

Paramètres climatologiques et la distribution temporelle du paludisme dans la ville de Kinshasa.

Yina N.D.¹, Ntombi M.K.^{1*}, Kiyombo M.² Mansiangi P.³

Abstract

Received
March 18, 2015

Revised:
June 23, 2015

Published online :
September 27, 2015

Keywords:

malaria, climate,
morbidity, mortality

Climatologic parameter and temporary malaria distribution in Kinshasa

Analysis of meteorological and malaria data collected between 2004 and 2013, showed the existence in Kinshasa of ties between them. There are especially meaningful linear interrelationships between malaria and thermal amplitude ($r = -0,82$), relative humidity ($r = 0,81$) and evaporation ($r = -0,7$).

Analysis of Main Components discriminated two big tendencies: the first consists of the climatic parameters that influences positively malaria - rains, relative humidity of air, and temperature -; and the second includes those that inhibit this pathology - evaporation, air pressure and big thermal amplitudes.

¹ Département des Sciences de la Terre, Université de Kinshasa, B.P. 190 Kinshasa XI, Kinshasa, R.D. Congo.

² Ecole de Santé Publique, Université de Kinshasa, B.P. 850 Kinshasa I, Kinshasa, R.D. Congo.

³ Département de Biologie, Université de Kinshasa, B.P. 190 Kinshasa XI, Kinshasa, R.D. Congo

* To whom correspondence should be addressed: muentomb@gmail.com

INTRODUCTION

Le paludisme demeure l'une des principales causes de morbi-mortalité en Afrique et particulièrement dans les pays subsahariens. Des estimations réalisées en 2010 révèlent que 80% des décès dus au paludisme sont enregistrés dans 14 pays seulement, dont plus de la moitié au Nigéria et en République Démocratique du Congo [RBM, 2010 ; PNL, 2013].

Le paludisme est endémique à Kinshasa [Karch, 1992 ; PNL, 2007]. Par an, l'on y estime à 900 000 le nombre d'individus qui en sont malades dont 17000 en décèdent [PNL, 2006 ; RBM, 2013]. Le paludisme en milieu urbain est la conjonction entre les facteurs humains et physiques. Ces derniers sont fondamentalement d'ordre climatique et géomorphologique [Mouchet, 2004].

Pour juguler cette endémie, chacun des facteurs doit être bien maîtrisé. C'est l'approche de la présente

étude, et ce d'autant plus que selon Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat [GIEC, 2007], les changements climatiques renforceront la vulnérabilité des populations au paludisme, surtout en Afrique sub-saharienne. D'où l'intérêt qu'il y a à mieux maîtriser son évolution dans le temps et dans l'espace notamment en milieu urbain. Cet article étudie ces aspects dans la ville de Kinshasa [ERMA, 2010].

MATERIEL ET METHODES

La ville de Kinshasa est située entre 15°7'15" et 16°30'00" de longitude est et entre 4°00'00" et 5°00'00" de latitude sud. Elle compte environ 8 millions d'habitants sur une superficie totale de 10 000 km² vivant dans 24 communes [Nzuzi, 2008].

Son climat est tropical humide de type Aw(4) - et donc avec comme entité pluviogénétique la Confluence Inter-Océanique dont la saison des pluies se produit en année hydrologique (Figure 1).

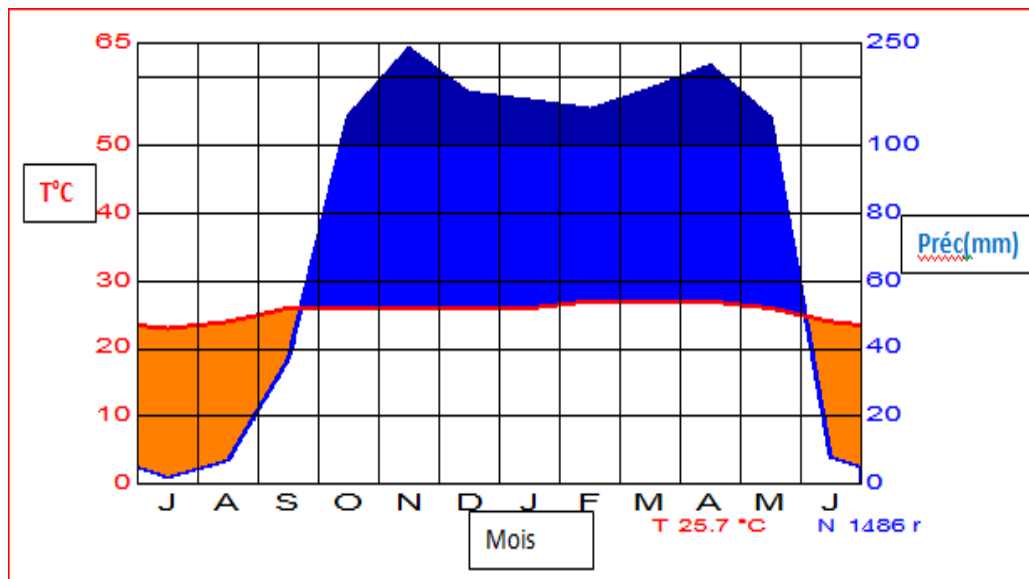


Figure 1. Diagramme ombrothermique de la ville de Kinshasa.

Les données épidémiologiques de morbidité du paludisme ont été collectées aux pas hebdomadaires pendant 10 ans – de 2004 à 2013 – dans toutes les zones de santé de Kinshasa. Ce sont des données issues du Ministère de la santé, notamment de l'inspection provinciale de la santé. Elles ont été ensuite groupées aux pas mensuels, puis comparées à celles issues de la Goutte Epaisse et du Test de Diagnostic Rapide réalisé sur un échantillon de 900 000 personnes pendant 2 ans, soit de 2012 à 2013. Elles sont Issues du financement du Fond Mondial à travers les zones de santé de la ville de Kinshasa. La morbidité, la mortalité, la prévalence et l'indice plasmodique sont les principaux indicateurs paludométriques qui ont été analysés.

Les variables climatologiques (température moyenne, amplitude thermique, température absolue, pluies, humidité relative de l'air, évaporation, rapport de mélange, pression atmosphérique au sol et ensoleillement) ont aussi été collectées aux mêmes échelles temporelles. Ces données proviennent de la METTELSAT (Agence nationale de météorologie et de télédétection par satellite).

Les statistiques tant exploratoires que décisionnelles ont été appliquées. Il s'est agi notamment de la corrélation linéaire de Bravais-Pearson (pour tester l'intensité de relation entre différentes variables), des tests de comparaison des moyennes de Student, d'indépendance de khi carré – les quels comparent les cas suspects du paludisme aux cas confirmés–, et d'Analyse en Composantes Principales (ACP) et de la Variance (ANOVA).

Selon Baccini [2010], lorsqu'on étudie simultanément un nombre important de variables quantitatives (ne serait-ce que 4), toute la question est donc celle de savoir comment en produire un graphique global. La difficulté procède de ce que les individus

étudiés ne sont plus représentés dans un plan – espace de dimension 2 –, mais plutôt dans un espace de dimension plus importante (par exemple 4).

L'objectif de l'Analyse en Composantes Principales est de revenir à un espace de dimension réduite (par exemple 2) mais en déformant le moins possible la réalité. Il s'agit donc d'obtenir le résumé le plus pertinent possible des données initiales. C'est la matrice des variances-covariances (ou celle des corrélations) qui va permettre de réaliser ce résumé pertinent, parce qu'on analyse essentiellement la dispersion des données considérées.

De cette matrice, on va extraire, en petit nombre, par un procédé mathématique approprié, les facteurs que l'on recherche. Ils vont permettre de réaliser les graphiques désirés dans cet espace de petite dimension (le nombre de facteurs retenus), en déformant le moins possible la configuration globale des individus – ou leurs graphiques – telle qu'elle est définie par l'ensemble des variables initiales (ainsi remplacées par les facteurs).

C'est l'interprétation de ces graphiques qui permettra de comprendre la structure des données analysées. Cette interprétation sera guidée par un certain nombre d'indicateurs numériques appelés aides en vue d'une interprétation à la fois la plus juste et la plus objective possible. Etant donné que les variables considérées dans la présente étude sont quantitatives, on a procédé à l'analyse en composantes principales en lieu et place d'une analyse des correspondances. L'ANOVA a été utilisée pour formaliser le lien entre les paramètres climatologiques et le paludisme.

A cette fin, les logiciels SPSS, XLSTAT et ARCGIS10.1 ont été utilisés.

RESULTATS ET DISCUSSION

Paramètres climatologiques

Mars a été le mois le plus chaud avec une température maximale moyenne de 31,9°C, tandis que juillet a été le plus froid avec une température minimale moyenne de 18,7°C. L'amplitude thermique moyenne mensuelle la plus élevée a été observée en septembre avec 9,8°C, alors que la moins élevée l'a été en décembre avec 7,6°C (Figure 1).

Avril a été le plus arrosé avec une lame d'eau moyenne de 386 mm. L'humidité relative moyenne mensuelle de l'air au sol a été de 81%. Elle a été souvent proche de la saturation en novembre, décembre et avril, mais très faible en septembre.

L'évaporation moyenne mensuelle a été de 82 mm, avec des valeurs plus élevées à la fin de la saison sèche

dite chaude - août et septembre -, où elle atteint respectivement 103 et 130mm; tandis que le minimum minimum a été constaté en pleine saison des pluies - novembre à décembre - avec respectivement 51 et 60 mm.

L'insolation moyenne mensuelle a été de 6 heures. Le maximum est enregistré en octobre -avec 6,2 heures - et le minimum -5,2 heures- en janvier.

La pression atmosphérique moyenne au sol a été de 976 Hectopascals avec son maximum de 980 Hectopascals en pleine saison sèche et le minimum - soit 974 Hectopascals en pleine saison des pluies. Enfin, mises à part les précipitations et l'évaporation, lesquelles ont eu des écart-types élevés, respectivement 136 et 22 mm, toutes les autres variables climatologiques considérées ont connu des écart-types inférieurs à 3 unités.

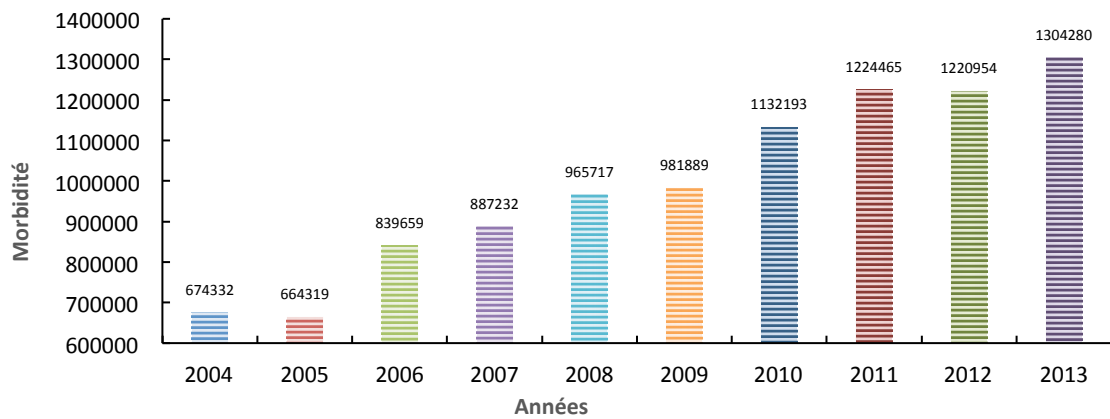


Figure 2. Analyse de la morbidité annuelle due au paludisme dans la ville de Kinshasa

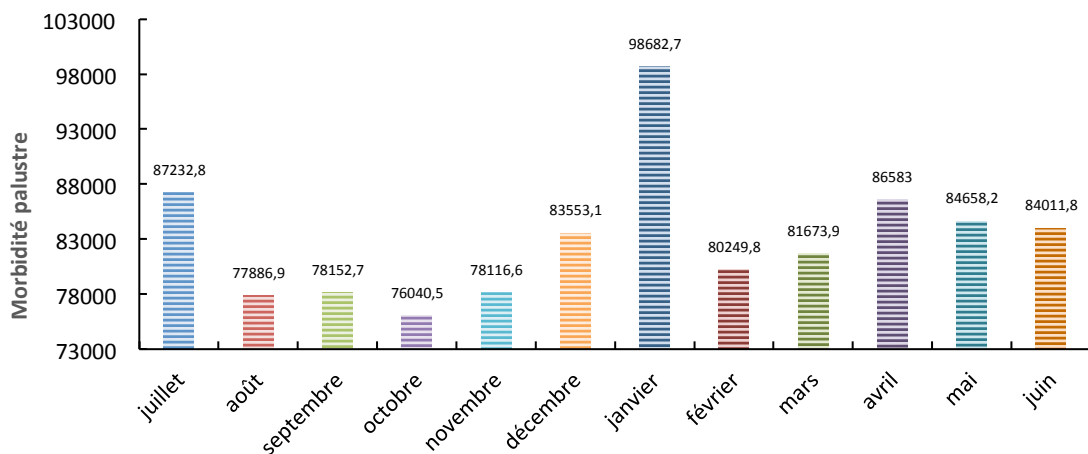


Figure 3. Evolution mensuelle de la morbidité palustre dans la ville de Kinshasa.

Paludisme

Morbidity

Les évolutions annuelle et mensuelle de la morbidité due au paludisme sont visualisées respectivement sur la

Figure 2 et la Figure 3. A l'échelle annuelle, la morbidité va crescendo au fil du temps. Ainsi, elle est la plus basse en 2004 et la plus élevée en 2013. Cependant, l'augmentation interannuelle n'est pas constante. Elle a été la plus importante entre 2009 et 2010 (environ 15%). En moyenne, chaque année 989 504 personnes

sont atteintes de paludisme. Le taux d'accroissement annuel est de 8%. La moyenne mensuelle affiche 83 070 cas avec la plus faible valeur en octobre - 76 041 cas - tandis que janvier et juillet ont concentré la plus forte morbidité avec respectivement près des 100 000 et 900 00 cas.

La courbe de tendance montre une double inflexion – l'une va d'août à novembre avec une moyenne de 77 550 cas, et l'autre s'étend de février à mars avec une moyenne de 80 960 cas -. Les périodes de pic – plus de 82 000 cas en moyenne - s'étendent d'avril à juillet et de décembre à janvier.

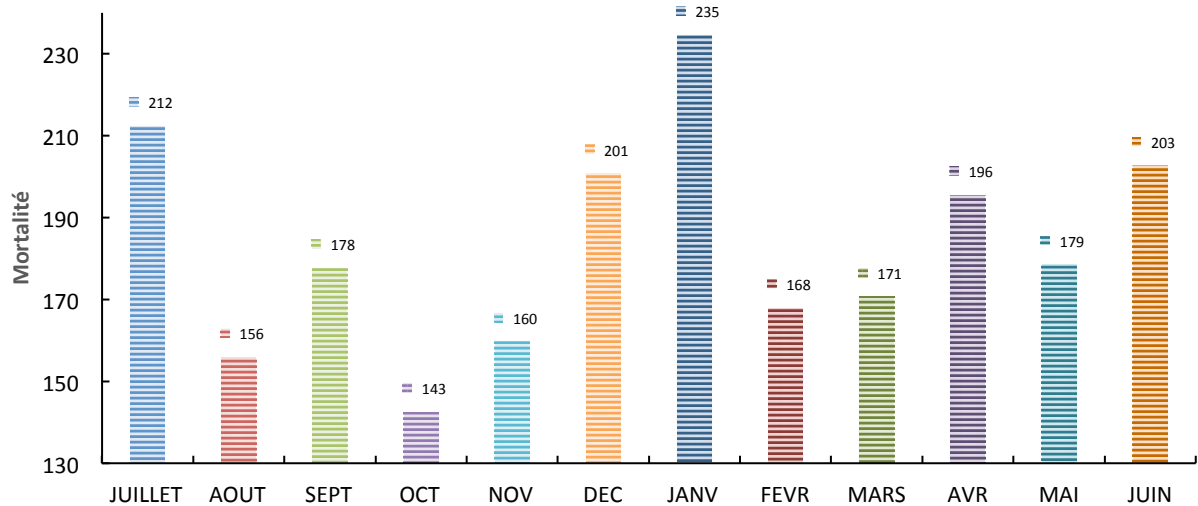


Figure 5. Evolution mensuelle de la mortalité due au paludisme dans la ville de Kinshasa.

Mortalité

La **Figure 4** et la **Figure 5** visualisent respectivement les évolutions annuelle et mensuelle de la mortalité due au paludisme.

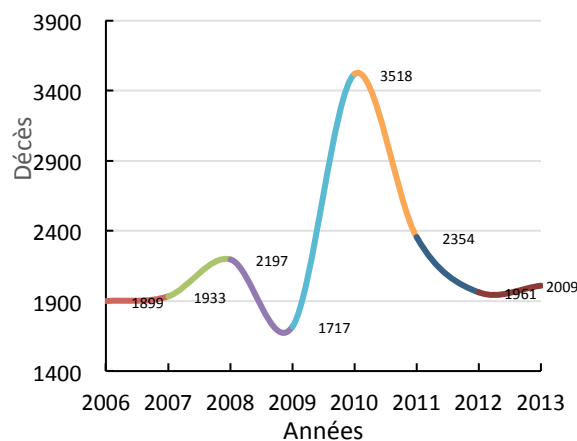


Figure 4. Evolution annuelle du nombre des décès dû au paludisme dans la ville de Kinshasa.

A l'échelle annuelle, les taux de mortalité et de létalité moyens sont respectivement de 0,03% et 0,2%. Ainsi, 2200 personnes en meurent chaque année. Pendant la période sous étude, avec 3500 cas, 2010 a été l'année où l'on a enregistré le plus de morts. Entre-

temps, en moyenne 1830 (écart-type = 27) personnes décèdent du paludisme chaque mois. Le maximum de décès est observé en janvier et le minimum l'est en octobre avec respectivement 235 et 143 cas (**Figure 5**).

Prévalence

La **Figure 6** et la **Figure 7** mettent en relief respectivement l'évolution annuelle et celle mensuelle de la prévalence palustre. Le taux de prévalence moyen annuel est d'environ 16% avec un maximum de 17% en 2011 et un minimum de 14,5% en 2006. Environ 1,1% de la population est frappé mensuellement par le paludisme, avec la plus forte occurrence en janvier (1.3%) et la plus faible en octobre (1%).

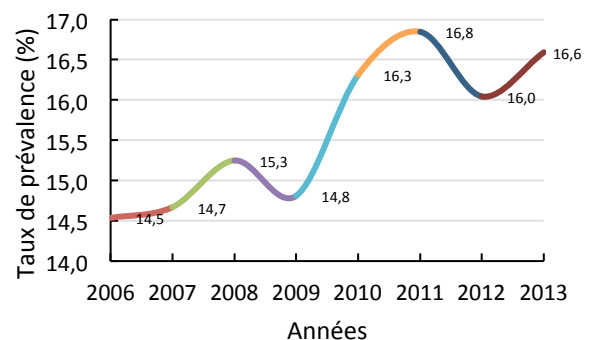


Figure 6. Evolution annuelle du taux de prévalence dû au paludisme dans la ville de Kinshasa.

Analyse de l'Indice Plasmodique (IP)

La Goutte Épaisse (GE) et le Test de diagnostic Rapide (TDR) réalisés sur environ 900 000 personnes,

donnent une moyenne mensuelle de 66%, un maximum moyen mensuel de 72% en décembre, et un minimum moyen – environ 57% - en septembre et octobre (Figure 8).

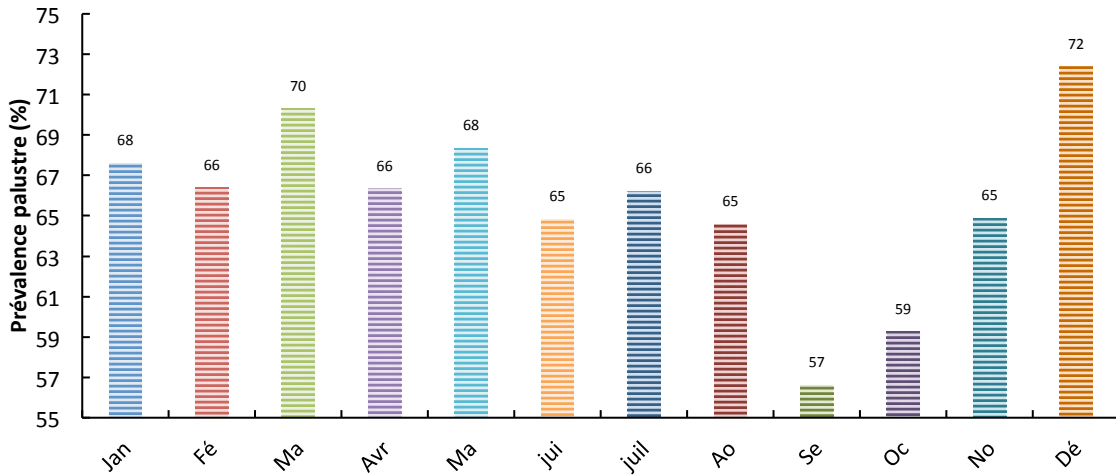


Figure 8. Taux de positivité mensuel de la GE et du TDR (IP).

Le résultat comparaison entre les données de morbidité clinique et celles de la GE apparaît sur la Figure 9. Il s’y dégage une fluctuation similaire pour les deux variables. Il y a une hausse en juin-juillet, puis une baisse- la plus importante - entre août et octobre ; et de nouveau une hausse entre novembre et janvier suivie d’une petite baisse. Les analyses statistiques inférentielles confirment cette similarité d’évolution :

- le coefficient de corrélation vaut 0.9 ; ce qui signifie que les deux paramètres sont très significativement corrélés positivement ;
- le test t de Student atteste qu’il n’y a pas de différence significative entre les moyennes respectives (8% et 8,3%, p = 0.001) de ces deux échantillons ($T_{calculé} = -4.035$ étant inférieur au T tabulé au seuil $T_{\alpha, 0.5=2}$).

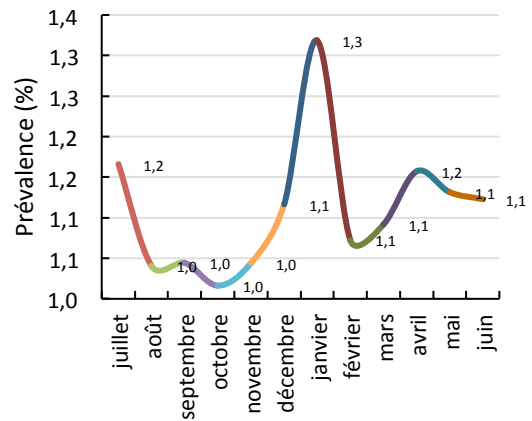


Figure 7. Evolution mensuelle de la prévalence palustre dans la ville de Kinshasa.

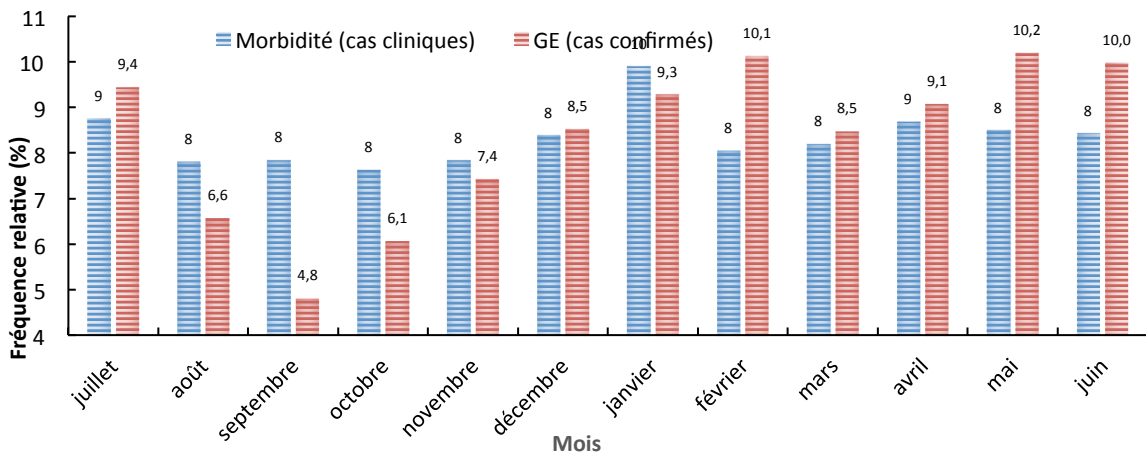


Figure 9. Evolution comparée entre les données de morbidité cliniques et celles de GE.

Impact des paramètres climatiques sur la distribution mensuelle du paludisme

Afin de savoir si la distribution des IP au cours de mois se fait de manière fortuite ou pas, nous avons procédé concomitamment à l'analyse statistique de la contingence et de celle du test d'indépendance de χ^2 .

Tableau I. Distribution mensuelle des IP

Mois	IP	Autres pathologies	Total
Janvier	55057	26391	81448
Février	60085	30411	90496
Mars	50272	21223	71495
Avril	53802	27292	81094
Mai	60448	27994	88442
Juin	59186	32077	91263
Juillet	56006	28576	84582
Aout	38997	21371	60368
Septembre	28528	21857	50385
Octobre	36013	24757	60770
Novembre	44101	23875	67976
Décembre	50607	19300	69907
Total	593102	305124	898226

Tableau II. Ecart entre les effectifs observés et ceux théoriques

Mois	IP	Autres pathologies
Janvier	1276.57982	-1276.57982
Février	330.151452	-330.151452
Mars	3063.58309	-3063.58309
Avril	255.32735	-255.32735
Mai	2049.41536	-2049.41536
Juin	-1075.30153	1075.30153
Juillet	156.187855	-156.187855
Aout	-864.217039	864.217039
Septembre	-4741.40466	4741.40466
Octobre	-4113.65915	4113.65915
Novembre	-783.808002	783.808002
Décembre	4447.14545	-4447.14545

Analyse de la contingence

Le **Tableau I** donne simultanément la distribution mensuelle des IP et celles des autres pathologies alors que le **Tableau II** présente les écarts entre les effectifs observés et ceux théoriques. D'ordinaire, le tableau de contingence comprend trois types de renseignements [CHADULE, 1997] :

- la contingence de la case donnant une valeur proche de zéro. Cette situation correspond à celle de l'indépendance et signifie donc dans notre cas que la distribution des IP n'obéit à aucune contrainte mensuelle. Cette situation n'est pas observée;
- les contingences sont positives. Dans ce cas, les effectifs théoriques sont supérieurs à ceux espérés pour pouvoir réaliser l'indépendance des valeurs. Cette situation s'oppose à l'indépendance et signifie donc que les effectifs des IP observés sont préférentiellement liés aux conditions mensuelles auxquelles ils se rapportent. C'est cette situation qui se passe de décembre à juillet -excepté, le mois de juin- ;
- les valeurs de contingence sont négatives, c'est-à-dire que les effectifs réellement observés sont bien inférieurs à ceux requis pour réaliser l'indépendance. Dans ce cas, les conditions mensuelles qui caractérisent une telle période ne favorisent pas les IP. Il en a été ainsi de juin à novembre- excepté le mois de juillet-.

Ainsi, vus sous l'angle de quatre saisons hydro climatologiques: Début de la Saison Sèche (DSS), Pleine Saison Sèche (PSS), Début de la Saison des Pluies (DSP) et Pleine Saison des Pluies (PSP)-, les résultats des signes de contingence peuvent être interprétés comme suit: pendant 3 périodes hydro climatologiques: DSS (mois de mai), PSS (mois de juillet) et PSP (mois de décembre), les valeurs de contingence des IP sont positives. Ce qui signifie que le paludisme y montre une prépondérance, tandis que le contraire de cette situation n'est observé que durant le DSP (septembre et octobre).

Tableau III. Valeur du χ^2

Mois	IP	Autres pathologies	Total
Janvier	30.3020325	58.9012862	89.2033187
Février	1.82411944	3.54573515	5.36985459
Mars	198.810762	386.449642	585.260404
Avril	1.21748098	2.36654738	3.58402836
Mai	71.9213206	139.801127	211.722448
Juin	19.1876602	37.2970977	56.4847578
Juillet	0.43679012	0.84903545	1.28582556
Aout	18.7367859	36.4206854	55.1574713
Septembre	675.723488	1313.47568	1989.19916
Octobre	421.719424	819.740938	1241.46036
Novembre	13.6873702	26.6055985	40.2929687
Décembre	428.448114	832.820209	1261.26832
Total	1882.01535	3658.27358	5540.28892

Calcul de la valeur de χ^2

Le **Tableau III** indique ce calcul. En comparant le χ^2 calculé [5540,3] à celui tabulé [0,001 = 31,26] avec une erreur type = 0, on est enclin de rejeter l'hypothèse d'indépendance des effectifs réellement observés. Il se confirme donc que la distribution des IP se fait préférentiellement selon les conditions propres à chaque mois, mieux, à chaque période hydro climatologique. A cet effet, sous l'angle mensuel, septembre, octobre et décembre contribuent à eux seuls pour 80% à la valeur du χ^2 calculé montrant ainsi leur plus grande corrélation avec des IP.

Le test du χ^2 permet de mesurer l'indépendance de deux caractères différents, et dont l'observation est synthétisée sous la forme d'un tableau de contingence mais n'en donnait pas la raison [SAPORTA, 1994]. D'autres paramètres extérieurs doivent ainsi expliquer l'absence ou le motif de cette liaison, et dans le cas sous étude, les conditions climatiques.

Impact des paramètres climatologiques sur la distribution temporelle du paludisme

L'analyse des coefficients de corrélation linéaire simple de Bravais-Pearson entre les indices plasmodiques et les variables climatiques dégage une

corrélation linéaire non-significative avec la pluviométrie ($r = 0,4$), la température maximale ($r = -0,2$), le rapport de mélange ($r = 0,3$), l'ensoleillement ($r = -0,3$), la température minimale ($r = 0,2$), la température moyenne ($r = 0,04$) et la pression atmosphérique ($r = -0,23$). Mais au contraire, cette corrélation devient significative avec l'amplitude thermique ($r = -0,82$), l'humidité relative ($r = 0,81$) et l'évaporation ($r = -0,7$).

Toutefois, vu l'interaction complexe entre les variables climatologiques, l'isolement de l'une d'entre elles ne traduit pas forcément son impact réel sur le paludisme. D'où l'on recourt à présent à l'analyse intégrant plusieurs critères.

Analyse multivariée

Analyse en Composantes Principales (ACP)

Caractérisation des données

L'ACP a été réalisée sans axe de rotation, avec une variance $1/n$, le coefficient de corrélation était celui de Pearson. Le seuil de réalisation est de 0,05. Les 12 variables contenues dans le **Tableau IV** comprennent au total 144 individus analysés sur les 12 mois répartis au rythme hydro pluviométrique constituant ainsi une matrice carrée.

Tableau IV : statistiques descriptives sur les variables quantitatives

Variables	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
paludisme	Prévalence palustre	42.142	52.845	49.051	2.908
TMAX	Température maximale	27.719	32.013	30.332	1.483
ampl	Amplitude thermique	7.623	9.807	8.844	0.686
RW	Rapport de mélange	15.400	20.100	17.993	1.478
préc	Pluviométrie	0.000	385.500	172.950	135.654
Hr	Humidité relative	74.739	85.048	81.432	3.532
Evap	Evaporation	51.100	129.500	81.942	21.684
Ensoleil	Ensoleillement	5.200	6.500	5.867	0.408
TMIN	Température minimale	18.735	22.939	21.488	1.468
tmoy	Température moyenne	23.227	27.469	25.910	1.435
pression	Pression atmosphérique	973.871	980.343	975.556	1.859
tmin_abs	Température minimale absolue	16.400	21.400	19.225	1.548

Résultats et interprétation de l'ACP

Matrice de corrélation entre les variables

L'analyse de ces données contenues dans le **Tableau V** révèle des faits importants suivants:

- hormis la diagonale, un coefficient de corrélation positif significatif lie le paludisme à l'humidité relative de l'air, et par ricochet, à tous les autres éléments liés à cette dernière,

notamment les précipitations et les températures minimales ;

- un coefficient de corrélation négatif significatif existe entre le paludisme et les amplitudes thermiques et l'évaporation, mais ne s'étend pas de la même façon aux autres éléments liés à ces dernières ;
- l'ensoleillement ne présente aucun lien significatif avec la pathologie.

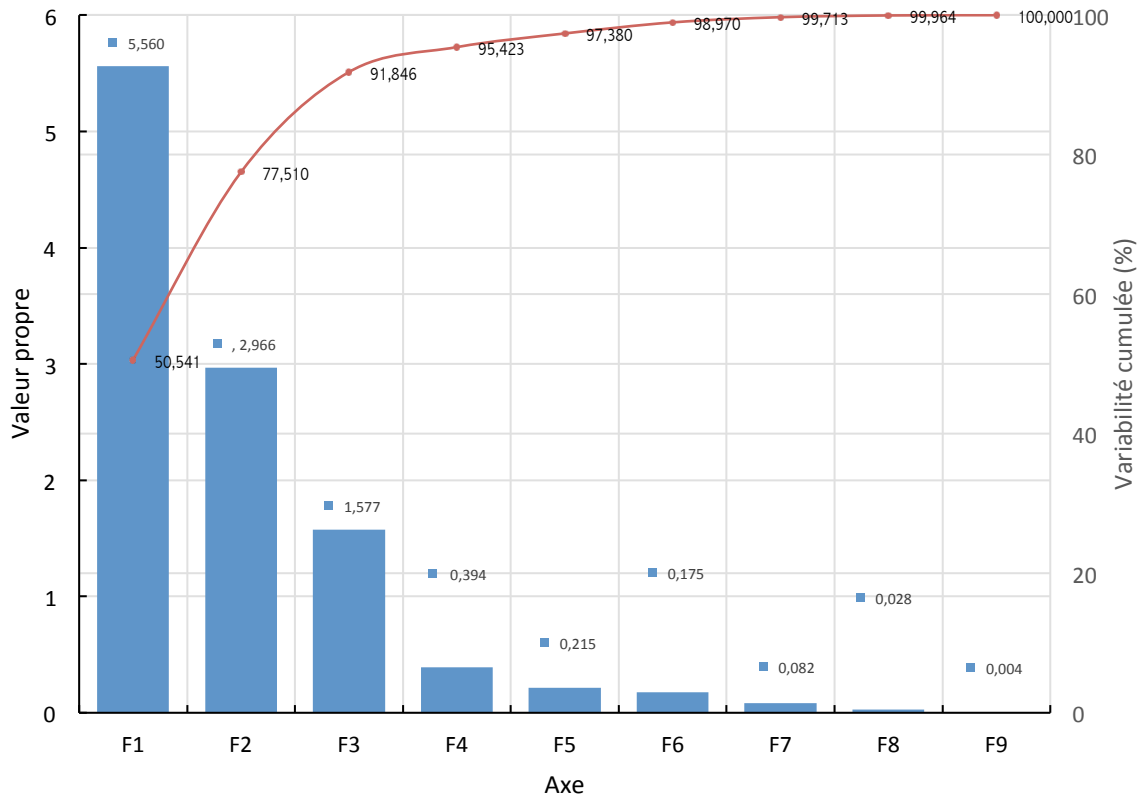


Figure 10. Histogramme des valeurs propres

Tableau V : Présentation de la matrice de corrélation entre les variables étudiées

Paludism	1											
T _{MAX}	-0.148	1										
Ampl	-0.817	0.252	1									
RW	0.286	-0.362	-0.546	1								
préc	0.380	0.674	-0.354	0.123	1							
Hr	0.810	0.253	-0.783	0.097	0.656	1						
Evap	-0.672	-0.274	0.748	-0.323	-0.678	-0.884	1					
Ensoleil	-0.278	0.059	0.256	0.449	0.101	-0.398	0.056	1				
T _{MIN}	0.233	0.892	-0.212	-0.111	0.846	0.622	-0.626	-0.060	1			
t _{moy}	0.043	0.973	0.021	-0.244	0.781	0.449	-0.462	0.000	0.972	1		
Pression	-0.229	-0.839	0.162	0.032	-0.815	-0.502	0.513	-0.038	-0.923	-0.905	1	
t _{min_abs}	-0.501	-0.150	0.733	-0.155	-0.510	-0.726	0.688	0.327	-0.494	-0.330	0.439	1
Palud.	T _{MAX}	Ampl.	RW	Préc.	Hr	Evap	Ensol.	T _{MIN}	t _{moy}	Pres	t _{min_a}	

Analyse des valeurs propres

Les valeurs propres auxquelles sont associées les variances et les variances cumulées exprimées en pourcentage (Figure 10).

Il y apparaît que le premier axe englobe à lui-seul 51% des valeurs et que les 2 premiers concentrent ensemble 77,5% de l'inertie totale. Néanmoins, en

considérant le critère empirique de *Cattel* ou critère du Coude, on peut retenir comme pertinents les 3 premiers facteurs, car on observe une forte rupture de la variation entre l'axe 3 et l'axe 4 comparativement à la pente entre les axes 2 et 3. Le critère de *Kayser* qui stipule que l'on ne retienne que les axes dont les valeurs propres sont supérieures à la moyenne – en l'occurrence 1,2-, conduit également à ne retenir que les axes 1, 2 et 3.

Analyse des coordonnées des variables

Les coordonnées des 3 premiers axes retenus sont reprises dans le **Tableau VI**. Ces axes concentrent 91,85% de variances. Les coordonnées centrées réduites contenues dans ce tableau représentent les corrélations entre les variables et les différents axes factoriels. De l'observation de ce **Tableau VI**, on remarque que :

- hormis 2 variables – l'insolation et le rapport de mélange-, toutes les autres présentent une corrélation significative avec le premier axe factoriel ;
- dans le deuxième axe factoriel, 5 variables lui sont fortement corrélées – paludisme,

température maximale, amplitude thermique, rapport de mélange et température moyenne - ;

- dans le troisième axe, seuls le rapport de mélange et l'ensoleillement y présentent une forte corrélation ;
- l'analyse des signes de ces coefficients de corrélation met en lumière les oppositions des variables sur les différents axes. Par exemple, sur le premier axe factoriel, le paludisme, les températures maximales, les précipitations, l'humidité relative, les températures minimales et les températures moyennes s'opposent aux amplitudes thermiques, évaporation, pression atmosphérique au sol et température minimale absolue.

Tableau VI. Coordonnées des variables pour les 3 axes retenus

	Coordonnées centrées réduites			Cosinus carrés des variables			Contribution des variables (%)		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1(%)	F2 (%)	F3 (%)
paludisme	0.569	-0.666	-0.092	0.324	0.444	0.008	5.390	13.970	0.535
TMAX	0.633	0.767	-0.011	0.401	0.589	0.000	6.684	18.526	0.008
ampl	-0.571	0.801	-0.041	0.326	0.641	0.002	5.434	20.161	0.109
RW	0.086	-0.549	0.760	0.007	0.301	0.577	0.124	9.481	36.859
préc	0.883	0.180	0.224	0.780	0.032	0.050	12.993	1.022	3.194
Hr	0.866	-0.394	-0.215	0.749	0.155	0.046	12.483	4.875	2.947
Evap	-0.848	0.354	-0.134	0.719	0.125	0.018	11.975	3.942	1.150
Ensoleil	-0.158	0.229	0.908	0.025	0.053	0.824	0.415	1.655	52.659
TMIN	0.906	0.401	0.008	0.821	0.161	0.000	13.682	5.062	0.004
tmoy	0.791	0.602	-0.001	0.625	0.362	0.000	10.418	11.385	0.000
pression	-0.840	-0.415	-0.116	0.706	0.172	0.014	11.757	5.422	0.866
tmin_abs	-0.720	0.378	0.162	0.519	0.143	0.026	8.644	4.499	1.669

La **Figure 11** visualise cette opposition sur les axes factoriels 1 et 2 :

- sur l'axe factoriel 2, le paludisme, le rapport de mélange, l'humidité relative et la pression atmosphérique s'opposent aux autres variables ;
- enfin, sur l'axe factoriel 3, seuls le rapport de mélange et l'ensoleillement s'opposent aux autres variables.

Par conséquent, il y a lieu de conclure qu'au premier plan, le paludisme évolue positivement avec le rapport de mélange, l'humidité relative, les précipitations, les températures minimales, les températures moyennes et les températures maximales.

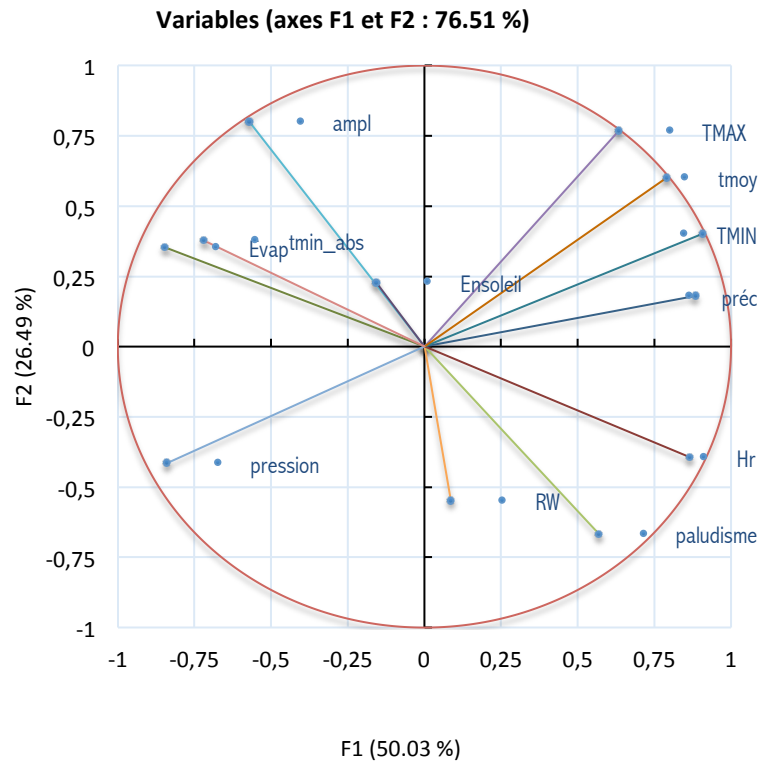


Figure 11. Représentation des variables sur les plans factoriels 1 et 2.

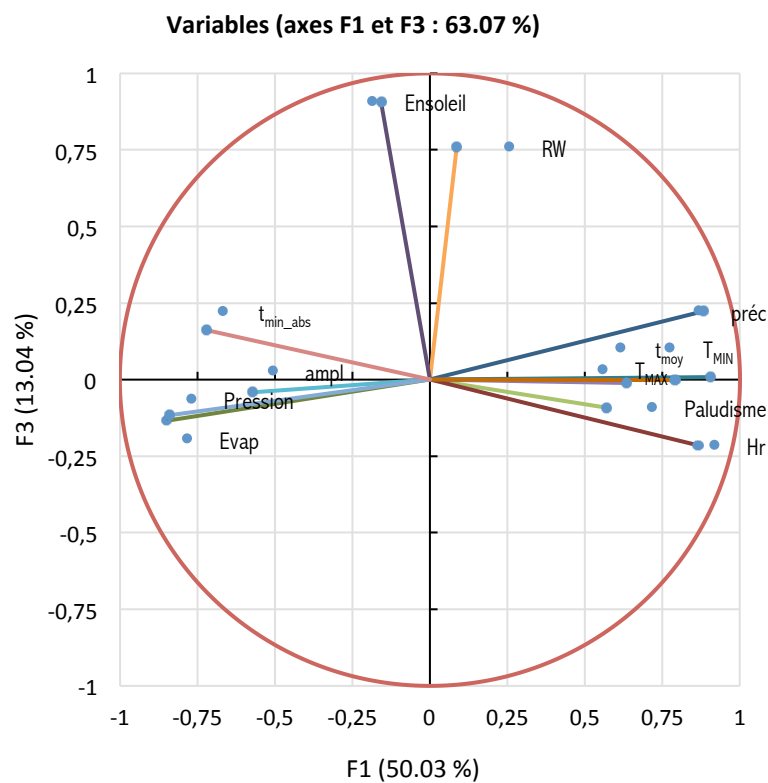


Figure 12. Représentation des variables sur les plans factoriels 1 et 3.

La représentation des variables sur le plan 1 et 3 est illustrée par la **Figure 12**.

L'opposition entre les variables climatiques qui influent positivement sur le paludisme et celles qui le

sont négativement, apparaît plus nettement, comme déjà libellé au point précédent. La représentation des

variables sur le plan 2 et 3 est visualisée par la **Figure 13**.

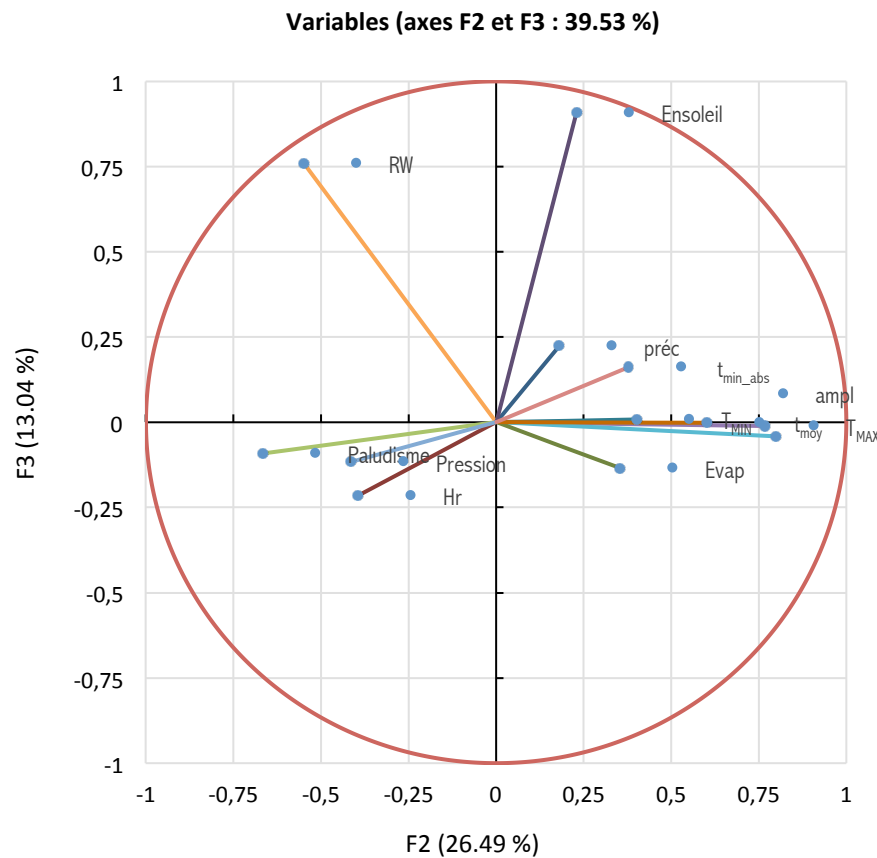


Figure 13. Représentation des variables sur les plans factoriels 1 et 3.

Sur cette figure, le paludisme est plus influencé par la pression atmosphérique au sol et l'humidité relative de l'air que par les autres variables.

Analyse de la qualité de la représentation des variables par rapport aux différents axes factoriels

La qualité de la représentation des différentes variables par rapport à l'axe factoriel s'exprime à travers les valeurs de cosinus de variables (**Tableau VI**).

En principe, lorsque l'angle est proche de 0, c'est-à-dire que le cosinus est proche de 1, l'individu est bien représenté. Dans le cas contraire, l'angle est proche de 90° et donc le cosinus est proche de 0. Ainsi, les précipitations, l'humidité relative, l'évaporation, la température minimale et la pression atmosphérique sont très bien représentées sur le premier axe, tandis que la température moyenne l'y est moins bien. Quant au deuxième axe, le paludisme, la température maximale et l'amplitude thermique y sont moyennement bien représentés. Et enfin, sur le troisième axe, seuls l'ensoleillement et le rapport de mélange y sont respectivement bien représenté et moyennement représenté.

Analyse de la contribution des variables à la formation des axes factoriels

Les contributions des variables aux axes factoriels sont consignées dans le **Tableau VI**, et la **Figure 11** à **Figure 13** en constituent les illustrations graphiques. Il apparaît dans le **Tableau VI** que la moitié des variables contribue à près de 80% dans la réalisation du premier axe. Il s'agit des précipitations, de l'humidité relative, de l'évaporation, de la température minimale, de la température moyenne et de la pression atmosphérique. Les autres variables y contribuent faiblement (moins de 10% chacune).

Sur le deuxième axe, seul 1/3 des variables contribue à sa construction : le paludisme, la température maximale, l'amplitude thermique et la température moyenne.

Par contre sur l'axe 3, le rapport de mélange et l'ensoleillement apportent à eux seuls près de 90% à son inertie totale.

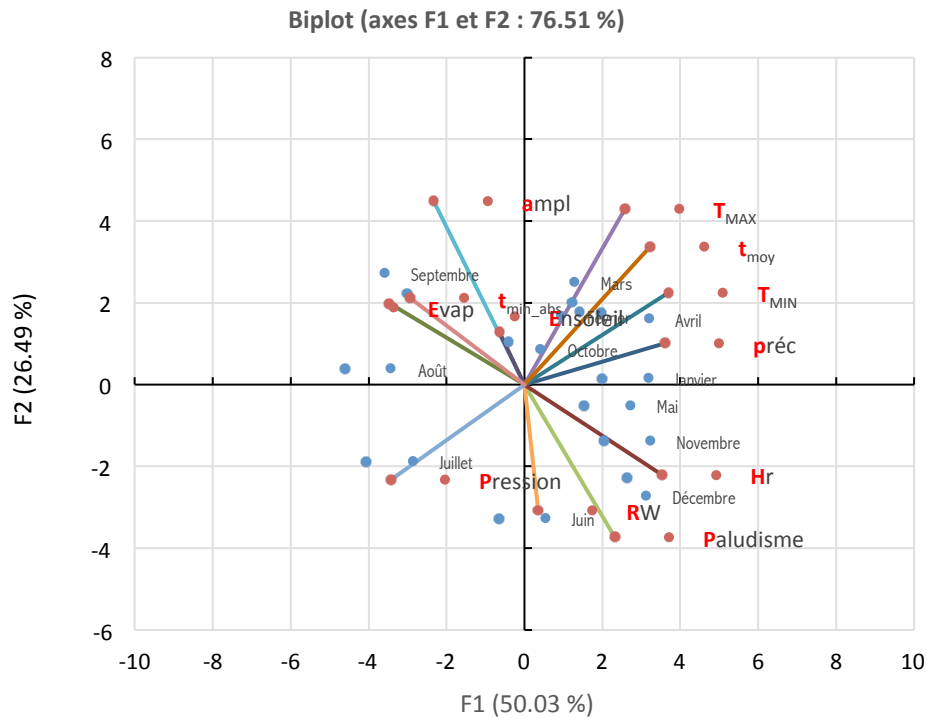


Figure 14. Représentation des variables et des observations sur le plan factoriel 1 et 2.

Analyse des observations

Les données relatives aux observations – leurs contributions, leurs cosinus carrés et leurs coordonnées- sur les axes sont condensées dans le **Tableau IX.**

. Sur le premier axe, les mois de juillet, août et dans une moindre mesure septembre, contribuent à eux seuls pour plus de 60% à l'inertie totale. Septembre, décembre et surtout août sont les principaux contributeurs à l'inertie totale sur le deuxième axe tandis qu'octobre, novembre, janvier et mars le sont sur le troisième.

Tableau VII. Contributions, cosinus carrés et coordonnées des observations

	F1 (%)	F2 (%)	F3 (%)	Cos ² F1	Cos ² F2	Cos ² F3	Coord_F1	Coord_F2	Coord_F3
Juillet	22.809	9.351	2.850	0.751	0.163	0.024	-4.054	-1.889	-0.732
Août	29.655	0.380	0.012	0.926	0.006	0.000	-4.622	0.381	0.048
Septembre	12.568	12.974	4.466	0.544	0.297	0.050	-3.009	2.225	0.916
Octobre	0.238	2.892	19.740	0.032	0.209	0.701	-0.414	1.050	1.925
Novembre	5.750	5.034	21.271	0.400	0.185	0.386	2.035	-1.386	1.999
Décembre	9.558	13.592	2.772	0.501	0.377	0.038	2.624	-2.277	0.722
Janvier	5.493	0.062	21.205	0.405	0.002	0.408	1.989	0.154	-1.996
Février	2.753	8.273	3.568	0.247	0.393	0.083	1.408	1.776	-0.819
Mars	2.063	10.566	16.044	0.167	0.454	0.339	1.219	2.008	-1.736
Avril	5.291	8.044	1.022	0.462	0.372	0.023	1.952	1.752	0.438
Mai	3.228	0.706	0.597	0.491	0.057	0.024	1.525	-0.519	0.335
Juin	0.595	28.124	6.453	0.032	0.804	0.091	-0.655	-3.275	-1.101

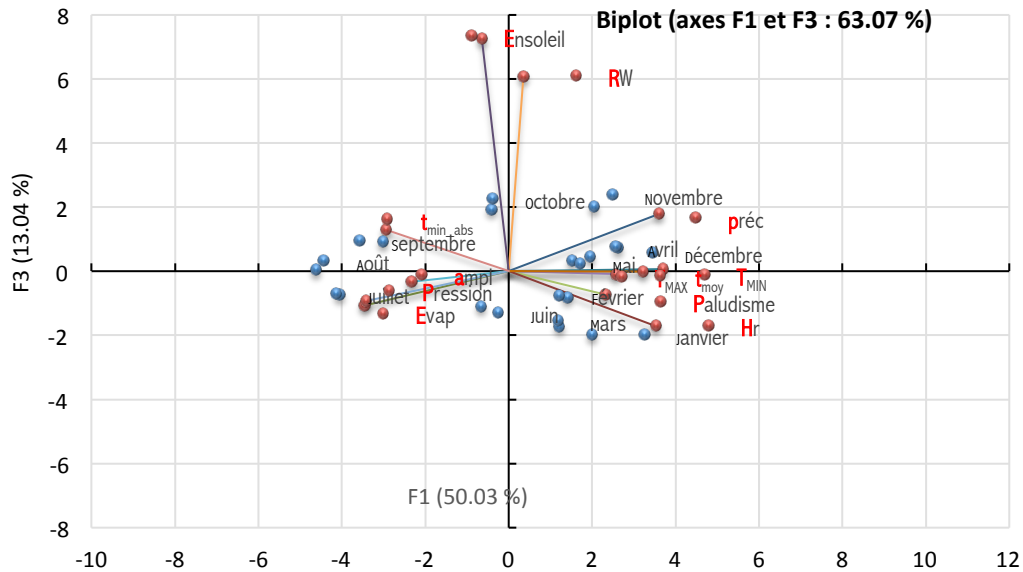


Figure 15. Représentation des variables et des observations sur le plan factoriel 1 et 3.

Les valeurs des cosinus carrés d'observations qui renseignent sur la qualité de projection de chaque point sur le plan relativement à ses coordonnées, montrent que les mois de juillet et août sont mieux représentés sur le premier axe, suivis par novembre, décembre, avril et mai lesquels sont moyennement représentés. Sur le deuxième et le troisième axe, seuls juin et octobre y sont mieux projetés. Les Figures 14-16 visualisent les projections des individus qui sont mis directement en relation avec les variables selon les différents plans. Au vu de ces figures, on constate que :

- le paludisme est favorisé par l'humidité relative aux mois de décembre, novembre et surtout mai,

mais s'oppose aux augmentations de la pression atmosphérique caractéristiques du mois de juillet ;

- janvier, avril, mars et février sont beaucoup plus caractérisés par les augmentations de précipitations et des températures lesquelles dopent le paludisme alors que les amplitudes thermiques et les évaporations lesquelles caractérisant la saison sèche chaude (août et septembre) et octobre, semblent avoir un impact très négatif (diminution de la prévalence) sur le paludisme.

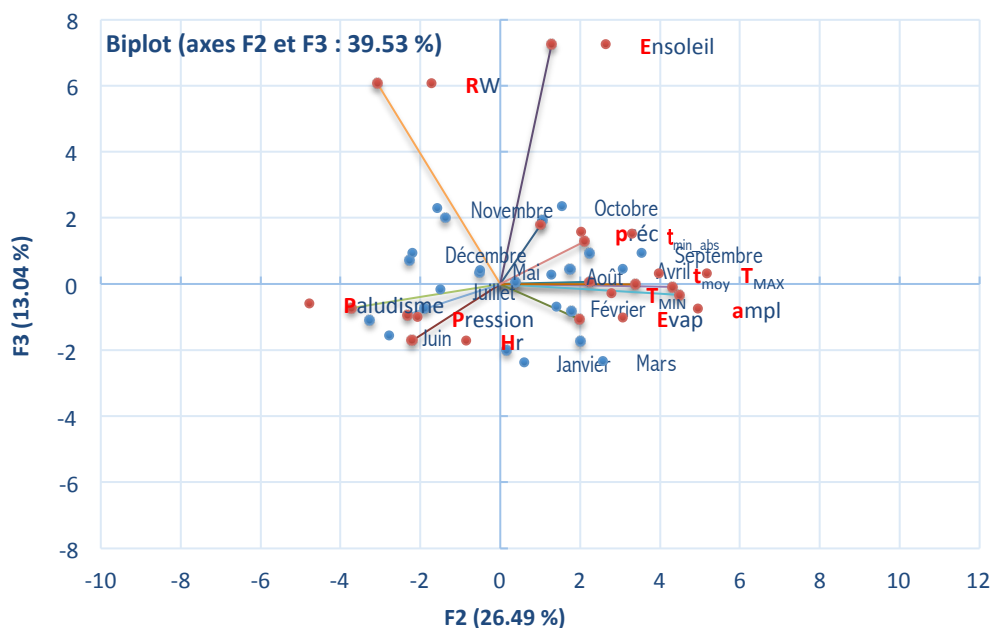


Figure 16. Représentation des variables et des observations sur le plan factoriel 2 et 3.

Tableau VIII. Caractéristiques des variables

Variables	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Paludisme	12	0	12	42.142	52.845	49.051	2.908
Ampl_T	12	0	12	7.623	9.807	8.844	0.686
Préc	12	0	12	0.000	385.500	172.950	135.654
Hr	12	0	12	74.739	85.048	81.432	3.532
Evap	12	0	12	51.100	129.500	81.942	21.684
Tminabs	12	0	12	16.400	21.400	19.225	1.548

Tableau IX. Matrice de corrélation

Variables	Ampl_T	Préc	Hr	Evap	Tminabs	Paludisme
Ampl_T	1.000	-0.354	-0.783	0.748	0.733	-0.817
Préc	-0.354	1.000	0.656	-0.678	-0.510	0.380
Hr	-0.783	0.656	1.000	-0.884	-0.726	0.810
Evap	0.748	-0.678	-0.884	1.000	0.688	-0.672
Tminabs	0.733	-0.510	-0.726	0.688	1.000	-0.501
Paludisme	-0.817	0.380	0.810	-0.672	-0.501	1.000

La combinaison des variables et des observations sur le plan factoriel distingue nettement deux saisons hydro climatologiques auxquelles sont associées les paramètres climatiques qui impactent sur le paludisme. La première – la saison des pluies – va de novembre à mai où le paludisme est associé positivement à l'humidité relative, aux précipitations et aux températures. Tandis que durant la deuxième période – la saison sèche – constituée des restes de l'évaporation, la pression atmosphérique, les amplitudes thermiques et la température minimale absolue, impactent négativement sur le paludisme.

Enfin, on aperçoit l'isolement des mois de juin et octobre, lesquels sont les mois transitoires, le premier vers la saison sèche froide et le second vers la grande saison des pluies. D'après les informations des **Tableau 4, 7, 8**, lesquels donnent respectivement les valeurs des cosinus carrées des variables et des observations, seuls le rapport de mélange et l'ensoleillement – pour les variables – ; et octobre et janvier – pour les observations –, sont ici bien projetés.

Modélisation de l'évolution temporelle du paludisme

Analyse de la variance et de la régression linéaire multiple

L'analyse multi variée au moyen de l'ACP a démontré l'impact différentiel des variables climatologiques sur le paludisme à l'échelle mensuelle. Cinq variables climatologiques ont émergé du lot :

- les amplitudes thermiques ;
- les précipitations ;
- l'humidité relative de l'air ;
- l'évaporation et ;
- la Température minimale absolue.

Ce sont donc ces paramètres qui font l'objet de la modélisation.

Plusieurs techniques statistiques peuvent être utilisées pour formaliser les relations entre les paramètres climatologiques et la prévalence palustre mensuelle. Dans la présente étude, vu que toutes les variables sont quantitatives, l'Analyse de la Variance (ANOVA) et la régression multiple ont été utilisées. Dans le **Tableau VIII**, la prévalence palustre mensuelle est la variable à expliquer tandis que les 5 paramètres climatologiques sont celles explicatives. Leurs coefficients de corrélation sont repris dans le **Tableau IX**. On y lit que 4 des 5 coefficients de corrélation montrent un lien assez fort avec le paludisme. La seule faiblesse semble s'observer avec la pluviométrie. Néanmoins, la moyenne des coefficients de corrélation est de 0,65 ; donc significatif.

Le coefficient d'ajustement du paludisme est contenu dans le **Tableau XI**.

Le coefficient de détermination (R^2) montre qu'à l'échelle mensuelle, les 5 variables ci-dessus expliquent jusqu'à 82,7% de la variance du paludisme. Afin d'estimer l'efficacité de la quantité d'informations apportées par les 5 variables prises dans leur globalité,

le test de Fisher a été utilisé, et le résultat obtenu est noté dans le **Tableau XI**. Ce test confirme que ces variables influent significativement sur le modèle. En effet, la probabilité de se tromper est de moins de 3% en affirmant que les 5 variables apportent suffisamment d'informations au modèle.

Tableau X. Coefficient d'ajustement du paludisme

Observations	12.000
Somme des poids	12.000
DDL	6.000
R ²	0.827
R ² ajusté	0.683

$$\text{Paludisme} = 2,7 - 2,9 \times \text{Ampl_T} - 0,0001 \times \text{Préc} + 0,67 \times \text{Hr} + 0,04 \times \text{Evap} + 0,74 \times \text{Tminabs}$$

Où :

- **Ampl_T** : Amplitude thermique mensuelle ;
- **Préc** : totaux pluviométriques mensuels ;
- **Hr** : Humidité moyenne mensuelle ;
- **Evap** : Évaporation totale mensuelle ;
- **Tminabs** : Température minimale absolue mensuelle.

Les totaux pluviométriques mensuels y contribuent le moins. Cette situation apparaît

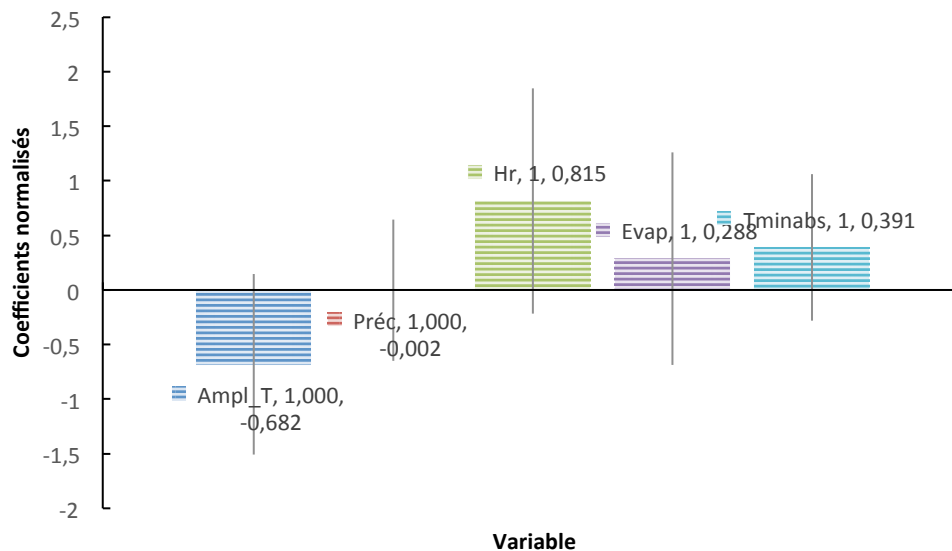


Figure 17. Paludisme / Coefficients normalisés (Intervalle de confiance = 95%).

La **Figure 18** visualise l'évolution des résidus normalisés. Il ressort de cette figure qu'aucun mois ne s'écarte de l'intervalle de confiance de -1,96 à 1,96 ; ce qui prouve la normalité des résidus, et donc, la fiabilité du modèle prédictif de la prévalence palustre à Kinshasa.

clairement dans la **Figure 17** qui donne les coefficients normalisés — également appelés coefficients beta. Il ressort dans cette figure le poids relatif des variables. En fait, plus la valeur absolue du coefficient est élevée, plus le poids de la variable correspondante est important. Lorsque l'intervalle de confiance autour des coefficients normalisés comprend la valeur 0 (cela est facilement visible sur le graphique des coefficients normalisés), le poids d'une telle variable dans le modèle n'est donc pas significative.

Tableau XI. Analyse de la variance par le test de Fisher

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	5	76.946	15.389	5.733	0.028
Erreur	6	16.105	2.684		
Total corrigé	11	93.051			

Analyse du modèle par les résidus

Saporta [1994], montre que le modèle a de forte chance d'être validé si les résidus suivent la loi normale. Ainsi, au seuil de 0,95, des individus ayant des valeurs de résidus centrés réduits situées en dehors de l'intervalle 1,96 et -1,96 doivent représenter au plus 5% de l'ensemble de l'échantillon. Ces individus méritent une attention particulière et peuvent permettre de mieux comprendre certains phénomènes.

Confrontation du modèle temporel de la prévalence palustre à la vérité du terrain

Pour confronter ce modèle théorique à la vérité du terrain, nous avons corrélé toutes les données empiriques aux données de prédiction du modèle. Le résultat obtenu est visualisé sur la **Figure 19**, laquelle

montre qu'il n'existe pas de différence significative entre les données observées et celles prédites, car le

coefficient de détermination rend compte de près de 83% de la variabilité totale.

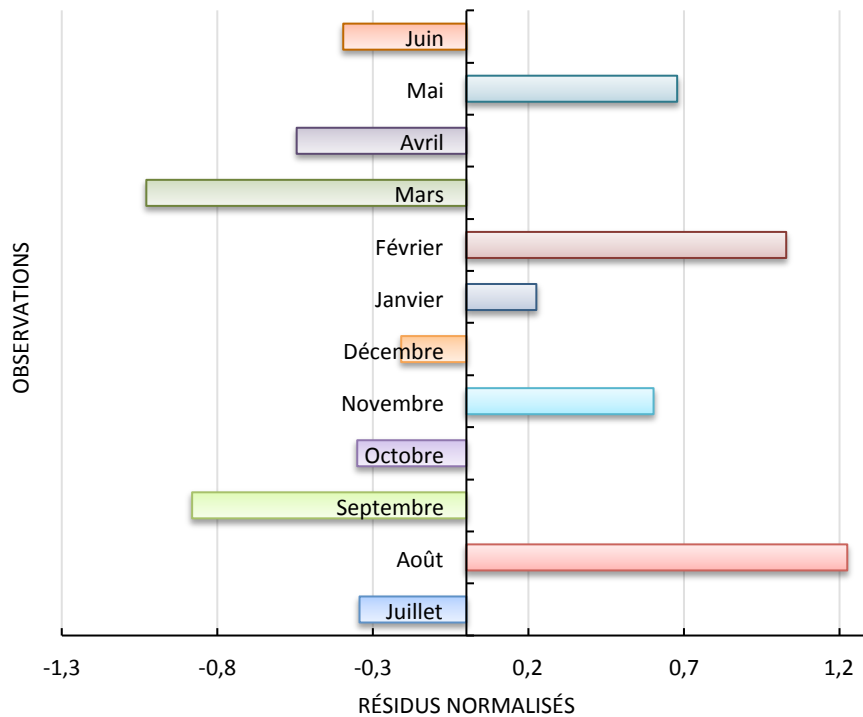


Figure 18. Résidus normalisés / Paludisme.

Dans la présente étude, il a été question de rechercher les liens qui existeraient entre d'une part les

paramètres climatologiques, et d'autre part la distribution temporelle du paludisme à Kinshasa.

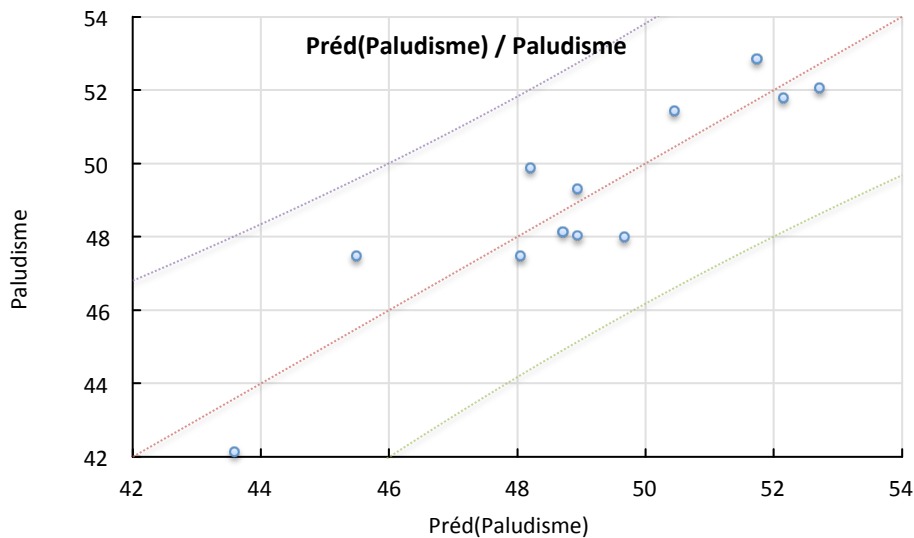


Figure 19. Corrélation entre prévalences palustres prédites et prévalences observées.

Il a été trouvé un lien peu significatif entre la pluviométrie et la distribution mensuelle de la prévalence palustre. Par contre, en isolant les mois de la saison des pluies, on a noté une augmentation très significative du coefficient de corrélation. La disponibilité des gîtes larvaires dans la ville, même pendant la pleine saison sèche, maintient l'endémicité du paludisme. Néanmoins, une légère inflexion de la courbe de la prévalence palustre a été observée à la fin

de la saison sèche (septembre-octobre), période caractérisée par l'appauvrissement de l'humidité atmosphérique associé à une importante diminution des gîtes larvaires.

La température moyenne de l'air a montré peu de corrélation avec le paludisme, sans doute suite à sa constance significativement élevée par rapport au minimum thermique létale du moustique au cours de

l'année. Par contre, les valeurs extrêmes de la température et les amplitudes thermiques élevées, ont joué défavorablement sur l'abondance des IP, car l'anophèle ainsi que son hôte - qu'elle abrite - ne supportent pas de grandes fluctuations d'amplitude thermique.

L'humidité relative est un des paramètres climatologiques qui a un grand impact significatif sur le paludisme. Cette situation est aisément compréhensible du fait que des valeurs trop basses d'humidité relative sont préjudiciables pour l'anophèle [COENE, 1993, MOUCHET, 2004 ; PATZ, 2006].

L'évaporation est aussi corrélée significativement mais négativement avec le paludisme. En effet, on a observé une baisse de la prévalence dans les mois à fort taux d'évaporation. Les grandes évaporations sous-entendent un fort assèchement de l'air, et donc une baisse d'humidité relative [MOUCHET, 2004].

Le rapport de mélange et l'ensoleillement sont faiblement corrélés avec le paludisme. L'insolation par exemple varie très peu au cours de l'année à cause de la proximité de Kinshasa avec l'équateur.

La pression atmosphérique au sol est corrélée négativement avec le paludisme. Ainsi, son élévation en saison sèche semble s'accompagner des basses valeurs de la morbidité pendant cette période. En revanche, sa baisse en pleine saison des pluies s'accompagne d'une augmentation des anophèles.

L'analyse en composantes principales a révélé 2 tendances : la première concerne les paramètres qui influent positivement sur le paludisme. Il s'agit des précipitations, humidité relative de l'air, et température ; la seconde englobe les paramètres qui y influent négativement, à savoir l'évaporation, la pression atmosphérique et les grandes amplitudes thermiques. La première tendance est caractéristique de la saison sèche, tandis que la seconde l'est pour la saison des pluies.

L'analyse de la variance a permis l'élaboration d'un modèle mathématique traduisant significativement le lien entre les paramètres climatologiques et la prévalence palustre à l'échelle mensuelle.

La faiblesse de la contribution des totaux pluviométriques mensuels (Figure 17) au modèle s'explique sans doute par la disponibilité quasi permanente des gîtes larvaires dues à d'autres paramètres environnementaux, socio-économiques et hydromorphométriques notamment les rivières et les zones marécageuses.

RESUME

L'analyse des données météorologiques et du paludisme recueillies entre 2004 et 2013 a montré l'existence à Kinshasa des liens entre elles. Il y a

particulièrement des corrélations linéaires significatives entre le paludisme et l'amplitude thermique ($r = -0,82$), l'humidité relative ($r = 0,81$) et l'évaporation ($r = -0,7$).


L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a discriminé deux grandes tendances : la première comprend les paramètres climatologiques qui influent positivement sur le paludisme - pluies, humidité relative de l'air, et température- ; et la seconde englobe ceux qui inhibent cette pathologie -évaporation, pression atmosphérique et grandes amplitudes thermiques-.

L'Analyse de la Variance (ANOVA) a conduit, à l'échelle mensuelle, à un modèle mathématique traduisant significativement le lien entre les paramètres climatologiques et la prévalence.

Mots clés : paludisme, climat, morbidité, mortalité, Kinshasa

REFERENCES ET NOTES

- BACCINI A. [2010] Statistique Descriptive Élémentaire. Publication de l'Institut de Mathématiques de Toulouse. UMR CNRS 5219. www.math.univ-toulouse.fr (consultée le 10 octobre 2014)
- CHADULE [1997] Initiation aux pratiques statistiques en géographie. Ed. ARMAND COLIN, Paris, 203p.
- COEN E. [1993] Malaria in urban and rural Kinshasa: the entomological input. 7(2) : 127-37.
- GIEC, [2007] Bilan 2007 des changements climatiques. Rapport de synthèse.
- KARCH et SALAUN [1992] La faune anophélienne et la transmission du paludisme humain à Kinshasa (Zaire). *Bull Soc Path Ex*, 85 : 304-9.
- MOUCHET J. et CARNEVALE P. [2004] "Biogéographie du paludisme dans le monde." John Libbey - Paris 428p.
- NZUZI L. [2008] Kinshasa, Ville et Environnement. Ed. L'HARMATTAN, 283p.
- PNLP [2003] Plan stratégique du Programme National de Lutte contre le Paludisme - RDC (2007-2011).
- PNLP [2013]: Rapport annuel sur le paludisme en RDC, 2013.
- PATZ, J.A. et S.H. OLSON [2006], « Malaria risk and temperature : Influences from global climate change and local land use practices », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 103(15), 5635-5636.
- ROLL BACK MALARIA (RBM) [2010] Rapport 2011 sur la malaria dans le monde. Dans <http://www.rollbackmalaria.org/> (consulté le 10/10/2014)
- SAPORTA [1994] Probabilités, analyse des données et statistique. Ed. TECHNIP- Paris. 488p.

 This work is in open access, licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in the credit line; if the material is not included under the Creative Commons license, users will need to obtain permission from the license holder to reproduce the material. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>