXPRESSIONS FOR R 0 , PARAMETER ESTIMATION, AND APPLICATIONS*. <http://www.worldscibooks.com/mathematics/7020.html>
9. Indhumathi, K., et K. Sathesh Kumar. « A review on prediction of seasonal diseases based on climate change using big data ». *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, 2021, p. 2648-52, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.517>.
10. Steverding, Dietmar. « The history of leishmaniasis ». *Parasites & Vectors*, vol. 10, n° 1, février 2017, p. 82, <https://doi.org/10.1186/s13071-017-2028-5>.
11. Lysenko AJ. Distribution of leishmaniasis in the Old World. *Bull World Health Organ*. 1971;44:515–20.
12. Organisation Mondiale de la Santé (OMS). (2010). La lutte contre les leishmanioses. Rapport du Comité OMS d'experts de la lutte contre les leishmanioses, OMS Série de rapports techniques n°949. Genève.
13. OMS. (2024). Leishmaniose. Consulté le 6 juin 2024, sur <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/leishmaniasis>
14. Eddaikra N, Kherachi Djenad I, Benbetka S, Benikhlef R, Aït-Oudhia K, Moulti-Mati F, Oury B, Sereno D, Harrat Z. Development of a Murine Infection Model with *Leishmania killicki*, Responsible for Cutaneous Leishmaniasis in Algeria: Application in Pharmacology. *Biomed Res Int*. 2016;2016:7985104. doi: 10.1155/2016/7985104. Epub 2016 Feb 2. PMID: 26949705; PMCID: PMC4754473.

Références

15. Djerbouh A, Toudjine M, Djoudi M, Benikhlef R, Harrat Z. (2005). La leishmaniose canine en Algérie : essai de traitement par l'allopurinol. Article original. *Ann. MedVet.*2005,149,132-134p
16. Harrat, Z., et al. "Current point of leishmaniasis epidemiology in Algeria." *Bulletin de la Societe de Pathologie Exotique* (1990) 88.4 (1995): 180-184.
17. Harrat, Z., et al. "Leishmania infantum and L. major in Algeria." *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 90.6 (1996): 625-629.
18. FRAHTIA-BENOTMANE, K., S. PICOT, and I. MIHOUBI. "Decreased rate of Leishmania infected Phlebotomus captured in Constantine (Algeria) from 2011 to 2013." *International Journal of Advanced Research* 2.11 (2014): 347-351.
19. Noyes H. Implication of a Neotropical origin of the genus Leishmania. *Mem Inst Oswaldo Cruz.* 1998;93:657–61.
20. Saadene, Y., Salhi, A., Mliki, F., & Bouslama, Z. (2023). Climate change and cutaneous leishmaniasis in the province of Ghardaïa in Algeria: A model-based approach to predict disease outbreaks. *Annals of Saudi Medicine*, 43(5), 263-276. <https://doi.org/10.5144/0256-4947.2023.263>
21. Ashford, Richard W. "The leishmaniasis as emerging and reemerging zoonoses." *International journal for parasitology* 30.12-13 (2000): 1269-1281.
22. Desjeux, Phillipe, and Jorge Alvar. "Leishmania/HIV co-infections: epidemiology in Europe." *Annals of Tropical Medicine & Parasitology* 97.sup1 (2003): 3-15.
23. Lysenko AJ. Distribution of leishmaniasis in the Old World. *Bull World Health Organ.* 1971;44:515–20.
24. Lainson R, Shaw JJ. Evolution, classification and geographical distribution. In: Peters W, Killick-Kendrick R, editors. *The Leishmaniasis in Biology and Medicine*, Vol. 1. Biology and Epidemiology. London: Academic; 1987. p. 1–120.
25. Noyes H. Implication of a Neotropical origin of the genus Leishmania. *Mem Inst Oswaldo Cruz.* 1998;93:657–61.
26. Momen H, Cupolillo E. Speculations on the origin and evolution of the genus Leishmania. *Mem Inst Oswaldo Cruz.* 2000;95:583–8.
27. Manson-Bahr PEC. Old World leishmaniasis. In: Cox FEG, editor. *The Wellcome Trust Illustrated History of Tropical Diseases*. London: The Wellcome Trust; 1996. p. 206–17.
28. Organisation mondiale de la Santé (OMS). Carte de la distribution de la leishmaniose viscérale dans le monde. Genève : OMS ; [Novembre 2023]. Disponible sur : <https://www.who.int/data/gho/map-gallery-search-results?&maptopics=910b5dfc-ce2e-4440-8b43-8d83f4a85485&term=leishmaniasis>
29. Russell A. *The Natural History of Aleppo, and Parts Adjacent*. London: A. Millar; 1756. p. 262–6.
30. Ross R. Note on the bodies recently described by Leishman and Donovan. *Br Med J.* 1903;2:1261–2.
31. Leishman WB. On the possibility of the occurrence of trypanosomiasis in India. *Br Med J.* 1903;1:1252–4.
32. Ross R. Further notes of Leishman's bodies. *Br Med J.* 1903;2:1401.
33. Adler S, Ber M. The transmission of Leishmania tropica by the bite of Phlebotomus papatasi. *Ind J Med Res.* 1941;29:803–9.

34. Hamel H (1860) Étude comparée des boutons d'Alep et de Biskra. Recl Mem Med Chir Pharm Mil 4:314–39.
35. Sergent E, Gueidon E (1923) Chronique du Bouton d'Orient en Algérie, le « clou de Mila ». Arch Inst Pasteur Alger 1:1–3.
36. Organisation mondiale de la Santé (OMS). Carte de la distribution de la leishmaniose cutanée dans le monde. Genève : OMS ; [Novembre 2023]. Disponible sur : <https://www.who.int/data/gho/map-gallery-search-results?&maptopics=910b5dfc-ce2e-4440-8b43-8d83f4a85485&term=leishmaniasis>
37. Institut National de Santé Publique. (2017). Relevés Epidémiologiques Mensuels: Situation épidémiologique de l'année 2017 sur la base des cas déclarés à l'I.N.S.P. (Vol. XXVIII Annuel). <https://www.insp.dz/images/PDF/Epidemio/REM%20annuel2017f.pdf>
38. F. Bachi, "Épidémiologie de la leishmaniose cutanée en Algérie à travers la caractérisation moléculaire," Bulletin de la société de pathologie exotique, vol. 112, no. 3, pp. 147-152, 2019. DOI: 10.3166/bspe-2019-0087.
39. Akhoundi M, Kuhls K, Cannet A, Votýpka J, Marty P, Delaunay P, Sereno D. A historical overview of the classification, evolution, and dispersion of Leishmania parasites and sandflies. PLoS Negl Trop Dis. 2016;10:e0004349.
40. Dedet, J.P. (2008). Thérapeutique des leishmanioses. 19 novembre 2008.
41. 22) Levine N.D., Corliss J.O., Cox F.F.G., Deroux G., Grain J., Honigberg B.M., Leedale G.F., Loeblich A.R., Lom J., Lynn D., Merinfeld E.G., Page F.C., Poljansky G., Sprague V., Vavra J. & Wallace F. G. 1980- A newly revised classification of the Protozoa. J. Protozool. 27. 37-58
42. Adl S.M., Simpson A.G.B., Farmer M.A., Andersen R.A., Andersen O.R., Barta J.R., Bowser S.S., Brugerolle G., Fensome R.A., Frederiq S., James T.Y., Karpov S., Kugrens P., Krug J., Lane C.E., Lewis L.A, Lodge J., Lynn D.H., Mann D.G., Mccourt R.M., Mendoza L., Moestrup O., Mozley-Standridge S., Nerad T.A., Shearer C.A., Smirnov A.V., Spiegel F. & Taylor M.F.J.R. 2005- The New Higher Level Classification of Eukaryotes with Emphasis on the Taxonomy of Protists. J. Eukaryot. Microbiol. 52, 399-451.
43. Maroli M, Feliciangeli MD, Bichaud L, Charrel RN, 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, doi: 10.1111/j.1365-2915.2012.01034.
44. Cupolillo E, Pereira LO, Fernandes O, Catanho MP, Pereira JC, Medina-Acosta E, Grimaldi Jr G (1998) Genetic data showing evolutionary links between Leishmania and Endotrypanum. Memórias do Instituto Oswaldo Cruz 93(5): 677–683.
45. Simpson L (1987) The Mitochondrial Genome of Kinetoplastid Protozoa: Genomic Organization, Transcription, Replication, and Evolution. Annual Review of Microbiology 41(1): 363–380, doi: 10.1146/annurev.mi.41.100187.002051
46. Roberts L.S. & Janovy J.J. 2009- Gerald D. Schmidt & Larry S. Roberts' Foundations of Parasitology. McGraw-Hill Higher Education, Boston.
47. Rogers MB, Hilley JD, Dickens NJ, Wilkes J, Bates PA, Depledge DP, Harris D, Her Y, Herzyk P, Imamura H (2011) Chromosome and gene copy number variation

- allow major structural change between species and strains of *Leishmania*. *Genome research* 21(12): 2129–2142, doi: 10.1101/gr.122945.111
48. Real F, Vidal RO, Carazzolle MF, Mondego JMC, Costa GGL, Herai RH, Würtele M, De Carvalho LM, Ferreira RC e, Mortara RA (2013) The genome sequence of *Leishmania (Leishmania) amazonensis*: functional annotation and extended analysis of gene models. *DNA research* 20(6): 567–581, doi: 10.1093/dnares/dst031
 49. Llanes A, Restrepo CM, Del Vecchio G, Anguizola FJ, Leonart R (2015) The genome of *Leishmania panamensis*: insights into genomics of the *L. (Viannia)* subgenus. *Scientific reports* 5: 8550, doi: 10.1038/srep08550.
 50. Sterkers Y, Lachaud L, Crobu L, Bastien P, Pagès M (2011) FISH analysis reveals aneuploidy and continual generation of chromosomal mosaicism in *Leishmania major*. *Cellular Microbiology* 13(2): 274–283, doi: 10.1111/j.1462-5822.2010.01534.x
 51. Forme Promastigote des parasites *Leishmania* - Crédit : KATERYNA KON / SCIENCE PHOTO LIBRARY. Image numéro F018/3336. Royalty Free.
 52. KATERYNA KON / SCIENCE PHOTO LIBRARY. Image numéro F019/2559. Royalty Free.
 53. Antoine, J.C., Lang, T., Prina, E., Courret, N., Hellio, R. (1999). H-2M molecules, like MHC class II molecules, are targeted to parasitophorous vacuoles of *Leishmania*-infected macrophages and internalize by amastigotes of *L. amazonensis* and *L. mexicana*. *J Cell Sci.*, 112 : 2559-70.
 54. Handman E. Leishmaniasis: current status of vaccine development. *Clin Microbiol Rev.* 2001 Apr;14(2):229-43. doi: 10.1128/CMR.14.2.229-243.2001. PMID: 11292637; PMCID: PMC88972.
 55. Handman E. Leishmaniasis: current status of vaccine development. *Clin Microbiol Rev.* 2001 Apr;14(2):229-43. doi: 10.1128/CMR.14.2.229-243.2001. PMID: 11292637; PMCID: PMC88972.
 56. Collange H.(2011). Contribution à l'étude du repas sanguin de *Phlebotomus perniciosus* (Diptera:Psychodidae) ,Thèse doc, Ecole nationale veterinaire de Toulouse,20-22p.
 57. Astre - Animal, Santé, Territoires, Risques et Ecosystèmes. Projet Infravec2 : Nouveaux outils de recherche sur les insectes vecteurs. Publié le 17/07/2018. Disponible sur : [lien vers la page]. Auteur : Karine HUBER, Entomologiste médical, Campus international de Baillarguet, Montpellier, France. © Cirad, 2018.
 58. Gentilini, M. & Duflo, B. & al. (1986). Les leishmanioses. In : médecine Tropicale ; Paris : Editions Flammarion. P 125-133.
 59. Abonnenc E. Les phlébotomes de la région éthiopienne (Diptera: Phlebotomidae). *Mémoire de l'ORSTOM.* 1972 ; 55 : 1–289
 60. Adhami J. Anomalies morphologiques des phlébotomes (Diptera: Psychodidae) d'Albanie. *SSMTP.* 1991 ; 33 : 169-173
 61. Abonnenc E (1972) Les phlébotomes de la région éthiopienne (Diptera, Psychodidae). *Cahiers de l'ORSTOM, série Entomologie médicale et Parasitologie* 55: 1–289.
 62. Adler S, Ber M.- The transmission of *Leishmania tropica* by the bite of *P. papatasi*. *Znd. J. med.Res.* 1941 ; 29 : 803-809

63. E. Abonnenc, Les phlébotomes de la région Ethiopienne, Orstom (Paris) 1972 (vol. 55), pp. 37-54
64. Killick-Kendrick R (1999) The biology and control of phlebotomine sand flies. *Clinics in dermatology* 17(3): 279–289, doi: 10.1016/s0738-081x(99)00046-2
65. Kasap OE, Alten B (2006) Comparative demography of the sand fly *Phlebotomus papatasi* (Diptera: Psychodidae) at constant temperatures. *Journal of Vector Ecology* 31(2): 378–385, doi: 10.3376/1081-1710(2006)31[378:CDOTSF]2.0.CO;2
66. Morrison AC, Ferro C, Morales A, Tesh RB, Wilson ML (1993) Dispersal of the sand fly *Lutzomyia longipalpis* (Diptera: Psychodidae) at an endemic focus of visceral leishmaniasis in Colombia. *Journal of Medical Entomology* 30(2): 427–435, doi: 10.1093/jmedent/30.2.427
67. Killick-Kendrick R, Killick-Kendrick M (1987) Honeydew of aphids as a source of sugar for *Phlebotomus ariasi*. *Medical and Veterinary Entomology* 1(3): 297–302, doi: 10.1111/j.1365-2915.1987.tb00358.x
68. Cecílio, P., Cordeiro-da-Silva, A., & Oliveira, F. (2022). Sand flies: Basic information on the vectors of leishmaniasis and their interactions with *Leishmania* parasites. In *Communications Biology* (Vol. 5, Issue 1). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03240-z>
69. Foley, H. & Leduc, H. (1912). Phlébotomes dans le sud-oranais. Accidents simplement locaux dûs à leurs piqûres. *Bull. Soc. Path. exot.*, 5 : 511-513.
70. Parrot, L., Donatien, A. & Lestoquard, F. (1930). Sur le développement de la leishmaniose canine viscérale chez *Phlebotomus major* var. *perniciosus* Newstead. *Bull. Soc. Path. exot.*, 23 : 724-725.
71. Sergent, E.D. (1914). Première note sur les Phlébotomes algériens. *Bull. Soc. Path. exot.*, 7 : 660-662.
72. DEDET, J.-P., ADDADI, K., BELAZZOUG, S., DIB, D., KNIDLER, B., & TOUAMI, M. (1984). Les phlébotomes (Diptera, Psychodidae) d'Algérie. *Cahiers O.R.S.T.O.M., série Entomologie médicale et Parasitologie*, XXI-II(2), 99-127.
73. Boubidi, S. C., Benallal, K., Boudrissa, A., Bouiba, L., Bouchareb, B., Garni, R., Bouratbine, A., Ravel, C., Dvorak, V., Votypka, J., Volf, P., & Harrat, Z. (2011). *Phlebotomus sergenti* (Parrot, 1917) identified as *Leishmania killicki* host in Ghardaïa, south Algeria. *Microbes and Infection*, 13(7), 691–696. <https://doi.org/10.1016/j.micinf.2011.02.008>
74. Infestation importante par des corps de *Leishmania* dans un prélèvement de moelle osseuse - 1. Auteur : Abbas Hashim ; Nafila Sabeeh. Numéro d'image : #00003925. Catégorie : Maladie infectieuse
75. Tarrouche O, Aouadi C. (2019). Les leishmanioses en Algérie, Master en Mycologie et Biotechnologie Fongique, Constantine.
76. Dereure J. (1999). Réservoirs de leishmanies. *Ellipses* In: DEDET J.P (1999), *Les leishmanioses*, Editions Ellipses, 109-130p.
77. Cecílio, P., Cordeiro-da-Silva, A., & Oliveira, F. (2022). Sand flies: Basic information on the vectors of leishmaniasis and their interactions with *Leishmania* parasites. In *Communications Biology* (Vol. 5, Issue 1). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03240-z>
78. Garnham P.C.C. 1965- The *Leishmania*, with special references to the role of animal reservoir. *Am. Zool.* 5. 141-151

79. Mazelet L. 2004- La Leishmaniose canine dans le bassin méditerranéen français. Mémoire de Maîtrise de Biologie des Populations et des Ecosystèmes. Université Pierre et Marie Curie, PARIS VI. 31p.
80. Musser G.G., Carleton M.D. (1993): Mammal species of the world, a taxonomic and geographic reference, Second ed. (D. E. Wilson and D. M. Reeder, eds.). Smithsonian Institution Press, Washington D.C. 1206 p. 501-755
81. Rudloff, Klaus. 2020. "Psammomys obesus - Rat des sables obèse" [Psammomys obesus Cretzschmar, 1828 - Rat des sables obèse]. Photographie. BioLib. <http://www.biolib.cz>.
82. Garni, R., Tran, A., Guis, H., Baldet, T., Benallal, K., Boubidi, S., & Harrat, Z. (2014). Remote sensing, land cover changes, and vector-borne diseases: Use of high spatial resolution satellite imagery to map the risk of occurrence of cutaneous leishmaniasis in Ghardaïa, Algeria. *Infection, Genetics and Evolution*, 28, 725–734. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2014.09.036>
83. Rogers D. J., (1988): A general model for African Trypanosomiasis *Parasitology*, 10, 193-212p.
84. Vélez ID, Carrillo LM, Cadena H, Muskus C, Robledo SM (2017) Application of the Eco-Epidemiological Method in the Study of Leishmaniasis Transmission Foci. In: Claborn D (ed), *The Epidemiology and Ecology of Leishmaniasis*. InTech, , doi: 10.5772/66430
85. Rotureau B (2006b) Ecology of the Leishmania species in the Guianan ecoregion complex. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 74(1): 81–96, doi: 10.4269/ajtmh.2006.74.81
86. Vasconcelos dos Santos T, Prévot G, Ginouvès M, Duarte R, Silveira FT, Póvoa MM, Rangel EF (2018) Ecological aspects of Phlebotomines (Diptera: Psychodidae) and the transmission of American cutaneous leishmaniasis agents in an Amazonian/ Guianan bordering area. *Parasites & Vectors* 11(1): 612, doi: 10.1186/s13071-018-3190-0
87. Blaustein L, Ostfeld RS, Holt RD (2010) A Community-Ecology Framework for Understanding Vector and Vector-Borne Disease Dynamics. *Israel Journal of Ecology & Evolution* 56(3–4): 251–262, doi: 10.1560/IJEE.56.3-4.251
88. Müller GC, Kravchenko VD, Rybalov L, Schlein Y (2011) Characteristics of resting and breeding habitats of adult sand flies in the Judean Desert. *Journal of Vector Ecology* 36(s1): S195–S205, doi: 10.1111/j.1948-7134.2011.00131.
89. Harhay MO, Olliaro PL, Costa DL, Costa CHN (2011) Urban parasitology: visceral leishmaniasis in Brazil. *Trends in Parasitology* 27(9): 403–409, doi: 10.1016/j.pt.2011.04.001
90. Maroli M, Feliciangeli MD, Bichaud L, Charrel RN, 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, doi: 10.1111/j.1365-2915.2012.01034.x
91. De Freitas Rocha AT, Mira de Espindola G, Araujo Soares MR, De Ribamar de Sousa Rocha J, Nery Costa CH (2018) Visceral leishmaniasis and vulnerability conditions in an endemic urban area of Northeastern Brazil. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 112(7): 317–325, doi: 10.1093/trstmh/try058

92. Furtado NVR, Galardo AKR, Galardo CD, Firmino VC, Vasconcelos dos Santos T (2016) Phlebotomines (Diptera: Psychodidae) in a Hydroelectric System Affected Area from Northern Amazonian Brazil: Further Insights into the Effects of Environmental Changes on Vector Ecology. *Journal of Tropical Medicine* 2016: 1–12, doi: 10.1155/2016/9819723
93. Shaw J (2007) The leishmaniasis—survival and expansion in a changing world. A mini-review. *Memorias Do Instituto Oswaldo Cruz* 102(5): 541–547, doi: 10.1590/s0074-02762007000500001
94. Salomón OD, Quintana MG, Zaidenberg M (2008) Urban distribution of Phlebotominae in a cutaneous leishmaniasis focus, Argentina. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz* 103(3): 282–287, doi: 10.1590/S0074-027620080005000016
95. Cardenas R, Sandoval CM, Rodriguez-Morales AJ, Franco-Paredes C (2006) Impact of climate variability in the occurrence of leishmaniasis in northeastern Colombia. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 75(2): 273–277, doi: 10.4269/ajtmh.2006.75.273
96. Moo-Llanes D, Ibarra-Cerdeña CN, Rebollar-Téllez EA, Ibáñez-Bernal S, González C, Ramsey JM (2013) Current and Future Niche of North and Central American Sand Flies (Diptera: Psychodidae) in Climate Change Scenarios. *PLOS Neglected Tropical Diseases* 7(9): e2421, doi: 10.1371/journal.pntd.0002421
97. Pigott DM, Bhatt S, Golding N, Duda KA, Battle KE, Brady OJ, Messina JP, Balard Y, Bastien P, Pratlong F (2014) Global distribution maps of the leishmaniasis. *Elife* 3: e02851, doi: 10.7554/eLife.02851
98. Carvalho BM, Rangel EF, Vale MM (2017) Evaluation of the impacts of climate change on disease vectors through ecological niche modelling. *Bulletin of Entomological Research* 107(04): 419–430, doi: 10.1017/S0007485316001097
99. Purse BV, Masante D, Golding N, Pigott D, Day JC, Ibañez-Bernal S, Kolb M, Jones L (2017) How will climate change pathways and mitigation options alter incidence of vector-borne diseases? A framework for leishmaniasis in South and Meso-America. *PLOS ONE* 12(10): e0183583, doi: 10.1371/journal.pone.0183583
100. Vélez ID, Carrillo LM, Cadena H, Muskus C, Robledo SM (2017) Application of the Eco-Epidemiological Method in the Study of Leishmaniasis Transmission Foci. In: Claborn D (ed), *The Epidemiology and Ecology of Leishmaniasis*. InTech, , doi: 10.5772/66430
101. Palatnik-de-Sousa CB, Day MJ (2011) One Health: The global challenge of epidemic and endemic leishmaniasis. *Parasites & Vectors* 4(1): 197, doi: 10.1186/1756-3305-4-197
102. Abid, P. L. (n.d.). *La couverture sanitaire de la wilaya de Ghardaïa*.
103. BENYOUCEF B. (2004), *Le M'zab : Les pratiques de l'espace*, Alger, Entreprise nationale du livre.
104. Harrat, Z., Chawki, S., Pratlong, F., Benikhlef, R., Selt, B., Pierre, J., Ravel, C., & Belkaid, M. (2009). Description of a dermatropic *Leishmania* close to *L. killicki* (Rioux, Lanotte & Pratlong 1986) in Algeria. 716–720. <https://doi.org/10.1016/j.trstmh.2009.04.013>
105. Garni, Rafik; Tran, Annelise; Guis, Hélène; Baldet, Thierry; Benallal, Kamel; Boubidi, Said; Harrat, Zoubir (2014). Remote sensing, land cover changes, and

- vector-borne diseases: Use of high spatial resolution satellite imagery to map the risk of occurrence of cutaneous leishmaniasis in Ghardaïa, Algeria. *Infection, Genetics and Evolution*, 28(), 725–734. doi:10.1016/j.meegid.2014.09.036
106. <https://en.tutiempo.net/climate/ws-605660.html>
 107. <https://land.copernicus.vgt.vito.be/PDF/portal/Application.html#Browse;Rot=513186;Collection=1000321;Time=NORMAL,NORMAL,-1,,-1>
 108. T. Hastie, R. Tibshirani, *Generalized Additive Models*. London: Chapman & Hall, 1990.
 109. Aidoo, E. N., Adebajji, A. O., Awashie, G. E., & Appiah, S. K. (2021). The effects of weather on the spread of COVID-19: evidence from Ghana. *Bulletin of the National Research Centre*, 45(1). <https://doi.org/10.1186/s42269-021-00484-3>
 110. Pedersen, E. J., Miller, D. L., Simpson, G. L., & Ross, N. (2019). Hierarchical generalized additive models in ecology: An introduction with mgcv. *PeerJ*, 2019(5). <https://doi.org/10.7717/peerj.6876>
 111. Ma, W., Sun, X., Song, Y., Tao, F., Feng, W., He, Y., & Zhao, N. (2013). Applied Mixed Generalized Additive Model to Assess the Effect of Temperature on the Incidence of Bacillary Dysentery and Its Forecast. 8(4), 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062122>
 112. Khouloud, T., Hedia, B., Nissaf, B.-A., Marc, S., Dhafer, M., & Kouni, C. M. (2017). Comparative Performance Analysis for Generalized Additive and Generalized Linear Modeling in Epidemiology Methods of Evaluation for Modeling Disease Incidence. In *IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications* (Vol. 8, Issue 12). www.ijacsa.thesai.org
 113. S. N. Wood, *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. New York: Chapman & Hall/CRC, 2006
 114. S. N. Wood, *Generalized Additive Models: An Introduction with R*, 2nd edition. Chapman & Hall/CRC press. Taylor & Francis, 2017
 115. Ma, W., Sun, X., Song, Y., Tao, F., Feng, W., He, Y., & Zhao, N. (2013). Applied Mixed Generalized Additive Model to Assess the Effect of Temperature on the Incidence of Bacillary Dysentery and Its Forecast. 8(4), 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062122>
 116. S. N. Wood, N. Pya, B. Säfken, "Smoothing Parameter and Model Selection for General Smooth Models," *Journal of the American Statistical Association*, 2016; 111(516): 1548-1575
 117. R Development Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, V., Austria. 2015.
 118. Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). *Applied predictive modeling*. Springer.
 119. Environmental covariates: Al-Salem, W., Pigott, D., Subramaniam, K., Haines, L., Kelly-Hope, L., Molyneux, D., & Hay, S. (2019). Cutaneous leishmaniasis and conflict in Syria. *Emerging Infectious Diseases*, 25(4), 613-615. <https://doi.org/10.3201/eid2504.181581>; Ready, P. D. (2013). 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>
 120. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
 121. Toumi A, Chlif S, Bettaieb J, Alaya NB, Boukthir A, Ahmadi ZE, Salah AB. Temporal dynamics and impact of climate factors on the incidence of Zoonotic

- Cutaneous Leishmaniasis in central Tunisia. *PLoS Neglected Tropical Diseases*. 2012;6(5).
122. Jones TC, Johnson WD Jr, Barretto AC, Lago E, Badaro R, Cerf B, Reed SG, Netto EM, Tada MS, Franca TF. Epidemiology of American cutaneous leishmaniasis due to *Leishmania braziliensis*. *J Infect Dis*. 1987 Jul;156(1):73-83.
 123. Jones TC, Johnson WD Jr, Barretto AC, Lago E, Badaro R, Cerf B, Reed SG, Netto EM, Tada MS, Franca TF. Epidemiology of American cutaneous leishmaniasis due to *Leishmania braziliensis*. *J Infect Dis*. 1987 Jul;156(1):73-83.
 124. Wijerathna T, Gunathilaka N. Time series analysis of leishmaniasis incidence in Sri Lanka: evidence for humidity-associated fluctuations. *Int J Biometeorol*. 2023;67:275-284. doi:10.1007/s00484-022-02404-0.
 125. Talbi FZ, El Ouali Lalami A, Fadil M, Najy M, Ech-Chafay H, Lachhab M, Lotfi S, Nouayti N, Lahouiti K, Faraj C, Janati Idrissi A. Entomological Investigations, Seasonal Fluctuations and Impact of Bioclimate Factors of Phlebotomines Sand Flies (Diptera: Psychodidae) of an Emerging Focus of Cutaneous Leishmaniasis in Aichoun, Central Morocco. *J Parasitol Res*. 2020;2020:6495108.
 126. Selmane S. Dynamic relationship between climate factors and the incidence of cutaneous leishmaniasis in Biskra Province in Algeria. *Annals of Saudi Medicine*. 2015;35(6):445-449.
 127. Hosseini SH, Allah-Kalteh E, Sofizadeh A. The Effect of Geographical and Climatic Factors on the Distribution of *Phlebotomus papatasi* (Diptera: Psychodidae) in Golestan Province, an Endemic Focus of Zoonotic Cutaneous Leishmaniasis in Iran, 2014. *J Arthropod Borne Dis*. 2021 Jun 30;15(2):225-235. PMID: 35111860; PMCID: PMC8782746.
 128. Kasap OE, Alten B. Comparative demography of the sand fly *Phlebotomus papatasi* (Diptera: Psychodidae) at constant temperatures. *J Vector Ecol*. 2006 Dec;31(2):378-385.
 129. Simsek FM, Alten B, Caglar SS, Ozbel Y, Aytakin AM, Kaynas S, Belen A, Kasap OE, Yaman M, Rastgeldi S. Distribution and altitudinal structuring of phlebotomine sandflies (Diptera: Psychodidae) in southern Anatolia, Turkey: their relation to human cutaneous leishmaniasis. *J Vector Ecol*. 2007 Dec;32(2):285-291.
 130. Kasap OE, Alten B. Laboratory estimation of degree-day developmental requirements of *Phlebotomus papatasi* (Diptera: Psychodidae). *J Vector Ecol*. 2005 Dec;30(2):328-333.
 131. Fichet-Calvet E, Jomaa I, Ben Ismail R, Ashford RW. *Leishmania* major infection in the fat sand rat *Psammomys obesus* in Tunisia: interaction of host and parasite populations. *Ann Trop Med Parasitol*. 2003 Oct;97(7):593-603.
 132. Ramezankhani R, Sajjadi N, Esmaeilzadeh RN, Jozi SA, Shirzadi MR. Application of decision tree for prediction of cutaneous leishmaniasis incidence based on environmental and topographic factors in Isfahan province, Iran. *Geospatial Health*. 2018;13(1):172-178.
 133. Sofizadeh A, Rassi Y, Vatandoost H, Hanafi-Bojd AA, Mollalo A, Rafizadeh S, Akhavan AA. Predicting the Distribution of *Phlebotomus papatasi* (Diptera: Psychodidae), the Primary Vector of Zoonotic Cutaneous Leishmaniasis, in

- Golestan Province of Iran Using Ecological Niche Modeling: Comparison of MaxEnt and GARP Models. *J Med Entomol.* 2017 Mar;54(2):312-320. doi: 10.1093/jme/tjw178.
134. Mollalo A, Alimohammadi A, Shahrivand M, Reza Shirzadi M, Reza Malek M. Spatial and statistical analyses of the relations between vegetation cover and incidence of cutaneous leishmaniasis in an endemic province, northeast of Iran. *Asian Pac J Trop Dis.* 2014;4(3):176-180.
 135. Romo Bechara N, Wasserberg G, Raymann K. Microbial ecology of sand fly breeding sites: aging and larval conditioning alter the bacterial community composition of rearing substrates. *Parasit Vectors.* 2022;15(1).
 136. Šlapeta J. Sand flies of animals. In: *Merck Veterinary Manual (Professional Version)*. Last review/revision Aug 2022 | Modified Oct 2022. Retrieved May 12, 2023.
 137. Ali-Akbarpour M, Mohammadbeigi A, Tabatabaee SHR, Hatam G. Spatial analysis of eco-environmental risk factors of cutaneous leishmaniasis in southern Iran. *J Cutan Aesthet Surg.* 2012;5:30-35.
 138. Wu X, Lu Y, Zhou S, Chen L, Xu B. Impact of climate change on human infectious diseases: Empirical evidence and human adaptation. *Environ Int.* 2016;86:14-23.
 139. Bhattacharya PK, Burman P. Linear Models. In: Bhattacharya PK, Burman P, editors. *Theory and Methods of Statistics*. Academic Press; 2016. p. 309-382. ISBN 9780128024409.
 140. Chowdhury MZI, Turin TC. Variable selection strategies and its importance in clinical prediction modelling. *Fam Med Community Health.* 2020 Feb 16;8(1):e000262. doi: 10.1136/fmch-2019-000262. PMID: 32148735; PMCID: PMC7032893.
 141. Depaquit J, Grandadam M, Fouque F, Andry PE, Peyrefitte C, Kamhawi S. Arthropod-borne viruses transmitted by phlebotomine sandflies in Europe: a review. *Eurosurveillance.* 2009;14(40):19330.
 142. Chaves LF, Calzada JE, Valderrama A, Saldaña A. Cutaneous Leishmaniasis and Sand Fly Fluctuations Are Associated with El Niño in Panamá. *PLoS Negl Trop Dis.* 2014;8(10).
 143. Adegboye OA, Adegboye M. Spatially correlated time series and ecological niche analysis of cutaneous leishmaniasis in Afghanistan. *Int J Environ Res Public Health.* 2017;14(3).
 144. Khezzani B, Bouchemal S. Demographic and spatio-temporal distribution of cutaneous leishmaniasis in the Souf oasis (Eastern South of Algeria): Results of 13 years. *Acta Trop.* 2017;166:74-80.
 145. Bounoua L, Kahime K, Houti L, Blakey T, Ebi KL, Zhang P, Imhoff ML, Thome KJ, Dudek C, Sahabi SA, Messouli M, Makhlof B, el Laamrani A, Boumezzough A. Linking climate to incidence of zoonotic cutaneous leishmaniasis (*L. major*) in pre-Saharan North Africa. *Int J Environ Res Public Health.* 2013 Aug;10(8):3172-3191.
 146. Spatiotemporal projections of extreme Temperatures over Algeria using CMIP6-MME global climate models outputs. https://www.researchgate.net/publication/375462040_Spatiotemporal_projections

- [of extreme Temperatures over Algeria using CMIP6-MME global climate models outputs.](#)
147. Wahab Wahid, Benali Abdel, et al. « Strategy Efficiency to Control Meriones Shawi (Duvernoy, 1842) (Rodentia Gerbillinae) Infestation in Tiaret Region during the Period (2015–2020), Algeria ». *Biodiversity Journal*, vol. 12, n° 4, décembre 2021, p. 805-10. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.31396/Biodiv.Jour.2021.12.4.805.810>.
 148. Bouzid M, Colón-González FJ, Lung T, Lake IR, Hunter PR. Climate change and the emergence of vector-borne diseases in Europe: case study of dengue fever. *BMC Public Health*. 2014 Aug 22;14:781. doi: 10.1186/1471-2458-14-781. PMID: 25149418; PMCID: PMC4143568.
 149. Jeanne L, Bourdin S, Nadou F, Noiret G. Economic globalization and the COVID-19 pandemic : global spread and inequalities. *GeoJournal*. (2022). Doi : 10.1007/s10708-022-10607-6. [Epub ahead of print]
 150. Dong, E ; Du, H. ; Gardner, L. An interactive web-based dashboard to track COVID- 19 in real time. *Lancet. Infect. Dis.*2020, 20,533-534. [CrossRef].
 151. Mehtar S, Preiser W, Lakhe NA, Bousso A, TamFum JMM, Kallay O, et al. Limiting the spread of COVID-19 in Africa : one size mitigation strategies do not fit all countries. *Lancet Global Health*. (2020) 8 :e881–3. Doi : 10.1016/S2214-109X(20)30212-6
 152. *Le système de santé Algérien face à la crise sanitaire du Covid-19 à Oran ABDERRAHMANE Djoher.* (n.d.).
 153. *Rapport économique Algérie août 2020-août 2021 0 Résumé.* (n.d.).
 154. World Health Organization Rational Use of Personal Protective Equipment for Coronavirus Disease (COVID-19) : Interim Guidance, 27 February 2020 ; World Health Organization, 2020.
 155. Stevens, N.J. ; Tavares, S.G. ; Salmon, P.M. The Adaptive Capacity of Public Space under COVID-19 : Exploring Urban Design Interventions through a Sociotechnical Systems Approach. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* 2021, 31, 333–348.
 156. Sun, C. ; Zhai, Z. The Efficacy of Social Distance and Ventilation Effectiveness in Preventing COVID-19 Transmission.
 157. Haider N, Osman AY, Gadzekpo A, Akipede GO, Asogun D, Ansumana R, et al. Lockdown measures in response to COVID-19 in nine sub-Saharan African countries. *BMJ Global Health*. (2020) 5 :e003319. Doi : 10.1136/bmjgh-2020-003319
 158. Lai S, Ruktanonchai NW, Zhou L, Prosper O, Luo W, Floyd JR, et al. Effect of non- pharmaceutical interventions to contain COVID-19 in China. *Nature*. (2020) 585 :410–3. Doi : 10.1038/s41586-020-2293-x
 159. Zeigermann, Ulrike, et Michael Böcher. « Pandémie de Covid-19 : quelles implications pour le climat et pour la politique climatique locale ? », *Allemagne d'aujourd'hui*, vol. 239, no. 1, 2022, pp. 224-235.
 160. Wang, M., Jiang, A., Gong, L., Lu, L., Guo, W., Li, C., et al. (2020). Temperature Significantly Change COVID-19 Transmission in 429 cities *MedRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.02.22.20025791>

161. Luo, W., Majumder, M. S., Liu, D., Poirier, C., Mandl, K. D., Lipsitch, M., & Santillana, M. (2020). The role of absolute humidity on transmission rates of the COVID-19 outbreak. medRxiv. <https://doi.org/10.1101/2020.02.12.20022467>
162. Wang, J., & Du, G. (2020). COVID-19 may transmit through aerosol. Irish Journal of Medical Science, 189, 1143–1144. <https://doi.org/10.1007/s11845-020-02218-2>
163. Ahmadi, M., Sharifi, A., Dorosti, S., Jafarzadeh Ghouschi, S., & Ghanbari, N. (2020). 729, p. 138705. Science of The Total Environment Investigation of effective climatology parameters on COVID-19 outbreak in Iran. The Science of the Total Environment. 138705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138705>
164. Bashir, M. F., Ma, B. J., Bilal, K. B., Tan, D., & Bashir, M. A. (2020). Correlation between climate indicators and COVID-19 pandemic in New York, USA. Science of The Total Environment, 728, 138835.
165. Zoran, M. A., Savastru, R. S., Savastru, D. M., & Tautan, M. N. (2022). Impacts of exposure to air pollution, radon and climate drivers on the COVID-19 pandemic in Bucharest, Romania: A time series study. *Environmental Research*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113437>
166. Zhu, Y., Xie, J., Huang, F., & Cao, L. (2020). Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: Evidence from China. Science of the Total Environment, 727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138704>
167. L'organisation mondiale de la santé. https://www.who.int/fr/health-topics/coronavirus/coronavirus#tab=tab_1
168. Ortiz-Prado E., Simbaña-Rivera K., Gómez-Barreno L., Rubio-Neira M., Guaman L. P., Kyriakidis N. C., López-Cortés A. 2020. Clinical, molecular and epidemiological characterization of the SARS-CoV2 virus and the Coronavirus disease 2019 (COVID- 19), a comprehensive literature review. *Diagnostic microbiology and infectious disease*, 115094.
169. Zhou P., Yang X. L., Wang X. G., Zhang L., Zhang W., Chen H. D. 2020. A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin. *Nature* 579(7798) : 270-273
170. Bulut C., Kato Y. 2020. Epidemiology of COVID-19. *Turkish journal of medical sciences* 50(SI-1) : 563-570.
171. Goumenou M., Spandidos D.A., Tsatsakis A. 2020. Possibility of transmission through dogs being a contributing factor to the extreme Covid-19 outbreak in North Italy. *Molecular Medicine Reports* 21(6) : 2293-2295.
172. Ortiz-Prado E., Simbaña-Rivera K., Gómez-Barreno L., Rubio-Neira M., Guaman L. P., Kyriakidis N. C., López-Cortés A. 2020. Clinical, molecular and epidemiological characterization of the SARS-CoV2 virus and the Coronavirus disease 2019 (COVID- 19), a comprehensive literature review. *Diagnostic microbiology and infectious disease*, 115094.
173. COVID-19 Forecasting Team. Forecasting the trajectory of the COVID-19 pandemic into 2023 under plausible variant and intervention scenarios: a global modelling study. MedRxiv. 8 March 2023. doi: 10.1101/2023.03.07.23286952.
174. <https://www.insp.dz/index.php/publications/situation-epidemiologique-covid19.html>

175. National Center for Biotechnology Information (NCBI) Taxonomy Database. "Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) Taxonomy." Accessed [22/05/2024], [<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy/Browser/wwwtax.cgi?id=2697049>.]
176. Borok, M. (Institut Mondor de Recherche Biomédicale – Université Paris-Créteil). "Le Cycle Viral de SARS-CoV-2." Arbre des Connaissances. [<https://arbres-des-connaissances-apsr.org/le-cycle-viral-de-sars-cov-2/>]
177. *Organisation mondiale de la santé animale, INFECTION PAR LE SARS-COV-2 CHEZ LES ANIMAUX.* (n.d.).
178. Birgand G, Kerneis S, Lucet JC. Modes de transmission du SARS-CoV-2 : que sait-on actuellement ? [Modes of transmission of SARS-CoV-2 : what is the current evidence ?]. *Médecine et Maladies Infectieuses Formation.* 2022 Jan;1(1):2–12. French. doi: 10.1016/j.mmifmc.2021.11.001. Epub 2022 Jan 21. PMID: PMC8815781.
179. Moriyama, M., Hugentobler, W.J., Iwasaki, A., 2020. Seasonality of respiratory viral infections. *Annu. Rev. Virol.* 7 <https://doi.org/10.1146/annurev-virology-012420-022445>.
180. Bernhard GH, Madronich S, Lucas RM, Byrne SN, Schikowski T, Neale RE. Linkages between COVID-19, solar UV radiation, and the Montreal Protocol. *Photochem Photobiol Sci.* 2023 May;22(5):991-1009. doi: 10.1007/s43630-023-00373-w. Epub 2023 Mar 30. PMID: 36995652; PMID: PMC10062285.
181. Garg, A., Kumar, A., & Gupta, N. C. (2021). Comprehensive study on impact assessment of lockdown on overall ambient air quality amid COVID-19 in Delhi and its NCR, India. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2020.100010>
182. H. N. LE HOUEROU, J. CLAUDIN, M. POUGET. "Étude bioclimatique des steppes algériennes". *Bull. Soc. Hist. nat. Afr. Nord, Alger*, t. 68, fasc. 3 et 4, 1977
183. <https://nationsgeo.com/population/africa/dz/>
184. [Climate Portal](#)
185. <https://www.insp.dz/index.php/publications/situation-epidemiologique-covid19.html>
186. <https://en.tutiempo.net/climate/042022/ws-604250.html>
187. <https://www.aniref.dz/index.php/ar/2020-01-27-10-01-12>
188. Ahmed, K. A. A. (2022). Spearman's correlation coefficient in statistical analysis. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 13(1), 3249-3255)
189. APC Alger Centre- <https://www.apc-algercentre.dz/>
190. <https://www.me.gov.dz/fr/environnement-urbain/air/>
191. Merabet, H. (2020). Pollution atmosphérique par les particules dans la région MENA. Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), Division Bioénergie et Environnement. Retrieved from <https://www.healtheffects.org/sites/default/files/State-of-Global-Air-Press-Release-February-14-2017.pdf>
192. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
193. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI), U.S. EPA 454/B-18-007, Septembre 2018

194. <https://www.igair.com>.
195. Grange, S. K., et al. « Random forest meteorological normalisation models for Swiss \chemPM_10 trend analysis ». *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 18, n° 9, 2018, p. 6223-39, <https://doi.org/10.5194/acp-18-6223-2018>.
196. Grange, Stuart K., et David C. Carslaw. « Using meteorological normalisation to detect interventions in air quality time series ». *Science of The Total Environment*, vol. 653, 2019, p. 578-88, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.344>.
197. Jérémie Scire et al. (2020). estimateR: Estimate the Reproductive Number. <https://github.com/covid-19-Re/estimateR>
198. Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2004). *Applied Linear Statistical Models* (5th ed.). McGraw-Hill/Irwin, pp. 238-304.
199. A Brief Introduction to Monte Carlo Simulation par Peter L. Bonate, décrit cette méthode en détail. Vous pouvez vous référer aux pages spécifiques pour la méthodologie : Pages 22-26 : Explication de la méthodologie de Monte-Carlo et son application à la modélisation.
200. World Health Organization. (2022). WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard. Retrieved from <https://covid19.who.int/>
201. Naffeti B, Bourdin S, Ben Aribi W, Kebir A, Ben Miled S. Spatio-temporal evolution of the COVID-19 across African countries. *Front Public Health*. 2022 Nov 28;10:1039925. doi:10.3389/fpubh.2022.1039925. Disponible sur <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2022.1039925/full>
202. Dahmani A, Meddi M. Climate Variability and its Impact on Water Resources in the Catchment Area of Wadi Fekan Wilaya of Mascara (West Algeria). *European Journal of Scientific Research*. 2009 Oct;36(3):458-72.
203. Zhu J, Cheng H, Peng J, Zeng P, Wang Z, Lyu X, et al. O3 photochemistry on O3 episode days and non-O3 episode days in Wuhan, Central China. *Atmos Environ*. 2020;223:117236. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117236. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223101930874X>
204. Rosario, D. K. A., Mutz, Y. S., Bernardes, P. C., & Conte-Junior, C. A. (2020). Relationship between COVID-19 and weather: Case study in a tropical country. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113587>
205. Fawad, M., Mubarik, S., Malik, S. S., & Ren, J. (2021). Statistical analysis of COVID-19 infection caused by environmental factors: Evidence from Pakistan. *Life Sciences*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2021.119093>
206. Singh, K., & Agarwal, A. (n.d.). *Role of pollution and weather indicators in the COVID-19 outbreak: A brief study on Delhi, India*. <https://doi.org/10.1101/2021.01.04.21249249>
207. Haque, S. E., & Rahman, M. (2020). Association between temperature, humidity, and COVID-19 outbreaks in Bangladesh. *Environmental Science and Policy*, 114, 253–255. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.08.012>
208. Moriyama, M., Hugentobler, W.J., Iwasaki, A., 2020. Seasonality of respiratory viral infections. *Annu. Rev. Virol.* 7 <https://doi.org/10.1146/annurev-virology-012420-022445>

209. De Ángel Solá, D. E., Wang, L., Vázquez, M., & Méndez-Lázaro, P. A. (2020). Weathering the pandemic: How the Caribbean Basin can use viral and environmental patterns to predict, prepare, and respond to COVID-19. In *Journal of Medical Virology* (Vol. 92, Issue 9, pp. 1460–1468). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/jmv.25864>
210. Martelletti, L., Martelletti, P., 2020. Air pollution and the novel covid-19 disease: a putative disease risk factor. *Sn compr. Clin. Med.* 1–5. <https://doi.org/10.1007/s42399-020-00274-4>.
211. Ogen, Y., 2020. Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. *Sci. Total Environ.* 726, 138605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138605>
212. Jiang, S., Huang, L., Chen, X., Wang, J., Wu, W., Yin, S., Chen, W., Zhan, J., Yan, L., Ma, L., Li, J., Huang, Z., 2003. Ventilation of wards and nosocomial outbreak of severe acute respiratory syndrome among healthcare workers. *Chin. Med. J.* 116, 1293–1297.
213. Aidoo, E. N., Adebajji, A. O., Awashie, G. E., & Appiah, S. K. (2021). The effects of weather on the spread of COVID-19: evidence from Ghana. *Bulletin of the National Research Centre*, 45(1). <https://doi.org/10.1186/s42269-021-00484-3>
214. Şahin M (2020) Impact of weather on COVID-19 pandemic in Turkey. *Sci Total Environ* 2020:138810
215. Menebo MM (2020) Temperature and precipitation associate with Covid-19 new daily cases: a correlation study between weather and Covid-19 pandemic in Oslo, Norway. *Sci Total Environ* 2020:139659
216. Ahmadi M, Sharif A, Dorosti S, Ghouschi SJ, Ghanbari N (2020) Investigation of efective climatology parameters on COVID-19 outbreak in Iran. *Sci Total Environ* 729:138705
217. Rosario DK, Mutz YS, Bernardes PC, Conte-Junior CA (2020) Relationship between COVID-19 and weather: case study in a tropical country. *Int J Hygiene Environ Health* 2020:113587
218. Malki, Zohair, et al. « Association between weather data and COVID-19 pandemic predicting mortality rate: Machine learning approaches ». *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 138, 2020, p. 110137, <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110137>.
219. Roumagnac, A., de Carvalho Filho, E., Bertrand, R., Banchereau, A.-K., & Lahache, G. (2021). Étude de l'influence potentielle de l'humidité et de la température dans la propagation de la pandémie COVID-19. *Médecine de Catastrophe - Urgences Collectives*, 5(1), 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.pxur.2021.01.002>
220. Agrawal, A. and Bhardwaj, R. (2020) Tailoring Surface Wettability to Reduce Chances of Infection of COVID-19 by a Respiratory Droplet and to Improve the Effectiveness of Personal Protection Equipment. *Physics of Fluids*, 32, Article ID: 081702. <https://doi.org/10.1063/5.0020249>
221. Mehmood, K., Bao, Y., Abrar, M. M., Petropoulos, G. P., Saifullah, Soban, A., Saud, S., Khan, Z. A., Khan, S. M., & Fahad, S. (2021). Spatiotemporal variability of COVID-19 pandemic in relation to air pollution, climate and

- socioeconomic factors in Pakistan. *Chemosphere*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129584>
222. Mehta, S.K., Ananthavel, A., Reddy, T.V.R. *et al.* Indirect Response of the Temperature, Humidity, and Rainfall on the Spread of COVID-19 over the Indian Monsoon Region. *Pure Appl. Geophys.* **180**, 383–404 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03205-7>
223. World Health Organization. "What are the WHO Air quality guidelines." WHO, 22 septembre 2021. [<https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>]
224. Dutheil F, Baker JS, Navel V. COVID-19 as a factor influencing air pollution? *Environ Pollut.* 2020 Aug;263(Pt A):114466. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114466. Epub 2020 Apr 9. PMID: 32283458; PMCID: PMC7144597.
225. Liang, Donghai, et al. « Urban Air Pollution May Enhance COVID-19 Case-Fatality and Mortality Rates in the United States ». medRxiv, janvier 2020, p. 2020.05.04.20090746, <https://doi.org/10.1101/2020.05.04.20090746>.
226. Ghobakhloo, S., et al. « Association Between Air Pollution, Climate Change, and COVID-19 Pandemic: A Review of the Recent Scientific Evidence ». *Health Scope*, vol. 11, n° 4, 2022, p. e122412, <https://doi.org/10.5812/jhealthscope-122412>.
227. U.S. EPA. Air Quality Criteria For Ozone And Related Photochemical Oxidants (Final Report, 2006). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/ R-05/004aF-cF, 2006.
228. Cao C, Jiang W, Wang B, et al. Inhalable microorganisms in Beijing's PM2.5 and PM10 pollutants during a severe smog event. *Environ Sci Technol.* 2014;48(3):1499-1507
229. Ferrero A, Figueiredo AM, Aparecido NM, Kupski L, Azzi DC, Taniguchi JB, Penteadio IO. Particulate matter exposure in São Paulo: Investigation of health impacts of PM2.5 and PM10 on COVID-19 incidence and mortality. *Environ Sci Pollut Res.* 2021;28(30):40435-40452. doi:10.1007/s11356-020-01091
230. Garg, A., Kumar, A., & Gupta, N. C. (2021). Comprehensive study on impact assessment of lockdown on overall ambient air quality amid COVID-19 in Delhi and its NCR, India. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2020.100010>
231. Baysan C, Palanbek Yavaş S. COVID-19 and air pollution; what happened during the quarantine? *ESTÜDAM Public Health Journal.* 2020;5:35-46. doi:10.35232/estudamhsd.759421.
232. Lian, Xinbo, et al. « Impact of city lockdown on the air quality of COVID-19-hit of Wuhan city ». *Science of The Total Environment*, vol. 742, 2020, p. 140556, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140556>.

Annexes

- **Annexe relatives au analyses statistiques :**

Tous les codes pour réaliser les différentes analyses et visualisation de cette étude ce trouve dans le compte Git Hub suivant :

<https://github.com/DjazGit/GAM.git>

- **Annexes 2 Relative au projet de start-**

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Badji Mokhtar -ANNABA-

Code du Projet : UBMA/SCI/SNV/EE-012

Titre du projet :

**EpiDzair : Application web pour un Réseau de
Surveillance Épidémiologique en Algérie**

Projet de certification d'une institution émergente par décision ministérielle 1275



Dénomination commerciale :

EpiDzair

Fiche d'information :**À propos de l'équipe de supervision et de l'équipe de travail****1. Équipe de supervision**

| Équipe de supervision | |
|---|--|
| <u>Directeur de mémoire :</u> Dr.SALHI Amina | <u>Spécialité :</u> Biologie |
| <u>Co-directeur de thèse :</u> Dr. Mliki Feriel | <u>Spécialité :</u> Biologie |

2. Équipe de travail :

| <u>Equipe de travail :</u> | <u>Spécialité :</u> | <u>Faculté :</u> |
|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Saadene Yasmine | Bio-informatique et Santé | Faculté des sciences |

1. Idée de projet (solution proposée)

EpiDzair est une initiative novatrice développée pour révolutionner la surveillance épidémiologique en Algérie. Cette application web est conçue pour répondre à la nécessité urgente d'un système de surveillance de la santé robuste et réactif. EpiDzair offre une plateforme sophistiquée permettant de surveiller et analyser l'état de santé de la population en temps réel. En recueillant des données sur les symptômes inhabituels et les maladies spécifiques à différentes régions d'Algérie, EpiDzair vise à prévenir, contrôler et réagir efficacement face aux épidémies et autres anomalies sanitaires.

2. PROCEDE

A. Collecte de Données :

- Les professionnels de la santé peuvent signaler les symptômes inhabituels et les maladies spécifiques observés chez leurs patients via l'application.
- Les données sont collectées en temps réel, incluant la localisation géographique, les symptômes, et les diagnostics.

B. Analyse et Traitement :

- Les données collectées sont analysées à l'aide d'algorithmes avancés pour identifier les tendances et les anomalies.
- Les résultats des analyses sont utilisés pour générer des alertes en temps réel et des rapports détaillés sur la situation épidémiologique.

C. Communication et Coordination :

- L'application facilite la communication entre les professionnels de la santé en leur permettant de partager rapidement les diagnostics et les situations épidémiologiques.

- Un système de messagerie intégré permet une coordination efficace pour les interventions de prévention, de vaccination et de confinement.

D. Sécurité et Confidentialité :

- EpiDzair met en œuvre des protocoles rigoureux de sécurité des données pour garantir la confidentialité des informations des patients. Les données sont cryptées et stockées de manière sécurisée, avec un accès contrôlé réservé aux professionnels autorisés.

3. Valeurs proposées

1. Réactivité et Efficacité

- Grâce à la collecte et à l'analyse des données en temps réel, EpiDzair permet une réaction rapide aux épidémies, minimisant ainsi les impacts sur la santé publique.
- Les alertes en temps réel et les rapports précis aident les autorités sanitaires à prendre des décisions informées et rapides.

2. Collaboration et Partage d'Information

- EpiDzair facilite une collaboration étroite entre les professionnels de la santé, favorisant un échange d'informations rapide et efficace.
- La plateforme permet de centraliser les données, ce qui améliore la coordination des efforts de santé publique et maximise l'impact des interventions.

3. Prévention et Contrôle

- En analysant les tendances et les anomalies, EpiDzair permet de mettre en place des mesures préventives avant que les épidémies ne se propagent.
- La plateforme aide à identifier les zones à risque et à déployer des ressources de manière ciblée pour la prévention et le contrôle des maladies.

4. Conformité et Éthique

- La sécurité et la confidentialité des données sont des priorités absolues pour EpiDzair, assurant ainsi la confiance des utilisateurs et le respect des normes éthiques.
- L'application est conçue pour se conformer aux réglementations locales et internationales en matière de protection des données.

5. Équipe de travail :

L'équipe de travail est composé d'une seule personne : doctorante Yasmine Saadene en Bio-informatique et Santé.







Une expérience dans le domaine de la surveillance épidémiologique a été acquise pendant mon stage à Unisanté en Suisse, où j'ai pu interviewer et questionner des chefs cliniques, médecins, épidémiologistes et informaticien sur la nature des applications qu'ils utilisent régulièrement dans leur cohorte ou projets de recherche et en général pour la surveillance épidémiologique.

Une aide en connaissance en informatique a été également sollicitée pour permettre la mise à niveau de l'application web.

6. Les objectifs du projet :

Les objectifs du projet EpiDzair sont centrés sur la création d'un système de surveillance épidémiologique performant et réactif, capable de protéger la santé publique en Algérie. En se concentrant sur la collecte de données en temps réel, la facilitation de la communication entre les professionnels de la santé, la mise en place de systèmes de prévention et de confinement, l'analyse des données pour la prise de décisions informées, et la garantie de la sécurité des données, EpiDzair se positionne comme un outil essentiel pour la gestion efficace des crises sanitaires et la protection de la population.

4. Calendrier de réalisation du projet :

| 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| | | | | | ✓ | ✓ | Rechercher des bases de données de brevets et collecter des informations |  | |
| | | ✓ | ✓ | ✓ | | | Lancement de travaille sur terrain et le suivie de la préparation de produit |  | |
| | ✓ | | | | | | Lancement des analyses au laboratoire |  | |
| ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | Prototype pilote | | |
| ✓ | ✓ | | | | | | Expérience du prototype en dehors des laboratoires |  | |
| ✓ | ✓ | | | | | | Dépôt de brevet et numéro de protection industrielle |  | |
| ✓ | | | | | | | Suivre le processus de brevet et corriger les commentaires des examinateurs INAPI |  | |

5. Offre sectorielle du marché :

Marché potentiel :

Qui achète notre Application ? C'est les directions responsable de la surveillance épidémiologique en Algérie plus spécifiquement ceux qui sont en obligations de rapporter les symptômes ou les maladies a déclaration

obligatoire au ministère de la santé, donc cette application web devrait particulièrement intéresser le ministère de la santé et plus précisément l'agence nationale de la numérisation de la santé.

Marché cible :

- Médecins généralistes (de la fonction publique ou libérale)
- Les hôpitaux et cliniques (public ou privé)
- Le laboratoire d'analyses (public ou privé)

6. Mesure de la compétitivité :

En Algérie, avant la pandémie Covid-19 le système de santé algérien utilisait des moyens anciens pour rapporter les événements ou les épidémies que les régions de l'est, de l'ouest ou du centre et du sud ont vécu sous forme de bulletin trimestriel, qui seront publiés par l'institut national de santé publique mais avec un certain décalage des faits c'est-à-dire après des mois.

Selon notre connaissance il n'existe pas encore à ce jour de réseau de surveillance de forme informatique/numérique dans le système de santé algérien.

7. Forme juridique :

Le présent travail est élaboré en conformité avec les prescriptions du Décret exécutif n° 22-251 du 30 juin 2022 relatif à l'agence nationale de numérisation en santé.

Ce décret vise à :

- mettre en place les outils numériques indispensables dans le domaine de la santé.
- Développer la formation en ligne pour les professionnels de santé.
- Assurer une veille sanitaire, de numériser les archives médicales et de sécuriser l'identification numérique des acteurs de la santé.
- Elaborer des mesures législatives et de produire des rapports sur l'évolution du secteur numérique de la santé.

8. Prototype

Front-end : en développement

Back-end : en développement

9. Business model canevas (BMC)

| Partenaire clé | Activité clés | Proposition de valeur | Canaux de distribution | Segment client |
|--------------------------------|---|--|---|---|
| Hôpital universitaire d'Annaba | La collecte et le stockage des données | Mis au point de l'état de santé publique et partage des informations | Direct ou par contacte internet (Email) : obtention d'un identifiant médecin, avec contrat. | les hôpitaux publics le ministre de santé les cliniques et médecin privé. |
| Direction de la Santé d'Annaba | Traitement et analyse des informations | Mis à disposition des bases de données pour chercheurs et professionnels | | Structure de cout |
| Service d'épidémiologie | Cartographie épidémiologique des symptômes et maladie notifiées | | | -Matériels de production Informatique -Serveur |
| Médecins généraliste prive | | | | |
| Laboratoire d'analyse | | | | |

