

Corrélation entre les précipitations et le taux de positivité des tests du paludisme dans les communes de Port-au-Prince et de Delmas, Haïti (2016–2018)

D. Noncent^{1,2,3}, M.E.J. Richemont¹, M. Pierre¹, ¹Laboratoire des Sciences pour l'Environnement et l'Énergie (LS2E), École Normale Supérieure (ENS), Université d'État d'Haïti (UEH), ²BIOPOLÉ Laboratoire Biosciences et Biotechnologies, Université d'État d'Haïti, ³Équipe de Recherche sur les Changements Climatiques (ERC2), Université Quisqueya.

Auteur de correspondance : Noncent D., ndavid02@yahoo.fr.

Résumé

Noncent D., Richemont M.E.J. et Pierre M. 2026. Corrélation entre les précipitations et le taux de positivité des tests du paludisme dans les communes de Port-au-Prince et de Delmas, Haïti (2016–2018). RED 12 (1): 59 - 67

Le paludisme, qui demeure endémique en Haïti, constitue un enjeu majeur de santé publique. Les facteurs climatiques, notamment les précipitations, sont suspectés d'influencer la dynamique de transmission de cette maladie vectorielle. Ainsi, cette étude descriptive et rétrospective vise à analyser la corrélation entre les épisodes pluvieux et la survenue des cas de paludisme dans les communes de Port-au-Prince et de Delmas pour la période de 2016-2018. Les données analysées proviennent de la base de données pluviométrique (pluie totale, pluie maximale, nombre de jours de pluie) recueillies auprès de l'Unité Hydrométéorologique d'Haïti (UHM) pour la période 2009-2018, ainsi que des données sanitaires sur les cas de paludisme obtenues auprès de la Direction Sanitaire de l'Ouest (DSO) pour 2016-2018. Le coefficient de corrélation de Pearson (r) et le seuil de significativité à 5% ($p < 0,05$) ont été calculés afin d'évaluer la force et la significativité statistique des associations observées. Au total, 16 235 personnes ont été testées à Port-au-Prince contre 40 322 à Delmas. Une diminution synchronisée des cas de paludisme a été observée dans les deux communes entre 2016 et 2018. À Delmas, les coefficients de corrélation (r) étaient négatifs et faibles ($r = -0,114$ à $-0,276$). À Port-au-Prince, des corrélations positives mais faibles ont été observées pour la pluie totale ($r = 0,241$) et le nombre de jours de pluie ($r = 0,138$). En conclusion, l'étude n'a mis en évidence aucune association robuste entre les précipitations et le taux de positivité des tests (TPR) du paludisme, les corrélations observées n'ayant pas atteint le seuil de significativité statistique ($p > 0,05$). Toutefois, des études longitudinales intégrant d'autres variables climatiques et socio-économiques sont recommandées.

Mots clés : Changement climatique, *Plasmodium falciparum*, maladie vectorielle, *Anopheles albimanus*, épidémiologie.

Abstract

Noncent D., Richemont M.E.J. et Pierre M. 2026. Correlation between Rainfall and Malaria Test Positivity Rate in the Municipalities of Port-au-Prince and Delmas, Haiti (2016–2018). RED 12 (1): 59 - 67

Malaria, which remains endemic in Haiti, is a major public health issue. Climatic factors, particularly rainfall, are suspected of influencing the transmission dynamics of this vector-borne disease. This descriptive, retrospective study aims to analyze the correlation between rainfall events and the occurrence of malaria cases in the municipalities of Port-au-Prince and Delmas for the period 2016–2018. The data analyzed in this study come from the rainfall database (total rainfall, maximum rainfall, number of rainy days) collected from the Haitian Hydrometeorological Unit (UHM) for the period 2009–2018, as well as health data on malaria cases obtained from the Western Health Directorate (DSO) for 2016–2018. Pearson's correlation coefficient (r) and the 5% significance threshold ($p < 0.05$) were calculated to assess the strength and statistical significance of the associations observed. A total of 17 235 people were tested in Port-au-Prince, compared with 40 322 in Delmas. A synchronized decrease in malaria cases was observed in both municipalities between 2016 and 2018. In Delmas, the correlation coefficients (r) were negative and low ($r = -0.114$ to -0.276). In Port-au-Prince, positive but weak correlations were observed for total rainfall ($r = 0.241$) and the number of rainy days ($r = 0.138$). In conclusion, the study did not find any robust association between rainfall and malaria test positivity rate (TPR), as the correlations observed did not reach statistical significance ($p > 0.05$). However, longitudinal studies incorporating other climatic and socioeconomic variables are recommended.

Keywords: Climate change, *Plasmodium falciparum*, vector-borne disease, *Anopheles albimanus*, epidemiology.

Introduction

Les maladies vectorielles représentent un défi majeur pour la santé publique à l'échelle mondiale, affectant des centaines de millions de personnes chaque année, principalement dans les régions tropicales et subtropicales (3, 8, 13). Parmi celles-ci, le paludisme, causé par des parasites protozoaires du genre *Plasmodium* et transmis par les moustiques femelles du genre *Anopheles*, demeure l'une des maladies les plus dévastatrices. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a rapporté environ 263 millions de cas et 597 000 décès en 2023, dont 94 % des cas et 95 % des décès sur le continent africain (14, 5). Ces chiffres représentent une augmentation de 11 millions de cas par rapport à 2022, en grande partie attribuable aux catastrophes climatiques, aux conflits armés et aux difficultés économiques dans certains pays endémiques (32). La propagation de cette maladie est fortement modulée par des facteurs environnementaux, notamment les précipitations, la température et l'humidité relative (7, 17), ainsi que par des déterminants socio-économiques et écologiques complexes (12, 28).

En Haïti, le paludisme est endémique et figure parmi les priorités nationales de santé (31). L'île d'Hispaniola, partagée entre Haïti et la République dominicaine, constitue le dernier foyer de transmission du paludisme dans les Caraïbes (1, 31). Haïti concentre plus de 97% des cas signalés sur l'île (15), avec *Plasmodium falciparum* comme espèce quasi exclusive ($> 99\%$) et *Anopheles albimanus* Wiedemann comme principal vecteur (1, 21). Ce dernier présente des préférences exophiliques et exophagiques (21, 32), avec des

pics de densité vectorielle survenant après le début des saisons des pluies, en novembre et en juin (22, 32). *An. albimanus* est considéré comme un moustique essentiellement côtier et de basse altitude, se reproduisant dans une variété de gîtes larvaires ensoleillés situés généralement en dessous de 400 m d'altitude (23, 31). Malgré les efforts d'éradication engagés depuis les années 1960 par le Ministère de la Santé Publique et de la Population (MSPP), l'insuffisance chronique de financement, l'instabilité politique, les catastrophes naturelles récurrentes (séismes de 2010 et 2021, ouragans Matthew en 2016 et Irma en 2017) et les chocs climatiques ont considérablement entravé la réalisation de cet objectif (11, 18, 24).

Néanmoins, des progrès significatifs ont été enregistrés. Entre 2009 et 2018, 232 479 cas de paludisme ont été rapportés par le MSPP, avec une diminution de l'incidence de 60 130 cas en 2010 à 8 978 cas en 2018 (15). Le Programme National de Contrôle de la Malaria (PNCM) a déployé des stratégies incluant l'expansion du diagnostic rapide, la surveillance communautaire, la distribution de moustiquaires imprégnées et des programmes pilotes d'administration médicamenteuse de masse (11, 24). Parallèlement, la chloroquine demeure le traitement de première intention contre le Paludisme, et Haïti figure parmi les rares pays où *P. falciparum* reste sensible à ce médicament (15, 24, 25). Selon le rapport mondial sur le paludisme en 2024, Haïti a réduit l'incidence des cas de 23 à 63% depuis 2015, mais l'instabilité politique persistante continue de menacer ces acquis (32).

Le département de l'Ouest, qui abrite les communes de Port-au-Prince (capitale) et de Delmas, avec une population départementale estimée à plus de 3 millions d'habitants en 2018, se classe systématiquement parmi les quatre départements les plus touchés par le paludisme sur le territoire national (15). Ces deux communes, bien que géographiquement contiguës, présentent des caractéristiques topogra-

phiques, démographiques et urbanistiques contrastées susceptibles d'influer différemment sur l'écologie vectorielle et, par conséquent, sur la transmission palustre. L'urbanisation rapide et non planifiée, amplifiée par les déplacements massifs post-séisme de 2010, a profondément modifié l'écologie des moustiques dans la région métropolitaine. Samson *et al.* (27) ont montré que l'urbanisation réduit significativement la densité d'*An. albimanus*, celui-ci étant principalement retrouvé dans les sites agricoles et les zones péri-urbaines, tandis que les espèces de *Culex* et d'*Aedes* prédominent dans les zones urbanisées (27).

La relation entre les précipitations et le paludisme a été explorée dans de nombreuses régions tropicales. Des études menées en Afrique subsaharienne (19), au Sri Lanka (1), en Thaïlande (30), en Inde (16), en Chine (15) et au Mozambique (9) ont mis en évidence des corrélations hétérogènes – positives, négatives ou non significatives – selon les contextes géographiques, écologiques et les décalages temporels considérés. Plus récemment, une étude utilisant le modèle dynamique Liverpool Malaria Model (LMM) appliqué spécifiquement à Haïti a confirmé que le pic de transmission du paludisme survient avec un décalage d'environ un mois après le pic de précipitations, les pluies abondantes tendant à submerger les œufs de moustiques tandis que les conditions post-pluviales favorisent le développement vectoriel (5). Par ailleurs, Cameron *et al.* (3) ont cartographié l'endémicité et la saisonnalité du paludisme à l'échelle nationale haïtienne, révélant un profil saisonnier uniphasique avec un pic d'incidence en décembre-janvier et un minimum en avril-mai, ce qui suggère une dynamique temporelle complexe entre climat et transmission. Toutefois, la littérature scientifique spécifique au contexte haïtien demeure extrêmement lacunaire (11, 31), et aucune étude publiée n'a, à notre connaissance, quantifié systématiquement la relation pluie-

paludisme dans les zones urbaines du département de l'Ouest.

Dans quelle mesure les précipitations atmosphériques (pluie totale, pluie maximale mensuelle et nombre de jours de pluie) sont-elles associées au taux de positivité des tests (TPR) dans les communes de Port-au-Prince et de Delmas sur la période 2016–2018 ?

La présente étude a pour objectif d'analyser la corrélation entre les précipitations atmosphériques (pluie totale, pluie maximale, nombre de jours de pluie) et la fréquence des cas de paludisme dans les communes de Port-au-Prince et de Delmas pour la période 2016–2018, afin de contribuer à une meilleure compréhension du rôle des facteurs météorologiques dans la dynamique palustre en milieu urbain haïtien et d'informer les stratégies de prévention adaptées au climat.

Matériels et Méthodes

Type d'étude

Il s'agit d'une étude observationnelle, corrélationnelle, descriptive et rétrospective. Ce design permet d'examiner les associations entre variables pluviométriques et épidémiologiques sans établir de causalité directe, conformément aux recommandations méthodologiques pour l'épidémiologie environnementale (26).

Zone d'étude

L'étude porte sur deux communes du département de l'Ouest d'Haïti : Port-au-Prince (18°32'N, 72°20'O ; superficie ≈ 36,04 km² ; altitude 0–300 m) et Delmas (18°33'N, 72°18'O ; superficie ≈ 25,74 km² ; altitude 100–400 m) (Figure 1). Port-au-Prince présente une topographie accidentée, entourée de montagnes, avec de nombreuses ravines souvent obstruées par des déchets solides. Delmas, relativement plus plate, est exposée aux inondations lors d'épisodes pluvieux intenses. Les deux communes partagent un climat tropical semi-aride, caractérisé par deux saisons pluvieuses (printemps : mars-mai ; automne :

septembre–novembre) et deux saisons sèches (hiver et été) (15). Afin de contextualiser ce profil climatique, les données décennales (2009–2018) de l'UHM sont présentées à la figure 2, mettant en évidence les caractéristiques pluviométriques à long terme des deux communes, pour lesquelles l'analyse corrélative porte exclusivement sur la période 2016–2018.

Sources des données

Données pluviométriques : Les données de précipitations ont été obtenues auprès des archives climatologiques de l'Unité Hydrométéorologique d'Haïti (UHM) pour la période 2009–2018, enregistrées aux stations météorologiques de Saint-Louis de Gonzague (Port-au-Prince) et de F.I.C (Delmas). Trois variables pluviométriques ont été retenues : (i) la pluie totale mensuelle (mm), (ii) la pluie maximale mensuelle (mm), c'est-à-dire la plus forte quantité de pluie enregistrée en 22 heures au cours d'un mois donné, et (iii) le nombre de jours de pluie par mois (jour où la précipitation enregistrée $\geq 0,1$ mm).

Données sanitaires : Les données sur les cas de paludisme ont été collectées auprès de la Direction Sanitaire de l'Ouest (DSO) du MSPPP pour la période 2016–2018. L'échantillon comprend l'ensemble des individus ayant bénéficié d'un test diagnostique pour le paludisme (test de diagnostic rapide [TDR] et/ou test

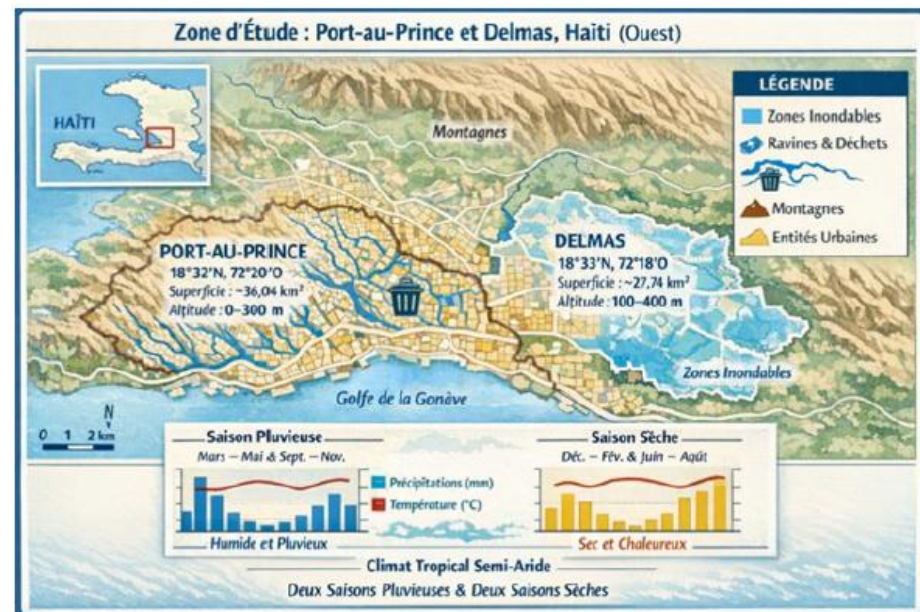


Figure 1. Caractéristiques géographiques et climatiques de Port-au-Prince et Delmas (Ouest, Haïti)

Source OpenStreetMap / CNIGS Haïti, adapté par les auteurs

microscopique [TM]) dans les structures sanitaires des deux communes, soit respectivement 17 235 personnes à Port-au-Prince et 40 322 à Delmas. Le TPR a été calculé comme le rapport entre le nombre de cas confirmés et le nombre total de personnes testées, exprimée en pourcentage. Il convient de noter que ces données de surveillance passive ne capturent pas les infections asymptomatiques, dont la proportion peut être substantielle dans les contextes de faible transmission comme en Haïti (24, 27).

Analyse statistique

Des statistiques descriptives (moyennes, totaux, distributions mensuelles) ont été utilisées pour caractériser les tendances pluviométriques et épidémiologiques. L'analyse de corrélation a été réalisée à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson (r), qui mesure l'intensité et la direction d'une relation linéaire entre deux variables continues. La normalité des distributions a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk ; le coefficient de corrélation de Spearman (ρ) a également été calculé à titre de vérification non para-

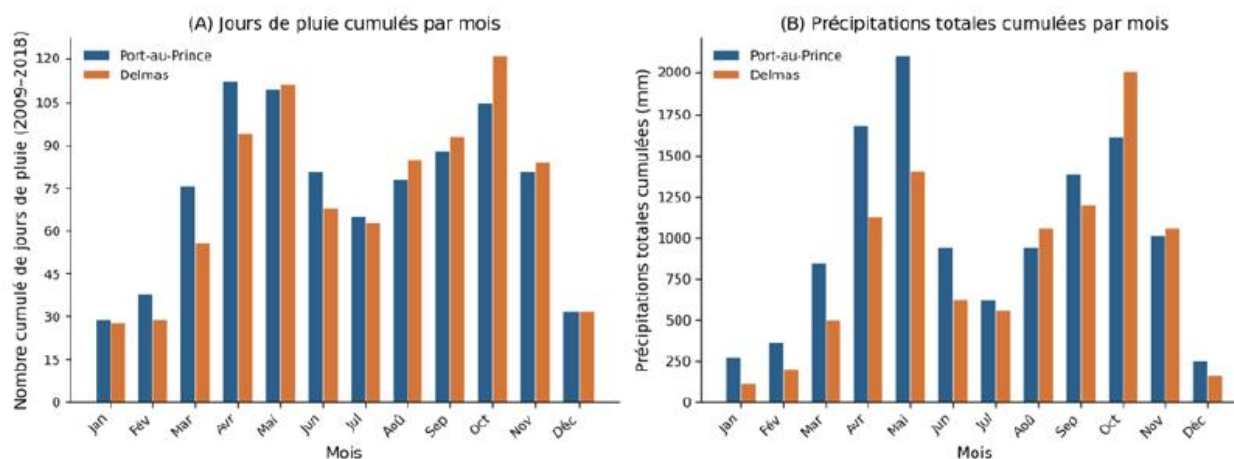


Figure 2. Profil pluviométrique décennal (2009–2018)

(A) nombre cumulé de jours de pluie par mois ; (B) précipitations totales cumulées par mois (mm), pour Port-au-Prince et Delmas.

métrique. Les coefficients ont été calculés avec Microsoft Excel 2013, puis validés par le test de significativité bilatéral (p-value) à l'aide du logiciel IBM SPSS Statistics version 20. Le seuil de significativité statistique a été fixé à $\alpha = 0,05$. La période de corrélation s'étend sur 36 observations mensuelles (janvier 2016 – décembre 2018).

Les coefficients de Pearson ont été interprétés selon l'échelle suivante (4) : $|r| < 0,10$ = négligeable ; $0,10 \leq |r| < 0,30$ = faible ; $0,30 \leq |r| < 0,50$ = modéré ; $|r| \geq 0,50$ = fort.

Considérations éthiques

Cette étude utilise exclusivement des données agrégées et anonymisées issues de sources institutionnelles publiques (UHM, DSO/MSPP). Aucune donnée individuelle identifiable n'a été collectée ni traitée.

Résultats et Discussions

Profil pluviométrique de la période d'étude (2016–2018)

Les données pluviométriques de la période 2016–2018 révèlent un profil saisonnier bimodal caractéristique du climat tropical semi-aride de la région métropolitaine de Port-au-Prince, avec deux saisons pluvieuses (printemps : mars–mai ; automne : septembre–novembre) et deux saisons sèches (hiver et été). À Delmas, la pluie totale annuelle a augmenté de 5 014 mm en 2016 à 5 274 mm en 2018 (+26%), tandis que le nombre de jours de pluie est passé de 60 à 100 jours (+67%). À Port-au-Prince, la pluie totale a varié de 5 366 mm en 2016 à 756 mm en 2017, puis 5 038 mm en 2018, avec un nombre de jours de pluie quasi stable (77–78 jours/an). Ces tendances contrastées entre les deux communes sont cohérentes avec les spécificités topographiques et microclimatiques locales décrites dans la zone d'étude. Les données pluviométriques décennales (2009–2018) utilisées pour caractériser le contexte climatique général sont présentées dans la section Matériels et Méthodes (Figure 2). L'analyse

Tableau 1. Synthèse annuelle des données pluviométriques et sanitaires, Port-au-Prince et Delmas (2016–2018)

Variable	Commune	2016	2017	2018	Δ (%)	Tendance
Personnes testées	PaP	8 172	5 750	2 263	-72,3	↓
Personnes testées	Delmas	22 925	13 588	3 809	-83,4	↓
Cas confirmés	PaP	563	260	83	-85,3	↓
Cas confirmés	Delmas	880	337	65	-92,6	↓
TPR (%)	PaP	6,9	4,5	3,7	-46,4	↓
TPR (%)	Delmas	3,8	2,5	1,8	-52,6	↓
Pluie totale (mm)	PaP	1 366	756	1 038	-24,0	Variable
Pluie totale (mm)	Delmas	1 014	1 029	1 274	+25,6	↑
Jours de pluie	PaP	77	77	78	+1,3	→ stable
Jours de pluie	Delmas	60	93	100	+66,1	↑

PaP = Port-au-Prince ; Δ = variation 2016–2018.

corrélacionnelle présentée ici porte exclusivement sur la période 2016–2018. Les tendances à long terme sont cohérentes avec les projections climatiques de Diouf *et al.* (5) qui prévoient une diminution des précipitations dans l'ouest d'Haïti sous les scénarios SSP585 du CMIP6.

Évolution annuelle du paludisme (2016–2018)

Les deux communes affichent une diminution marquée et convergente des cas de paludisme entre 2016 et 2018 (Tableau 1). À Delmas, les cas confirmés ont chuté de 880 en 2016 à 65 en 2018, soit une réduction de 92,6%. À Port-au-Prince, ils sont passés de 563 à 83, soit une baisse de 85,3%. Malgré un nombre de tests nettement plus élevé à Delmas (40 322 vs 17 235), le TPR à Port-au-Prince était systématiquement supérieur (6,9% contre 3,8% en 2016 ; 3,7% contre 1,8% en 2018), suggérant un risque différentiel significatif entre les deux communes. Cette tendance à la baisse est cohérente avec les données nationales rapportées par Jules *et al.* (15), qui ont documenté une diminution de l'incidence de 60 130 cas en 2010 à 8 978 cas en 2018 à l'échelle du pays, ainsi qu'avec les avancées du programme d'élimination décrites par Lemoine *et al.* (17).

Variations mensuelles : cas de paludisme et précipitations

L'évolution mensuelle superposée des précipitations et des cas de pa-

ludisme sur les 36 mois de la période d'étude est présentée à la figure 3. À Port-au-Prince, les pics de cas de paludisme tendent à coïncider avec les mois de précipitations modérées (avril–mai), tandis que les mois de très forte pluie (octobre) ne semblent pas systématiquement associés à une hausse des cas. À Delmas, la tendance descendante des cas domine l'ensemble de la période, indépendamment des fluctuations pluviométriques.

Profil saisonnier moyen

Les profils saisonniers moyens (2016–2018) superposant les cas mensuels moyens de paludisme et les précipitations mensuelles moyennes sont présentés à la figure 4. Dans les deux communes, un pic de cas est visible en mai, coïncidant avec la première saison des pluies. Un second pic plus atténué apparaît en septembre–octobre (saison des pluies d'automne). Ces observations suggèrent une synchronisation partielle entre saisons pluvieuses et pic d'incidence palustre, compatible avec le délai biologique nécessaire au développement larvaire et à la maturation sporogonique du parasite chez le vecteur. Il est notable que ce profil bimodal observé dans nos données locales diffère du profil uniphasique national décrit par Cameron *et al.* (3), qui ont identifié un pic d'incidence en décembre–janvier et un minimum en avril–mai à l'échelle du pays. Cette divergence pourrait refléter les spécificités du

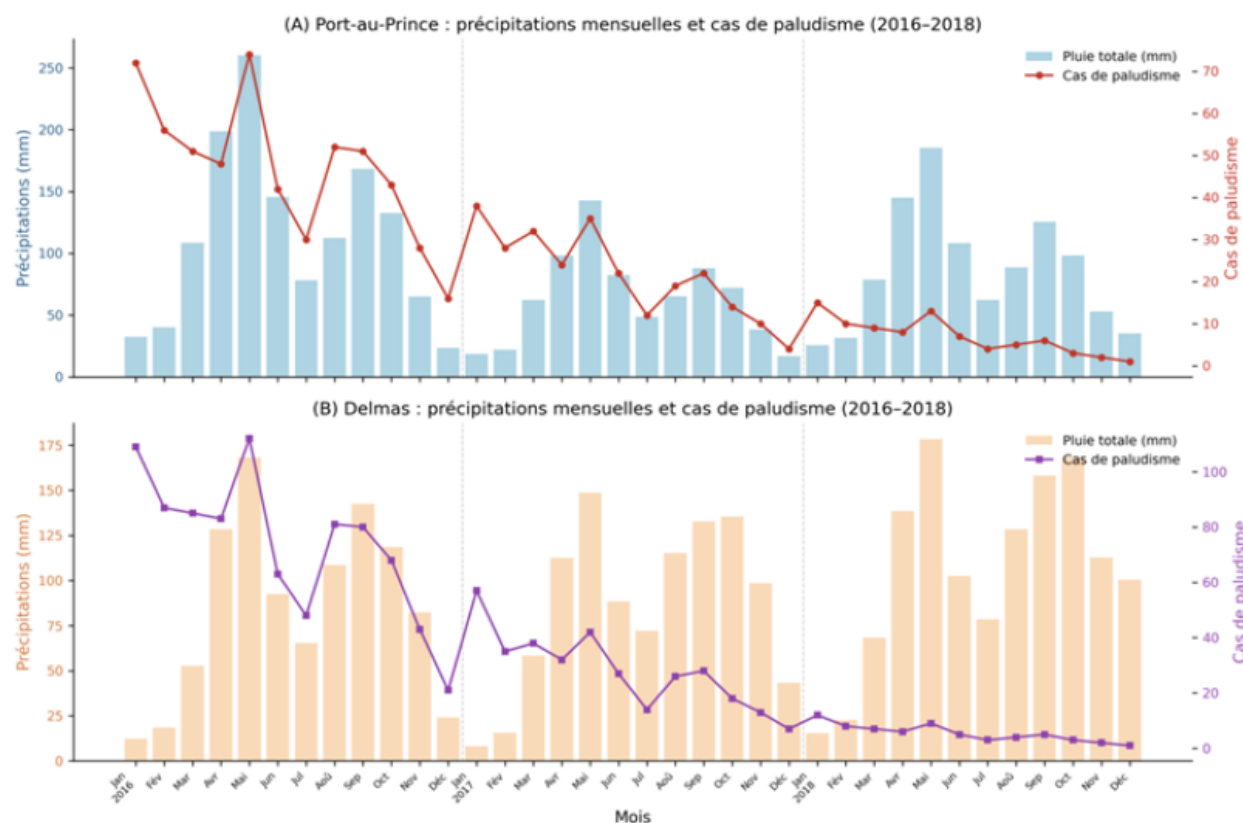


Figure 3. Évolution mensuelle des précipitations totales (barres) et des cas de paludisme (lignes) pour (A) Port-au-Prince et (B) Delmas, janvier 2016 – décembre 2018

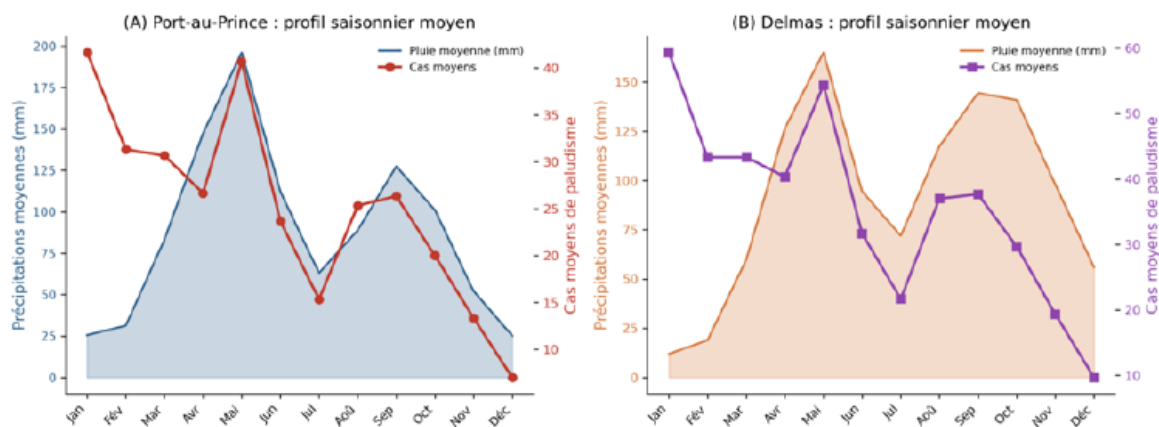


Figure 4. Profil saisonnier moyen (2016–2018) des précipitations (aire ombrée) et des cas de paludisme (ligne) pour (A) Port-au-Prince et (B) Delmas

contexte urbain métropolitain par rapport aux zones rurales et côtières à forte endémicité (Grand'Anse, Artibonite) qui dominent le profil national.

Analyse de corrélation

Le tableau 1 présente les résultats des analyses de corrélation de Pearson entre chaque variable pluviométrique et les cas de paludisme mensuels, pour chacune des deux communes.

À Delmas, l'ensemble des coefficients de corrélation sont négatifs et faibles ($-0,114$ à $-0,276$) (Tableau 2) ; suggérant une tendance inverse entre précipitations et cas de paludisme. La corrélation la plus forte ($r = -0,276$; $p = 0,103$) concerne la pluie maximale mensuelle, ce qui suggère une faible tendance possible mais statistiquement non confirmée. À Port-au-Prince, les corrélations avec la pluie totale ($r = 0,241$; $p = 0,156$) (Tableau 2) et le nombre

de jours de pluie ($r = 0,138$; $p = 0,422$) sont positives mais faibles. Seule la pluie maximale montre une corrélation négative quasi nulle ($r = -0,028$; $p = 0,874$). Aucun de ces résultats n'atteint le seuil de significativité statistique ($p > 0,05$).

Discussion des résultats

Les résultats ne mettent pas en évidence de corrélation statistiquement significative, mais révèlent des sché-

Tableau 2. Coefficients de corrélation de Pearson (r) et valeurs de significativité (p) entre les variables pluviométriques et les cas de paludisme (n = 36 mois)

Variable	r (Delmas)	p (Delmas)	r (PaP)	p (PaP)
Pluie totale (mm)	-0,114	0,506	0,241	0,156
Pluie maximale (mm)	-0,276	0,103	-0,028	0,874
Jours de pluie	-0,142	0,416	0,138	0,422

PaP = Port-au-Prince ; seuil de significativité : $p < 0,05$.

mas différentiels entre les deux communes qui méritent une analyse approfondie.

Le contraste observé entre Port-au-Prince (corrélations positives) et Delmas (corrélations négatives) mérite une clarification préliminaire. À Delmas, la pluviométrie a augmenté de +26 (hauteur totale) et +67% (jours de pluie) entre 2016 et 2018, tandis que le TPR a simultanément diminué de 53%. Cette corrélation négative apparente semble contre-intuitive, car les précipitations et les eaux stagnantes sont classiquement présentées comme des facteurs de risque pour le paludisme. Toutefois, plusieurs mécanismes peuvent expliquer ce phénomène : (i) l'effet de lessivage des gîtes larvaires par des pluies intenses, (ii) la forte réduction des cas liée aux interventions du PNCM qui domine le signal pluviométrique sur la période courte de 36 mois, et (iii) la variabilité inter-annuelle de la pluviométrie qui ne se traduit pas nécessairement par une variation synchrone du TPR dans un contexte urbain dense. Ces facteurs confondants sont discutés ci-après. Le contraste topographique pourrait s'expliquer par plusieurs déterminants complémentaires. Les différences topographiques jouent un rôle important : Delmas, située à une altitude plus élevée (100–400 m) avec une géographie relativement plate, est davantage exposée aux inondations susceptibles de détruire les gîtes larvaires par lessivage des larves vers des zones impropres à leur développement. Port-au-Prince, avec sa topographie accidentée et ses ravines souvent obstruées par des déchets, présente un potentiel supérieur de formation de micro-habitats aquatiques stag-

nants après les épisodes pluvieux, favorisant le développement larvaire d'*Anopheles albimanus* (16, 20). Caillouet *et al.* (2) ont caractérisé les gîtes larvaires d'*An. albimanus* dans la vallée de l'Artibonite, montrant que les larves se développent préférentiellement dans des habitats permanents et semi-permanents d'eaux stagnantes de surface (empreintes de sabots, fossés, rizières, mares), des conditions qui peuvent se retrouver dans les ravines obstruées de Port-au-Prince. De plus, la densité de population plus élevée de Port-au-Prince et l'urbanisation non maîtrisée, avec une prolifération d'habitats informels et un assainissement déficient, pourraient amplifier le contact humain-vecteur et faciliter la transmission (27).

L'écologie d'*An. albimanus* en Haïti présente des particularités qui éclairent nos résultats. Frederick *et al.* (11), dans leur revue systématique de la recherche vectorielle en Haïti, soulignent que ce moustique est essentiellement côtier, fréquemment trouvé dans les eaux saumâtres, et considéré comme un vecteur relativement inefficace du fait de ses préférences exophiliques et exophagiques (1, 21). Cependant, des données suggèrent une activité endophagique entre 19h et 21h, suivie d'un repos extérieur (18). Les pics de densité vectorielle surviennent en novembre et en juin, juste après le début des deux saisons pluvieuses (32, 22), suivis par des pics d'incidence palustre. Cette observation est cohérente avec la synchronisation partielle observée dans nos données. Jaramillo-Underwood *et al.* (14) ont récemment confirmé, à travers une enquête sérologique menée

dans 350 écoles à travers Haïti en 2016, une hétérogénéité spatiale significative de l'exposition aux piqûres d'*An. albimanus*, avec des grappes de forte exposition associées à la présence de plans d'eau et à l'altitude plus basse.

La corrélation négative entre la pluie maximale et les cas de paludisme, observée dans les deux communes, est cohérente avec la littérature. Paaijmans *et al.* (22) ont démontré expérimentalement en Afrique de l'Est que des pluies intenses peuvent détruire les habitats larvaires d'*Anopheles gambiae* par lessivage, créer des courants d'eau trop turbulents pour le développement des stades immatures et déplacer physiquement les larves. Ce mécanisme, potentiellement transposable à *An. albimanus* en Haïti, pourrait expliquer pourquoi les événements de forte pluie semblent exercer un effet inhibiteur plutôt que facilitateur sur la transmission palustre en milieu urbain. Ce résultat a également été observé au Mozambique par Ferrão *et al.* (9). De manière convergente, Diouf *et al.* (5) ont confirmé dans leur modélisation appliquée à Haïti que les pluies abondantes d'août tendent à submerger les œufs de moustiques déposés sur les surfaces d'eau, tandis que les conditions post-pluviales plus favorables (disponibilité d'eaux usées, chaleur intense, humidité résiduelle) prolongent la longévité des vecteurs et favorisent la transmission avec un décalage d'environ un mois.

Plus largement, la littérature récente souligne la nature non linéaire, voire unimodale, de la relation précipitations-paludisme. Une étude multirégionale portant sur 25 ans de données en Afrique et en Asie a démontré que la température et les précipitations présentent des relations unimodales avec le paludisme, avec un effet positif jusqu'à un certain seuil au-delà duquel l'effet devient négatif (28). En Afrique subsaharienne, Yamba *et al.* (33) ont montré, à l'aide de données entomologiques directes, que la transmission saisonnière du paludisme

est contenue dans une fenêtre de température de 15°C–40°C et que le début de la transmission ne suit les précipitations qu'avec un décalage marqué uniquement dans les zones à pluviométrie fortement saisonnière.

Nos résultats s'inscrivent dans un ensemble de recherches soulignant la complexité et la non-linéarité de la relation pluie-paludisme. En Afrique, Mafwele et Lee (19), analysant des données sur plus d'un siècle (1901–2015), ont observé une corrélation positive générale, mais une inversion vers une corrélation négative pour la période récente (1981–2015), suggérant une modification de la relation sous l'effet du changement climatique et des interventions sanitaires. Au Sri Lanka, Briët *et al.* (1) ont relevé des corrélations positives avec un décalage de 0 à 2 mois, suivi de corrélations négatives 3 à 9 mois après les précipitations. En Chine, Huang *et al.* (13) et Wang *et al.* (29) ont confirmé le rôle de la température comme cofacteur déterminant. Kumar *et al.* (16) en Inde ont démontré que la pluviométrie seule ne suffit pas à expliquer la variabilité du paludisme et qu'une approche multivariée est indispensable.

La baisse spectaculaire des cas de paludisme observée dans les deux communes (–85 à –93%) sur seulement trois ans est vraisemblablement multifactorielle. Plusieurs éléments pourraient avoir contribué à cette diminution, indépendamment des variations pluviométriques : le renforcement des interventions de lutte antipaludique par le MSPP, notamment la distribution de moustiquaires imprégnées d'insecticides à longue durée d'action (MILDA) et les campagnes de pulvérisation intra-domiciliaire ; l'amélioration de l'accès au diagnostic rapide et aux traitements antipaludiques ; l'appui de partenaires internationaux (Fonds mondial, OMS, USAID, The Carter Center) ; les mouvements de population post-catastrophes naturelles ; et les variations dans les pratiques de déclaration des cas (11, 24). Il est également notable que le

PNCM a mis en place des stratégies combinant administration médicamenteuse de masse et pulvérisation intra-domiciliaire dans le département de la Grand'Anse (7), bien que ces interventions n'aient pas directement visé les communes de notre étude. Selon Druetz *et al.* (6), la transmission du paludisme en Haïti est hautement focale, ce qui nécessite une surveillance granulaire intégrant des informations sur les infections asymptomatiques pour orienter les interventions. L'absence de contrôle de ces cofacteurs constitue la principale limite de l'analyse corrélationnelle.

Limites de l'étude

Plusieurs limites méthodologiques doivent être considérées. Premièrement, la durée d'étude (36 mois) est insuffisante pour capturer les dynamiques climatiques et épidémiologiques à long terme, en particulier dans un contexte où les événements climatiques extrêmes (ouragans, sécheresses) peuvent exercer des effets non linéaires sur la transmission (31, 28). Deuxièmement, l'analyse se limite aux corrélations simultanées et n'intègre pas de décalage temporel (time-lag), pourtant biologiquement justifié et méthodologiquement faisable avec les données mensuelles disponibles (décalage de 5 à 1 mois). Le cycle de développement d'*An. albimanus* et le cycle sporogonique de *P. falciparum* impliquent un délai minimal de 2 à 6 semaines entre un épisode pluvieux et l'apparition des cas cliniques (1). Ce décalage a été quantifié à environ un mois par Diouf *et al.* (5) dans leur modélisation spécifique au contexte haïtien. Troisièmement, seules les précipitations ont été utilisées comme variable climatique, alors que la température ambiante et l'humidité relative jouent un rôle déterminant (17, 15), de même que l'indice de végétation avancé (EVI) et la température de surface (LST), identifiés comme covariables prédictives majeures par Cameron *et al.* (3). Quatrièmement, les données épidémiologiques haïtiennes sont sujettes à des biais de sous-déclaration (11, 31) ; Jules

et al. (15) ont souligné des divergences entre les données du MSPP et de l'OMS. De plus, la surveillance passive ne capture pas les porteurs asymptomatiques, dont la proportion nationale a été estimée à environ 0,4% par PCR (17). Cinquièmement, l'absence de données entomologiques (densité vectorielle, taux d'inoculation entomologique) représente une lacune importante, d'autant que très peu d'études ont mesuré l'intensité de la transmission par le taux d'inoculation en Haïti (11). Enfin, le coefficient de Pearson suppose une relation linéaire, ce qui pourrait ne pas refléter la complexité de la relation pluie-paludisme, celle-ci étant reconnue comme unimodale (28).

Implications pour la santé publique

Malgré l'absence de significativité statistique, les tendances observées présentent un intérêt pour la planification sanitaire. La synchronisation partielle entre les saisons pluvieuses et les pics de cas (Figure 3) suggère qu'une intensification préventive des interventions avant et pendant les saisons des pluies pourrait être bénéfique. Concrètement, il serait pertinent de renforcer la distribution de moustiquaires imprégnées (MILDA) et les campagnes de pulvérisation intra-domiciliaire dès le mois de février–mars (avant la première saison pluvieuse) et en août (avant la seconde), avec un accent particulier sur Port-au-Prince où la corrélation positive tendancielle avec les précipitations modérées invite à une vigilance accrue.

Le renforcement du système de surveillance épidémiologique par l'intégration de données météorologiques en temps réel pourrait permettre la mise en place d'alertes précoces ciblées, conformément aux recommandations de l'OMS pour les zones d'élimination du paludisme. L'utilisation de modèles dynamiques tels que le Liverpool Malaria Model (LMM), déjà appliqué avec succès au contexte haïtien (5), représente une piste prometteuse pour intégrer les effets simultanés de la température et des précipitations dans la

prédiction de la transmission. Par ailleurs, la stratégie d'élimination d'Haïti pourrait bénéficier d'approches innovantes telles que les enquêtes de groupes d'accès facile (EAG) mises en œuvre par Druetz *et al.* (6) dans l'Artibonite et la Grand'Anse, qui permettent de compléter la surveillance de routine par des informations granulaires sur la prévalence parasitaire, y compris les infections asymptomatiques. Enfin, les avancées récentes en modélisation du contrôle vectoriel par *Wolbachia* (10) ouvrent des perspectives de recherche supplémentaires pour Haïti, bien que leur applicabilité au contexte haïtien nécessite des études pilotes.

Conclusion

En réponse à la question de recherche posée, cette étude n'a pas mis en évidence d'association statistiquement significative entre les précipitations atmosphériques et le taux de positivité des tests (TPR) du paludisme dans les communes de Port-au-Prince et de Delmas sur la période 2016–2018 ($p > 0,05$ pour toutes les variables pluviométriques testées). L'analyse révèle néanmoins des tendances différenciées entre les deux communes : des corrélations positives faibles à Port-au-Prince (pluie totale : $r = 0,241$; jours de pluie : $r = 0,138$) et des corrélations négatives faibles à Delmas ($r = -0,114$ à $-0,276$), reflétant l'influence probable des spécificités topographiques et urbanistiques locales sur l'écologie vectorielle d'*Anopheles albimanus*. La corrélation négative entre les précipitations maximales et les cas de paludisme, observée dans les deux communes, appuie l'hypothèse d'un effet de lessivage des gîtes larvaires lors d'épisodes pluvieux intenses, un mécanisme également validé par la modélisation climatique-épidémiologique appliquée à Haïti.

Ces résultats suggèrent que les précipitations seules ne constituent pas un prédicteur suffisant du TPR du paludisme en milieu urbain haïtien, et que des déterminants multifactoriels (température, densité vecto-

rielle, couverture des interventions, comportements de recours aux soins) doivent être considérés conjointement. Des études longitudinales sur des périodes plus étendues (≥ 10 ans), intégrant des variables climatiques complémentaires (température, humidité relative), des données entomologiques, des indicateurs socio-économiques et l'analyse de décalages temporels (time-lag), permettraient de mieux caractériser la relation entre précipitations et transmission palustre dans les communes urbaines du département de l'Ouest d'Haïti.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Unité Hydrométéorologique d'Haïti (UHM) et la Direction Sanitaire de l'Ouest (DSO) du MSPP pour l'accès aux données.

Références bibliographiques

1. Briët, O.J.T., Vounatsou, P., Gunawardena, D.M., Galappaththy, G.N. and Amerasinghe, P.H. 2008. Temporal correlation between malaria and rainfall in Sri Lanka. *Malaria Journal*, 7(1): 77.
2. Caillouet, K.A., Keating, J. and Eisele, T.P. 2008. Characterization of aquatic mosquito habitat, natural enemies, and immature mosquitoes in the Artibonite Valley, Haiti. *J. Vector Ecology*, 33 (1): 191–197.
3. Cameron, E., Young, A.J., Twohig, K.A., ..., and Battle, K.E. 2021. Mapping the endemicity and seasonality of clinical malaria for intervention targeting in Haiti using routine case data. *eLife*, 10: e62122.
4. Cohen, J. 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates. 567 pp.
5. Diouf, I., Sy, I., and Diakhaté, M. 2024. Assessing climate change impacts on public health in Haiti: a comprehensive study of disease distribution, modeling, and adaptation strategies. *Frontiers in Tropical Diseases*, 4, 1287499.

6. Druetz, T., Stresman, G., Ashton, R.A., van den Hoogen, L.L., Joseph, V., Fayette, C., ... and Eisele, T.P. 2020. Programmatic options for monitoring malaria in elimination settings: easy access group surveys to investigate *Plasmodium falciparum* epidemiology in two regions with differing endemicity in Haiti. *BMC medicine*, 18(1), 141.
7. Druetz, T., Stresman, G., Ashton, R.A., Joseph, V., van den Hoogen, L., Worges, M., ... and Eisele, T.P. 2022. The immediate effects of a combined mass drug administration and indoor residual spraying campaign to accelerate progress toward malaria elimination in Grande-Anse, Haiti. *The Journal of infectious diseases*, 225(9), 1611–1620.
8. Düzü, Ö., İnci, A., Yildirim, A., ..., and Aksoy, S. 2020. Vector-borne zoonotic diseases in Turkey: Rising threats on public health. *Turkish Journal of Parasitology*, 44(3) : 168–175.
9. Ferrão, J.L., Niquisse, S., Mendes, J.M. and Painho, M. 2017. Mapping and modelling malaria risk areas using climate, socio-demographic and clinical variables in Chimoio, Mozambique. *IJERPH*, 14(7): 795.
10. Florez, D., Young, A.J., Bernabé, K.J., Hyman, J.M., & Qu, Z. 2023. Modeling sustained transmission of *Wolbachia* among *Anopheles* mosquitoes: Implications for malaria control in Haiti. *Tropical Medicine and Infectious Disease*, 8(3), 162.
11. Frederick, J., Saint Jean, Y., Lemoine, J.F., Dotson, E.M., Mace, K.E., Chang, M., ... and Impoinvil, D.E. 2016. Malaria vector research and control in Haiti: a systematic review. *Malaria journal*, 15(1), 376.
12. Githeko, A.K., Lindsay, S.W., Confalonieri, U.E. et Patz, J.A. 2000. Climate change and vector-borne diseases: A regional analysis. *Bull. WHO*, 78(9) : 1136–1147.

13. Huang, F., Zhou, S., Zhang, S., Wang, H. et Tang, L. 2011. Temporal correlation analysis between malaria and meteorological factors in Motuo County, Tibet. *Malaria Journal*, 10 : 54.
14. Jaramillo-Underwood, A., Herman, C., Impoinvil, D., Sutcliff, A., Knipes, A., Worrell, C.M., ... and Rogier, E. 2022. Spatial, environmental, and individual associations with *Anopheles albimanus* salivary antigen IgG in Haitian children. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 12, 1033917.
15. Jules, J.R., Alencar, J., Suárez-Mutis, M.C., Baptiste, E.J., Albuquerque, H.D., Rosa-Freitas, M.G., ... and Silva-do-Nascimento, T.F. 2022. Malaria in Haiti: A descriptive study on spatial and temporal profile from 2009 to 2018. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, 55, e0355-2021.
16. Kumar, P., Pisudde, P. et Parth Sarthi, P. 2022. Meteorological linkage of malaria cases in the eastern state of India. *J. Climate Change and Health*, 5 : 100064.
17. Lemoine, J.F., Boncy, J., Filler, S., Kachur, S.P., Fitter, D. and Chang, M.A. 2017. Haïti's commitment to malaria elimination: progress in the face of challenges, 2010–2016. *Am. J. Trop. Med. Hyg.*, 97(4 Suppl) : 43–48.
18. Londono-Renteria, B., Eisele, T.P., Keating, J., James, M.A. and Wesson, D.M. 2010. Antibody response against *Anopheles albimanus* salivary protein as a measure of mosquito bite exposure in Haiti. *J. Med. Entomol.*, 47(6) : 1156–1163.
19. Mafwele, B.J. and Lee, J.W. 2022. Relationships between transmission of malaria in Africa and climate factors. *Scientific Reports*, 12(1) : 14392.
20. Moise, K., Achille, A.M., Duvalaire, R., Fedna, J., Thermidor, R., Bourdeau, B., ... and Racourt, C. 2024. Access and coverage of malaria services in Haiti in the context of elimination: a scoping review of the literature. *BMC Health Services Research*, 24(1), 1588.
21. Organisation mondiale de la Santé (OMS). 2023. Paludisme [Aide-mémoire]. OMS. Consulté le 4 janvier 2025, à l'adresse <https://www.who.int/fr/news-room/factsheets/detail/malaria>
22. Paaijmans, K.P., Wandago, M.O., Githeko, A.K. and Takken, W. 2007. Unexpected high losses of *Anopheles gambiae* larvae due to rainfall. *PLoS One*, 2(11) : e1146.
23. Paaijmans, K.P., Blanford, S., Bell, A.S., Blanford, J.I., Read, A.F., and Thomas, M.B. 2010. Influence of climate on malaria transmission depends on daily temperature variation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(34), 15135–15139.
24. Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD). 2023. Haïti fait preuve de résilience dans ses efforts d'éradication du paludisme. PNUD Haïti. <https://www.undp.org/fr/haiti/histoires/haiti-fait-preuve-de-resilience-dans-ses-efforts-deradication-du-paludisme>
25. Rogier, E., Herman, C., Huber, C.S., Hamre, K.E., Pierre, B., Mace, K.E., ... and Chang, M.A. 2020. Nationwide monitoring for *Plasmodium falciparum* drug-resistance alleles to chloroquine, sulfadoxine, and pyrimethamine, Haiti, 2016–2017. *Emerging Infectious Diseases*, 26(5), 902.
26. Rothman, K.J., Greenland, S., and Lash, T.L. 2008. Case-control studies (p. 111).
27. Samson, D.M., Archer, R.S., Ali-mi, T.O., Arheart, K.L., Impoinvil, D.E., Oscar, R., ... and Qualls, W.A. 2015. New baseline environmental assessment of mosquito ecology in northern Haiti during increased urbanization. *Journal of Vector Ecology*, 40(1), 46–58.
28. Villena, O.C., Arab, A., Lippi, C.A., Ryan, S.J., and Johnson, L.R. 2024. Influence of environmental, geographic, socio-demographic, and epidemiological factors on presence of malaria at the community level in two continents. *Scientific reports*, 14(1), 16734.
29. Wang, Z., Liu, Y., Li, Y., Wang, G., Lourenço, J., Kraemer, M., ... and Tian, H. 2022. The relationship between rising temperatures and malaria incidence in Hainan, China, from 1984 to 2010: a longitudinal cohort study. *The Lancet Planetary Health*, 6(4), e350–e358.
30. Wiwanitkit, V. 2006. Correlation between rainfall and the prevalence of malaria in Thailand. *J. Infection*, 52(3) : 227–230.
31. World Health Organization. 2021. World malaria report 2021. World Health Organization.
32. World Health Organization. 2022. World malaria report 2022. World Health Organization.
33. Yamba, E.I., Fink, A.H., Badu, K., Asare, E.O., Tompkins, A.M., and Amekudzi, L.K. 2023. Climate drivers of malaria transmission seasonality and their relative importance in sub-Saharan Africa. *GeoHealth*, 7(2), e2022GH000698.