PREVISION DE LA MENINGITE BASEE SUR LES DONNEES METEOROLOGIQUES DANS TROIS DISTRICTS SANITAIRES DU MALI

MENINGITIS FORECASTING BASED ON METEOROLOGICAL DATA IN THREE HEALTH DISTRICTS IN MALI

Mohamed **KOUMARE**[1,*], Pascal **YAKA**[2], Hamidou **DIAWARA**[3]

[1] Stagiaire à l'Agence Nationale de la Météorologie du Mali (MALI-METEO), Bamako, Mali, moh94koumare@gmail.com, +223 76 63 25 17

[2] Enseignant chercheur, Coordonnateur Régional du Cadre Mondial pour les Services Climatologiques, pascalyaka@gmail.com, + 226 75 40 00 11

[3] Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Bamako, Mali ; AGRHYMET CCR-AOS, Niamey, Niger, diawarahamidou@yahoo.fr, + 223 70 33 03 07

[*] Auteur correspondant : moh94koumare@gmail.com

RESUME

La Méningite à méningocoque, ou Méningite Cérébro-Spinale (MCS), constitue un problème majeur de santé publique en Afrique subsaharienne, notamment dans la « ceinture de la méningite » incluant le Mali. Cette maladie climato-sensible sévit toute l'année, avec son pic en saison sèche, entre février et avril, période caractérisée par une forte charge de poussières atmosphériques favorisant sa transmission.

Cette étude avait pour objectif d'améliorer la gestion de la MCS à travers une modélisation biométéorologique. Elle a été conduite dans trois Districts Sanitaires (DS) parmi les plus touchés au Mali (Kayes, Kati et Mopti). Des données mensuelles météorologiques (vitesse du vent, pluviométrie, durée d'insolation, humidités et températures) et épidémiologiques, couvrant la période 2004–2021, ont été utilisées. La méthodologie s'est basée sur l'identification des paramètres météorologiques les plus influents à partir de l'analyse de corrélation (r) avec le taux d'attaque, et la modélisation statistique de ce taux. Les résultats ont mis en évidence des déterminants spécifiques selon les zones. À Kayes, la durée d'insolation a été significativement corrélée (r = 0,600 ; p-valeur = 0,039). À Kati, la température maximale a montré une forte influence (r = 0,821 ; p-valeur = 0,037). À Mopti, la température maximale (r = 0,797 ; p-valeur = 0,006) et l'humidité maximale (r = -0,655 ; p-valeur = 0,051) ont constitué les principaux facteurs associés. Les modèles obtenus ont présenté une bonne robustesse statistique et des performances satisfaisantes, constituant ainsi un outil pertinent pour renforcer la surveillance et le contrôle de la MCS dans ces districts.

Mots clés : prévision, données météorologiques, méningite, district sanitaire, Mali.

ABSTRACT

Meningococcal meningitis, or CerebroSpinal Meningitis (CSM), is a major public health problem in sub-Saharan Africa, particularly in the "meningitis belt" that includes Mali. This climate-sensitive disease is prevalent year-round, peaking during the dry season between february and april, a period characterized by high atmospheric dust loads that promote its transmission. This study aimed to improve CSM management through biometeorological

modeling. It was conducted in three of the most affected Health Districts (HD) in Mali (Kayes, Kati, and Mopti). Monthly meteorological (wind speed, rainfall, sunshine duration, humidity, and temperature) and epidemiological data, covering the period 2004–2021, were used. The methodology was based on identifying the most influential meteorological parameters through correlation analysis (r) with the attack rate, and statistically modeling this rate. The results highlighted specific determinants depending on the area. In Kayes, sunshine duration was significantly correlated (r = 0.600; p-value = 0.039). In Kati, maximum temperature showed a strong influence (r = 0.821; p-value = 0.037). In Mopti, maximum temperature (r = 0.797; p-value = 0.006) and maximum humidity (r = -0.655; p-value = 0.051) were the main associated factors. The resulting models demonstrated good statistical robustness and satisfactory performance, thus constituting a relevant tool for strengthening MCS surveillance and control in these districts.
Keywords : forecasting, meteorological data, meningitis, health district, Mali.

INTRODUCTION

Le lien entre les conditions météorologiques et la santé n'est plus à démontrer ; il a été constaté depuis l'antiquité et relaté dans des récits historiques. En effet, le médecin grec Hippocrate (400 ans avant J C) relate que les épidémies sont liées à la variabilité saisonnière du climat, et que celui qui veut s'appliquer convenablement à la médecine doit considérer les effets saisonniers, les modèles météorologiques, la qualité de l'eau et l'influence du soleil sur le sol (DAREMBERG C., 1843, citant Hippocrate). Les maladies liées au climat demeurent un problème important de santé publique à l'échelle mondiale car elles ont un taux de mortalité élevé et provoquent des complications graves à long terme. Ils se présentent sous la forme de petits cas répartis à travers le monde selon les saisons et représentent une proportion variable en termes d'épidémies (MARTINY N. et al., 2012).

Les épidémies de méningites touchent environ 250 000 personnes par an dans la zone latitudinale 10-15°N, dite « ceinture de la méningite » décrite par Lapeyssonie en 1963 ; ce qui en fait un problème de santé publique non négligeable (SULTAN B., 2005). Dans cette région, le Neisseria meningitidis (Nm) est le seul agent épidémiologique et responsable des flambées épidémiques de la Méningite Cérébro-Spinale (MCS). Quatre (4) sérogroupes du Nm (A, B, C, W135 et X) y sont présents, et le risque d'épidémie est élevé pendant la saison sèche (LAPEYSSONIE L., 1963).

Les principaux facteurs de risque identifiés pour la survenue de la MCS dans la littérature sont d'ordre alimentaire, humain et environnemental ; mais le facteur environnemental et climatique est prédominant dans la ceinture de la méningite (SULTAN B. et al., 2004 ; BOUMA F. B. et al., 2012). Les fluctuations saisonnières de l'occurrence de la MCS sont souvent liées à la fluctuation de certains paramètres climatiques. En effet, des études multiples ont suggéré qu'une augmentation de l'humidité atmosphérique réduit le risque de transmission (LAPEYSSONIE L., 1963 ; REMY G., 1988).

Le Mali, situé au cœur de la ceinture de méningite, est l'un des pays les plus touchés par ce fléau (SULTAN B., 2005). Le Mali a connu en 1969 une sévère épidémie de méningite avec une morbidité de 218 cas pour 100 000 hbts selon KANE A. M. (2003). La MCS ou « *Kandja bana* » en langue Bamana, sévissait de façon endémo-épidémique de 1994 à 1997, et le nombre de cas a été multiplié par trois en passant de 4000 à 12000 environ. Cependant, d'après les données statistiques de la Division de l'Epidémiologie (DE) du Ministère de la Santé et du Développement Social (MSDS), le taux de létalité a été réduit durant la même période, passant de 16,2 à 10,0% (TOWA DJEUNGOUE S.J., 2008). Cependant, très peu d'études localisées ont été effectuées au Mali sur la relation météo/climat et méningite (DROGUEY M., 2015 ; DEMBELE K. et al., 2017). La présente étude s'inscrit dans cette perspective avec comme objectif, d'améliorer la gestion de cette maladie à travers une modélisation biométéorologique à partir des données des paramètres météorologiques et épidémiologiques sur la méningite dans les DS de Kayes, Kati et Mopti, ce qui, pourra contribuer à l'amélioration de la santé humaine dans ces DS en particulier, et au Mali de façon générale.

2. METHODOLOGIE

2.1. Présentation et justification du choix de la zone d'étude

L'étude a été menée dans les DS de Kayes, Kati et Mopti au Mali. Le choix de ces DS s'est opéré suivant trois critères, à savoir : i. la récurrence de l'épidémie, ii. la diversité des conditions météorologiques et climatiques et, iii. la disponibilité des données climatiques et épidémiologiques de surveillance des épidémies de méningite. En effet, ils se situent tous dans les limites de la ceinture de la méningite comprise entre les latitudes 10° N et 15° N, et dans différentes zones agroclimatiques (pré-guinéenne, soudanienne et sahélienne) du Mali (Figure 1), et dans chacun de ces DS se trouve une station météorologique synoptique. Les données utilisées pour cette carte ont été obtenues auprès de MALI-METEO et de la Direction Générale de la Santé et de l'Hygiène Publique (DGSHP).

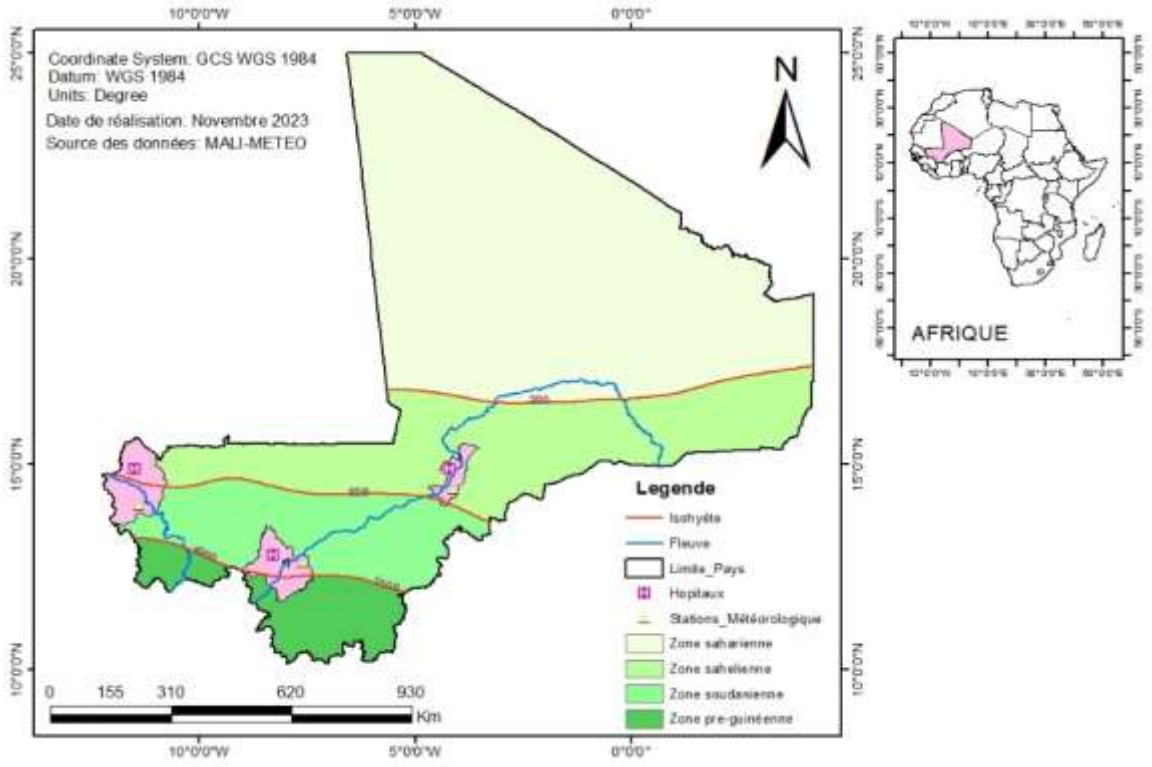


Figure 1: Présentation des DS d'étude dans la moitié sud du Mali.
(**Sources** des données : MALI-METEO et DGSHP)

Les principales caractéristiques pluviométriques et de la végétation de ces zones agroclimatiques sont :

- la zone pré-guinéenne se caractérise par des cumuls de pluies annuelles pouvant dépasser 1000 mm dont la saison des pluies dure environ 6 mois et par conséquent, les types de végétation caractéristiques sont les savanes boisées et les forêts ;
- la zone soudanienne, avec des précipitations annuelles variant entre 600 et 1000 mm enregistrées pendant 5 mois, se caractérise par un couvert végétal plus ou moins dense et varié (savane soudanienne) ;
- la zone sahélienne enregistre une pluviométrie de 200 à 600 mm en 3-4 mois, et se caractérise principalement par des arbres et arbustes épineux.

2.2. Matériel et méthodes

2.2.1 Données et outils

Les données utilisées dans cette étude sont des données des principaux paramètres météorologies (vitesse du vent, pluviométrie, durée d'insolation, humidités maximale et minimale, températures maximale et minimale), des données épidémiologiques, des données de population et données géographiques, et leurs principales caractéristiques sont fournies dans le Tableau I. Données météorologiques et épidémiologiques ne

présentent pas des données manquantes dans les trois DS sur les périodes retenues pour l'étude.

Tableau I : Caractéristiques des données de populations, météorologiques, épidémiologiques et géographiques.

Nature des données	Types des données (unités)	Résolutions temporelles	Périodes	Sources
Météorologique	- Tmin (°C) - Tmax (°C) - RR (mm) - Vv (m/s) - Hmax (%) - Hmin (%) - Inso (h)	Mensuelle	2004-2021	MALI-METEO
Epidémiologique	- Nombre de cas de méningite à méningocoque	Mensuelle	2004-2021	DGSHP
Données géographiques	- -Fichiers de formes de types *.shp*	-	-	MALI-METEO
	- Coordonnées géographiques des stations météo	-	-	MALI-METEO
	- Coordonnées géographiques des hôpitaux dans les DS	-	-	DGSHP
Données populations	- Nombre d'habitant par DS	Annuelle	2004-2021	DGSHP

Légende des paramètres : Vv = vitesse du vent, - RR = pluviométrie, Inso = durée d'insolation, Hmax et Hmin = humidités maximale et minimale, Tmax et Tmin = températures maximale et minimale.

Pour les traitements et analyses des données, deux (2) outils essentiels ont été utilisés, à savoir les logiciels : XLSTAT intégré dans le logiciel Excel pour les analyses statistiques et la modélisation ; ArcGIS pour la réalisation des cartes.

2.2.2. Méthodes

Pour l'atteinte de l'objectif de l'étude, la méthodologie qui a été adoptée se déroule en quelques étapes dont l'analyse des périodes à fort risque d'épidémie, l'identification des paramètres météorologiques les plus pertinents dans la survenue de la MCS et, la modélisation statistique du taux d'attaque de la MCS.

2.2.3. Analyse des périodes à fort risque d'épidémie de MCS

Les représentations graphiques chronologiques du Taux d'Attaque (TA) de la MCS sur la période d'étude (2004-2021) ont été réalisées et analysées pour chaque DS. Les périodes à risque d'épidémie de MCS sont celles dont les taux sont supérieurs au seuil

du taux moyen sur la période d'étude. L'estimation du taux d'attaque mensuel a été calculée d'après la formule suivante :

$$T_A = \frac{Nb_MCS}{P_{DS}} * 100\,000 \quad (1)$$

d'où Nb_MCS - nombre de cas moyen mensuel de la MCS ; P_{DS} – population moyenne du DS sur la période d'étude T_A - taux d'Attaque mensuel (Nb_MCS par 100 000 hbts).

2.2.4. Identification des paramètres météorologiques les plus pertinents dans la survenue de la MCS

Cette phase a été réalisée à travers une analyse des corrélations entre différents paramètres météorologiques et le taux d'attaque de la MCS. L'indice utilisé dans ce but est le coefficient de corrélation de Pearson (r) sur les valeurs moyennes mensuelles des différents paramètres (formule 2). La significativité de r entre les paramètres météorologiques et le taux d'attaque de la MCS a été évaluée à travers la p-valeur par rapport au seuil de 5%.

$$r = \frac{cov(x,y)}{\delta x * \delta y}, \quad (2)$$

d'où r - coefficient de corrélation entre les variables x et y (paramètres météorologiques et épidémiologiques respectivement) ; δx - écart type de la variable x ; δy - écart type de la variable y ; cov (x, y) - covariance entre x et y (SAWA T., 1978).

Dans le soucis de faire des représentations graphiques multivariées pour une comparaison de la dynamique des différents paramètres météorologiques retenus et du taux d'attaque de la MCS, toutes les valeurs moyennes mensuelles ont été normalisés en les centrant et réduisant par la formule 3.

$$I = \frac{A_i - \bar{A}}{\delta} \quad (3)$$

d'où I - valeur centrée réduite ; A_i - valeur du paramètre au mois i ; $\bar{A}$ - valeur moyenne du paramètre ; δ - écart-type du paramètre.

2.2.5. Modélisation statistique du taux d'attaque de la MCS

Afin de diminuer l'effet de grandeur dans les valeurs moyennes mensuelles des différents paramètres météorologiques retenus à l'étape précédente et des données épidémiologiques, cette fois-ci la méthode BOULANGER P.M. (2004) a été privilégiée (formule 4) car elle ne génère pas de données négatives comme la méthode de la variable centrée réduite.

$$m = \frac{(Xi - Xmin)}{(Xmax - Xmin)} \quad (4)$$

d'où m - valeur empirique normalisée ; xi - valeur mensuelle du paramètre au pas i ; xmin et xmax - valeurs minimale et maximale de la série de données du paramètre.

Ensuite, ces nouvelles variables ont été utilisées dans la modélisation par la méthode de régression linéaire multivariée entre le taux d'attaque de la méningite à méningocoque comme inconnue (variable à prédire, dépendante) et les paramètres météorologiques comme variables connues (variables d'entrée, indépendantes). La structure du modèle théorique de la régression linéaire multiple se présente sur la formule 5.

$$y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + \ldots + zx_p + cte \quad (5)$$

d'où y - taux d'attaque de la MCS ; $x_1 \ldots x_P$ -paramètres météorologiques retenus ; a…z - coefficients numériques de l'équation ; cte - constante. L'étape de la modélisation a respecté toutes les toutes les phases requises : de la calibration à l'évaluation de la performance des modèles en passant par la validation. Les modèles ont été calibrés sur le jeu de données d'apprentissage couvrant la période 2004-2018, par la méthode par « backward elimination » ou élimination progressive des paramètres (JOLION J.M., 2003). Quant à leur validation, elle a été effectuée grâce aux tests statistiques d'homoscédasticité, de Durbin-Watson (DW), de Facteur d'inflation de la variance (VIF) et de Shapiro-Wilk (SW), et (GOLDFELD S.M. et QUANDT R.E., 1965 ; DURBIN J. et WATSON G.S., 1971 ; AKAIKE H., 1974 ; SHAPIRO S.S. et WILK M.B., 1965) au seuil α = 0,05. Les détails de ces tests sont donnés dans le Tableau II.

Tableau II : Tests de validation des modèles biométéorologiques de la MCS

Type de test	**Description**	**Interprétation**
VIF	Détermination de l'existence de colinéarité entre les variables.	Si VIF < 5 : Pas de colinéarité Si VIF > 5 : Existence de colinéarité
Homoscédasticité	Détermine l'homoscédasticité de la variance des résidus	Si p-value < α: Hétéroscédasticité des résidus Si p-value > α : Homoscédasticité des résidus
DW	Détermination d'une autocorrélation des résidus dans un modèle de régression linéaire	Si DW est proche de deux (comprise entre 1,5 et 2,5) : Absence d'autocorrélation des résidus
SW	Evaluation de la normalité de la distribution des résidus	Si p-value < α: les résidus ne suivent pas une loi normale Si p-value > α: les résidus suivent une loi normale

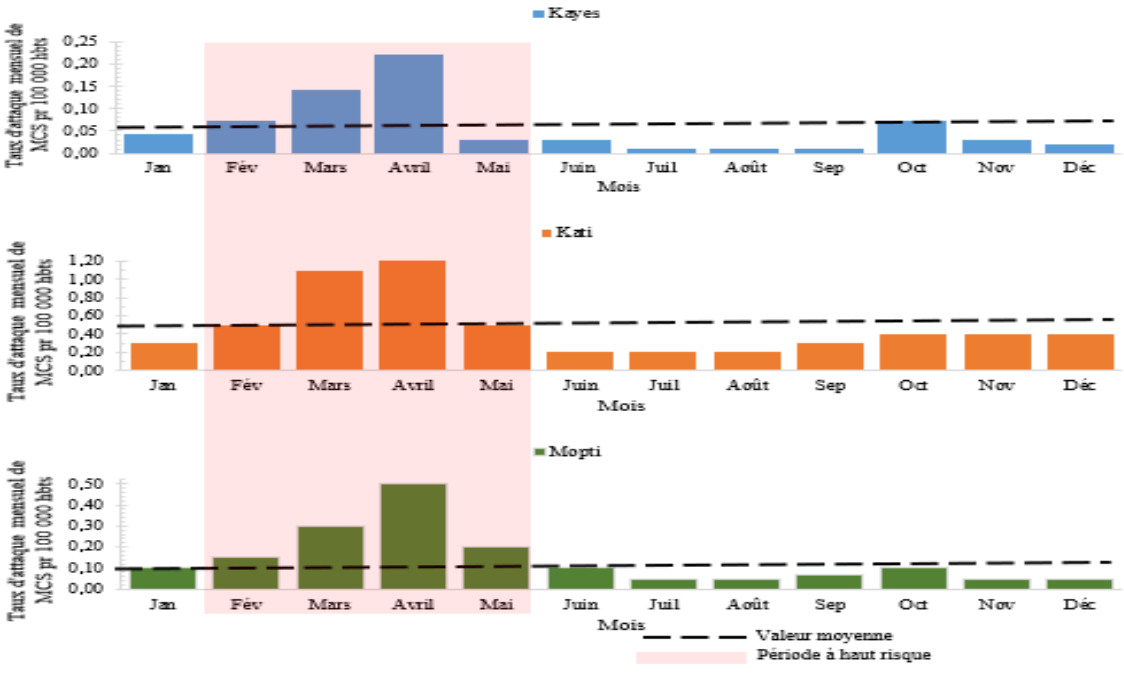
Enfin l'évaluation de la performance des modèles a consisté à vérifier leur capacité à ne pas être influencer par une perturbation des données d'entrée, autrement dit, il s'agit de chercher à savoir si les valeurs prédites par le modèle s'approchent bien des valeurs observées. Les données de la période 2019-2021 ont été utilisées pour cela. Les indices suivants ont été calculés et analysés pour cette évaluation : Coefficient de corrélation linéaire de Pearson (r), Root Mean Square Error (RMSE), Bias, Nash-Sutcliffe (NSE).

3. RESULTATS

Les principaux résultats obtenus portent sur trois aspects qui sont i. les périodes à risque élevé de MCS, ii. les paramètres météorologiques les plus pertinents dans la survenue de la MCS et enfin, iii. le modèle de prévision du taux d'attaque.

3.1. Risques de fort taux d'attaque pour la MCS

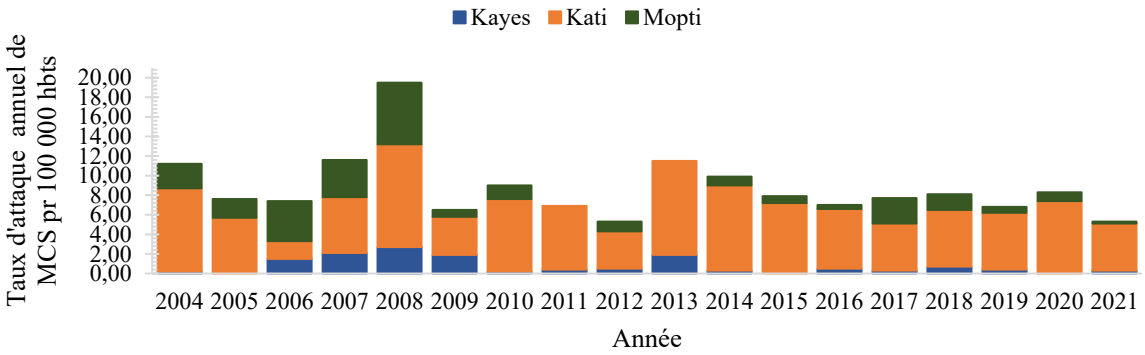
L'évolution moyenne mensuelle sur la Figure 2 montre des taux d'incidence élevés de la MCS, en général dans les mois de février à avril où les conditions atmosphériques sont sèches et chaudes, caractérisées par l'harmatan. Dans cette période, environ 70% des cas de méningite MCS de l'année sont enregistrés dans les DS étudiés avec un pic maximum au mois d'avril. Le DS de Kayes est celui qui a le plus faible taux moyen d'incidence avec 0,06 cas pour 100 000 hbts. Par contre, le mois d'août est celui où le taux d'incidence est le plus faible. Cela s'explique par le fait que ce mois correspond au pic de la pluviométrie et il y fait moins chaud dans les zones agroclimatiques du Mali (Direction Nationale de la Météorologie, 2007). En outre, on observe souvent une légère hausse du taux d'attaque de la MCS dans les mois d'octobre et novembre, qui



correspondent à la fin de la saison des pluies de mousson mais avec des températures relativement plus basses que la moyenne de la période du pic (de février à avril).

Figure 2: : Variation mensuelle du taux d'attaque de la MCS dans les DS de l'étude (source des données : DGSHP)

Par ailleurs, l'analyse des données permet de constater que les taux d'attaque annuel ont fortement varié d'une année à une autre et d'un district à un autre (Figure 3). Tous



les DS ont connu un pic en 2008, avec respectivement 2,70 cas, 10,50 cas et 6,30 cas pour 100 000 hbts pour Kayes, Kati et Mopti. Les DS de Kayes et de Mopti ont connu une période de forte incidence entre 2006 à 2009, alors que pour le DS de Kati, elle reste importante pendant toute la période d'étude, très souvent environ de 4 ou plus à plus de 10 cas pour 100 000 hbts. Cela démontre que le DS de Kati est celui où le risque d'attaque de la MCS est le plus élevé parmi les trois DS étudiés, représentant à lui seul, 72,4% des cas recensés sur la période d'étude, contre 18,8% pour le DS de Mopti et 8,8% pour celui de Kayes.

Figure 3: Évolution du taux d'attaque annuel de la MCS dans les DS étudiés de 2004 à 2021 (**source** : DGSHP)

3.2.Paramètres météorologiques les plus pertinents dans la survenue de la MCS

Selon des résultats de l'analyse des corrélations, illustrés dans le Tableau III, la durée d'insolation, l'humidité maximale et la température maximale sont les paramètres météorologiques les plus pertinents dans la survenue de la méningite de type MCS selon les DS. En effet, ces paramètres ont donné les coefficients de corrélation les plus élevées avec le taux d'attaque de la MCS, avec des p-valeurs (p-v) significatives au seuil de 5%. Plus spécifiquement, Inso (r = 0,600 ; p-v = 0,039) est le paramètre météorologique le plus pertinent dans la survenue de la MCS dans le DS de Kayes, Tmax (r = 0,821 ; p-v = 0,001) et Inso (r = 0,682 ; p-v = 0,014) dans le DS de Kati et enfin, Tmax (r = 0,797 ; p-v = 0,002) et Hmax (r = -0.655 ; p-v = 0,020) dans le DS de Mopti.

Tableau III : Corrélation entre les paramètres météorologiques et le taux d'attaque de la MCS

DS		RR	Hmax	Hmin	Tmax	Tmin	Vv	Inso
Kayes	r	-0,506	-0,482	-0,500	0,431	-0,021	-0,017	0,600
	p-v	0,547	0,684	0,820	0 ,987	0,629	0,907	**0,039***
Kati	r	-0,467	-0,480	-0,505	0,821	0,410	-0,061	0,682
	p-v	0,547	0,114	0,094	**0,001****	0,186	0,851	**0,014***
Mopti	r	-0,424	-0,655	-0,498	0,797	0,387	0,290	0,091
	p-v	0,169	**0,020***	0,099	**0,002****	0,214	0,361	0,778

*Codes de signification des p-values : 0,001 < ** < 0,01 < * < 0,05 <. < 0,1<°<1*

Légende : Vv = vitesse du vent, - RR = pluviométrie, Inso = durée d'insolation, Hmax et Hmin = humidités maximale et minimale, Tmax et Tmin = températures maximale et minimale

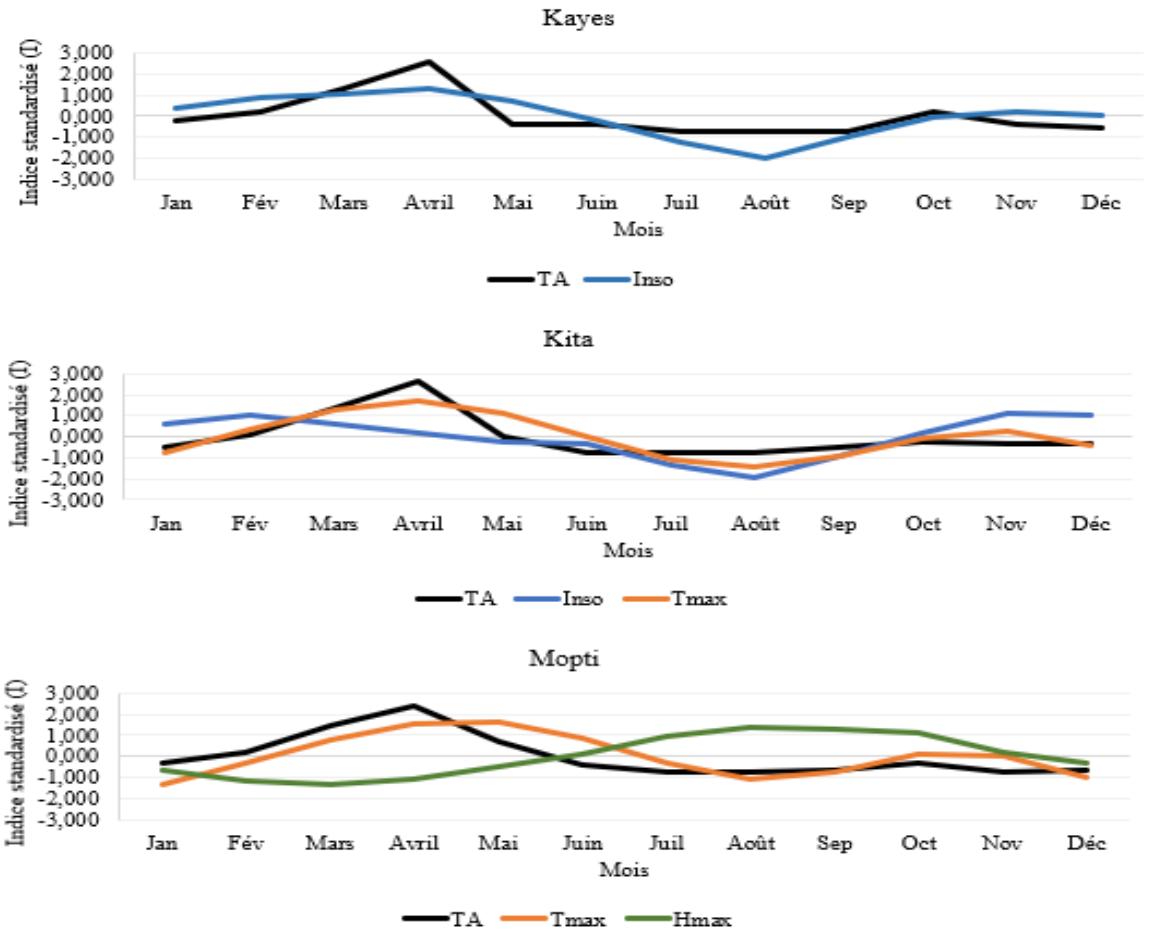


Figure 4 : Evolution du taux d'attaque de la MCS et des paramètres météorologiques (sources des données : MALI-METEO et DGSHP)

L'évolution des taux d'attaque de la MCS et des paramètres météorologiques retenus est illustrée sur la Figure 4, sous forme de courbe des valeurs moyennes mensuelles centrées réduites (I). Elle montre une évolution synchronique (corrélation positive)

entre les paramètres météorologiques et le taux d'attaque de la MCS dans les DS de Kayes et Kati. Par contre dans le DS de Mopti, il est observé deux situations opposées. D'une part, Tmax évolue de façon synchronique (corrélation positive) avec le taux d'attaque de la MCS et, d'autre part, Hmax évolue de façon opposée au taux d'attaque. Cela est tout à fait normal car les principaux facteurs de la MCS sont ceux favorisant le mouvement de l'harmatan en saison sèche et le DS de Mopti, à l'opposé des DS de Kayes et de Kati, se trouve dans le Delta Intérieur du Niger au Mali (WYMENGA et al., 2002), une zone très humide, ce qui favorise l'évaporation et l'augmentation de l'humidité dans l'atmosphère.

3.3. Modèles statistiques du taux d'attaque de la MCS en fonction des paramètres météorologiques

Les paramètres météorologiques (Inso, Tmax et Hmax) qui se sont avérés être les plus pertinents dans la survenue de la MCS ont été utilisés pour calibrer le modèle statistique du DS. Ensuite, ces modèles ont passé par l'étape de la validation et de l'évaluation de leur performance.

- **Statistiques du calibrage des modèles**

Le calibrage des modèles qui a été effectué par la méthode de « backward elimation » à partir des jeux de données d'apprentissage des valeurs mensuelles de 2004 à 2018, sont présentés dans le Tableau IV. Tous les modèles élaborés ont donné un coefficient de détermination réajusté satisfaisant de 0,296 à 0,714, au seuil de 5%, ce qui correspond à une corrélation (r) modérée (r = 0,544) pour Kayes et très forte (r = 0,801) pour Kati et (r = 0,845) pour Mopti.

Tableau IV : Paramètres statistiques des modèles après calibration

DS	Équations des modèles générés	R^2	R^2 ajusté	P-valeurs
Kayes	$M_{Taux} = 0,551*M_{Inso} - 0,053$	0,360	0,296	0,039*
Kati	$M_{Taux} = 0,751*M_{Tmax} - 0,120$	0,675	0,642	0,001**
Mopti	$M_{Taux} = 0,802*M_{Tmax} - 0,468*M_{Hmax} + 0,165$	0,766	0,714	0,001**

Légende : M_{Taux} : Taux normalisé ; M_{Inso} : Inso normalisée ; M_{Tmax} : Tmax normalisée ; M_{Hmax} : Hmax normalisée

- **Validation des modèles**

Selon l'analyse des résultats de ces tests de validation (Tableau V), les modèles pour les DS de Kayes, Kati et Mopti ont été validés. Par conséquent, la normalité des résidus a été conclue grâce au test SW avec des p-valeurs supérieures à 0.05. En plus, le test FIV montre qu'il n'y a pas de colinéarité entre les variables des modèles, les valeurs du FIV étant inférieures à 5. Le test DW confirme l'absence d'autocorrélation des résidus

car ces valeurs pour tous les modèles se situent dans l'intervalle avec satisfaction (entre 1,5 et 2,5). Enfin, le test GF a démontré une homoscédascité de la variance des résidus avec des p-valeurs supérieures à 0,05.

Tableau V : Résultats des tests de validation des modèles

DS	Équations des modèles générés	SW	FIV	DW	GF
Kayes	$M_{Taux} = 0,551*M_{Inso} - 0,053$	0,086	1,000	2,316	0,867
Kati	$M_{Taux} = 0,751*M_{Tmax} - 0,120$	0,510	1,000	2,089	0,997
Mopti	$M_{Taux} = 0,802*M_{Tmax} - 0,468*M_{Hmax} + 0,165$	0,276	1,198	2,115	0,971

- **Performance des modèles**

L'efficacité d'un modèle peut être évaluée en fonction de sa performance. Pour cela, certains indices ont été utilisés tels que le r, le biais, le RMSE et le NSE entre la moyenne des taux d'attaque de la MCS observés et prédits sur la période (2019-2021).

Les indices de la performance des modèles (Tableau VI) ont conclu que les résultats sont satisfaisants. Les coefficients de corrélation (r) ont varié entre 0,568 et 0,682. Quant aux biais, ils sont très faibles, avec des valeurs proches de zéro. En outre, les valeurs du RMSE des modèles sont faibles. Enfin, les valeurs du NSE sont comprises entre 0,20 et 0,50. Tout cela indique que les modèles ont une précision relativement élevée dans la prédiction des données des taux d'attaque de la MCS dans les DS de Kati et Mopti, et un peu moins dans le DS de Kayes.

Tableau VI : Résultats des indices de Robuste des modèles

Indices	DS Kayes	DS Kati	DS Mopti
r	0,568	0,684	0,682
Biais	0,098	-0,028	0,043
RMSE	0,277	0,301	0,348
NSE	0,202	0,452	0,426

En effet, le cumul mensuel des taux d'attaque observés et prédits pour 100 000 hbts sur la période 2019 à 2021 a été calculé pour évaluer le degré de prévisibilité des modèles (Tableaux VII). Le modèle a largement surestimé dans le DS de Kayes jusqu'à +54,5%, moins à Mopti avec un taux de variation de 14,3%. Pour ce qui concerne le DS de Kati, le modèle a sous-estimé le taux moyen d'attaque de -9,4%. Ces modèles pourraient donc être très utiles dans la prévision de la MCS dans les DS de Kati et Mopti s'il y a une disponibilité continue des données météorologiques. Par contre, pour le DS de Kayes, il faudra continuer à chercher d'autres paramètres pertinents complémentaires qui n'ont certainement pas été pris en compte dans cette étude.

Tableau VII : Comparaison entre les taux (observés et prédits par les modèles)

DS (%)	Équations des modèles générés	Taux observé	Taux prédit	Variation
Kayes	$M_{Taux} = 0,551*M_{Inso} - 0,053$	2,2	3,4	54,5
Kati	$M_{Taux} = 0,751*M_{Tmax} - 0,120$	3,2	2,9	-9,4
Mopti	$M_{Taux} = 0,802*M_{Tmax} - 0,468*M_{Hmax} + 0,165$	3,5	4,0	14,3

4. DISCUSSION

4.2. Périodes de risque élevé de la MCS et climat

Les taux d'attaque de la MCS élevés ont été observés pendant les mois de mars et avril, confirmant l'étude menée par (MOORE P. et al., 1992), qui affirme que les épidémies de la MCS surviennent pendant la saison sèche et chaude et s'achèvent dès le début de la saison des pluies en Afrique sub-saharienne. La forte présence de poussière dans l'atmosphère combinée à des températures élevées est à l'origine de ce taux d'attaque élevé pendant ces mois selon DEMBELE K. et al. (2017). En plus du mois d'avril, il y a eu un deuxième pic du taux d'attaque de la MCS entre octobre et novembre. Ce qui est conforme aux résultats de l'étude de YAKA P. et al. (2008) sur l'analyse composite des vents au Burkina Faso, qui a révélé un renforcement de l'harmattan en octobre en relation avec la croissance saisonnière des cas de la MCS. La présence de brume sèche, une forte insolation et un faible niveau d'humidité, de 25% à 45%, contribuent également à ce phénomène. Cela contribue à la diffusion et à la propagation du méningocoque dans la région pendant cette période de l'année (MARTINY N. et CHIAPELLO I., 2013). Les mois de février, mars et avril sont considérés comme la période la plus propice à la survenue de la MCS dans la zone d'étude, corroborant ainsi à l'étude de MARTINY N. et al. (2012) en Afrique sub-saharienne. La MCS est plus fréquente dans les années chaudes et sèches. Les années 2004 à 2009 ont été marquées par des incidences importantes de MCS, avec un pic maximum dans tous les DS étudiés en 2008 notamment 10 cas pour 100 000 hbts dans le DS de Kati, 6,3 cas pour 100 000 hbts dans le DS de Mopti et enfin, 2,7 cas pour 100 000 hbts dans le DS de Kayes. Contrairement aux dix dernières années, le taux d'attaque annuel a diminué lentement tout en gardant le caractère cyclique de la maladie. Ces résultats corroborent ceux de SACKO A. (2016) sur l'effet de la campagne de vaccination MenAfriVac sur l'épidémiologie des méningites cérébrospinales au Mali, qui indiquent que le nombre de cas suspects de la MCS a considérablement diminué depuis l'introduction du vaccin MenAfriVac au Mali en 2010.

4.3. Paramètres météorologiques pertinents dans la survenue de la MCS et modèle de prévision du taux moyen d'attaque

L'analyse des résultats montre une forte corrélation entre le taux d'attaque de la MCS et la Tmax, la Hmax et l'Inso dans les différents DS étudiés, excepté Kayes. Selon des études récentes (YAKA P. et al., 2008 ; AGIER L. et al., 2013 ; MARTINY N. et

CHIAPELLO I., 2013), la faible humidité atmosphérique, le renforcement des vents de surface, la persistance des saisons sèches, la rudesse de l'harmattan et l'impact des aérosols désertiques sont tous des facteurs climatiques responsables des épidémies de méningite dans la ceinture africaine. En effet, dans les différentes DS étudiées, encore à l'exception de Kayes, la Tmax est positivement corrélée au taux de MCS. Cela suppose que le taux d'attaque le plus élevé de la MCS semble correspondre au maximum de la température pendant la saison sèche. Les températures et jours de poussière maximale évoluent dans le même sens dans la ceinture africaine de méningite comme l'ont souligné plusieurs études notamment celles de REMY G. (1988), SULTAN B. et al., 2004, et MBAYE I. et al. (2004). L'étude de DROGUEY M. (2015) sur les analyses des épidémies de méningite à l'échelle de district sanitaire au Mali (1994-2014) montre que le début de l'épidémie peut être principalement influencé par la poussière et d'autres facteurs climatiques comme la température. La variabilité des paramètres météorologiques d'un district à un autre confirme les résultats d'une étude menée par YAKA P. et al. (2008) qui remarquèrent que pour l'ensemble des districts sanitaires du Burkina Faso, les coefficients de corrélation sont assez élevés et significatifs entre les variables épidémiologiques et climatiques. Ils notèrent aussi qu'à l'intérieur d'une même zone climatique, les variables les mieux corrélées avec la variabilité saisonnière de la MCS peuvent varier d'un district sanitaire à un autre. Ce qui pourrait mettre en évidence le rôle non négligeable des éléments macro et/ou microclimatiques sur la transmission locale de la MCS.

CONCLUSION

Cette étude est une avancée majeure dans la compréhension du rôle des paramètres météorologiques, notamment la température maximale, la durée de l'insolation et l'humidité maximale, dans le déclenchement des épidémies de méningite à méningocoque dans les districts sanitaires de Kayes, Kita et Mopti au Mali. En effet, en confirmant et renforçant les conclusions des études précédentes, cette investigation met en lumière l'influence déterminante du climat sur ces épidémies. L'analyse approfondie des résultats démontre de manière concluante une forte corrélation entre les conditions météorologiques et le taux d'attaque de la méningite à méningocoque dans la zone d'étude. Cependant, malgré des résultats satisfaisants, il faut noter que les températures relativement élevées ont conduit à un risque de transmission beaucoup plus élevé dans les DS de Kati et Mopti, contrairement au DS de Kayes, ce qui souligne la nécessité de considérer les variations météorologiques locales.

Par ailleurs, la calibration des modèles a révélé une relation linéaire significative entre les paramètres météorologiques normalisés et le taux d'attaque normalisé de la MCS dans les différents DS. Les modèles générés ont été testés et validés avec des tests statistiques robustes, montrant une corrélation satisfaisante entre les paramètres météorologiques choisis et les taux d'attaque de la méningite. Les prévisions mensuelles ont été testées pour leur caractère prédictif à l'aide de différents indices tels

que r, RMSE, Bais et NSE, renforçant la validité des modèles. Malgré ces résultats satisfaisants, des limitations ont été reconnues, notamment l'incapacité de définir un seuil du taux et des paramètres météorologiques déclencheurs de la MCS en raison de l'échelle temporelle (mensuelle) des données. L'étude suggère que l'utilisation de données météorologiques prévues pourrait servir à la prévision des taux d'attaque mensuels de la méningite à méningocoque, offrant ainsi des outils précieux pour les autorités de santé publique tout en tenant compte de l'incertitude dans la prévision des paramètres météorologiques et d'autres facteurs difficiles à mesurer, soulignent la nécessité d'une approche plus holistique, intégrant des facteurs environnementaux et sociodémographiques, pour une compréhension plus complète et précise de ces épidémies.

Ces modèles pourraient donc être très utiles dans la prévision de la MCS dans les DS de Kati et Mopti s'il y a une disponibilité continue des données météorologiques. Par contre, pour le DS de Kayes, il faudra continuer à chercher d'autres paramètres pertinents complémentaires qui n'ont certainement pas été pris en compte dans cette étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agier, Laurent ; Deroubaix, Aurélie ; Martiny, Nathalie ; Yaka, Pascal ; Djibo, Adamou ; Broutin, Hélène (2013).
Seasonality of meningitis in Africa and climate forcing. *Journal of the Royal Society Interface*, 10(79), 20120814.
Consulter l'article

Akaike, Hirotugu (1974).
A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723.

Boulanger, Pierre-Marie (2004).
Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique, un enjeu démocratique.
Les séminaires de l'IDDRI, 12, 24 p.

Bouma, François Bernard ; Ouattara, Florent ; Zongo, Souleymane ; Colombini, Alessandra (2012).
La méningite, une maladie des « variations » : pratiques préventives et gestion des épidémies de Kombissiri et Réo (Burkina Faso). *VertigO – Revue électronique en sciences de l'environnement*, 12(2).
Consulter l'article

Daremberg, Charles (1843).
Hippocrate : œuvres complètes. Paris : Lefèvre.

Dembélé, Kalifa ; Sanogo, Souleymane ; Sangaré, Mamadou ; Ba, Abdoulaye (2017).
Conception et évaluation d'un modèle climatique pour la prédiction et l'alerte

précoce des épidémies de méningite à méningocoque au Mali. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, 5(5), 347–355.

Direction Nationale de la Météorologie (2007).
Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques. Mali, 100 p.

Droguey, Mathieu (2015).
Analyse des épidémies de méningite à l'échelle du district sanitaire au Mali (1994–2014). Mémoire de Master, Université de Bourgogne, 59 p.

Durbin, James ; Watson, Geoffrey Stuart (1971).
Testing for serial correlation in least-squares regression III. *Biometrika*, 37(3–4), 409–428.

Goldfeld, Stephen Michael ; Quandt, Richard Edward (1965).
Some tests for homoscedasticity. *Journal of the American Statistical Association*, 60(310), 539–547.

Jolion, Jean-Michel (2003).
Probabilités et statistiques. Cours INSA Lyon.
Accéder au cours

Kane, Amadou Mamadou (2003).
Aspects épidémiologiques et bactériologiques des méningites purulentes au Mali (1979–1999). Thèse de Doctorat en Médecine, Faculté de Médecine, Bamako, 58 p.

Lapeyssonnie, Léon (1963).
La méningite cérébrospinale en Afrique. *Bulletin de l'Organisation mondiale de la Santé*, 28, 114 p.
Accéder au document

Martiny, Nathalie ; Chiapello, Isabelle (2013).
Évaluation de l'impact des poussières minérales sur l'incidence de la méningite en Afrique de l'Ouest. *Atmospheric Environment*, 70, 245–253.

Martiny, Nathalie ; Dessay, Nicolas ; Yaka, Pascal ; Touré, Ousmane ; Sultan, Benjamin ; Rebaudet, Stanislas ; Broutin, Hélène ; Piarroux, Renaud ; Chiapello, Isabelle ; Sagara, Ibrahim ; Fontaine, Bernard (2012).
Le climat, un facteur de risque pour la santé en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, 73–79.

Mbaye, Ibrahima ; Handschumacher, Pascal ; Chippaux, Jean-Philippe ; Diallo, Amadou ; Ndione, Jean André ; Paul, Pierre (2004).
Influence du climat sur les épidémies de méningite à Niakhar (Sénégal). *Environnement, Risques & Santé*, 3(4), 219–226.

Moore, Peter S. ; Plikaytis, Brian D. ; Bolan, Gail A. (1992).
Detection of meningitis epidemics in Africa: A population-based analysis. *International Journal of Epidemiology*, 21, 155–162.

Rémy, Georges (1988).
La méningite cérébro-spinale : dans le sillage de l'harmattan. In : *Paysages et*

milieux épidémiologiques dans l'espace ivoiro-burkinabé. Paris : CNRS Éditions, 149–253.

Sacko, Amadou (2016).
Impact de la campagne de vaccination MenAfriVac sur l'épidémiologie des méningites au Mali. Thèse de Doctorat en Médecine, Bamako, 85 p.

Sawa, Takamitsu (1978).
Information criteria for discriminating among alternative regression models. *Econometrica*, 46, 1273–1282.

Shapiro, Samuel Sanford ; Wilk, Martin Bradbury (1965).
An analysis of variance test for normality. *Biometrika*, 52(3–4), 591–611.

Sultan, Benjamin (2005).
Influence du climat sur l'apparition des épidémies de méningite en Afrique de l'Ouest. *Médecine/Sciences*, 21(5), 470–471.

Sultan, Benjamin ; Labadi, Kamel ; Beltrando, Gérard ; Janicot, Serge (2004).
La méningite à méningocoque au Mali et la circulation atmosphérique. *Environnement, Risques & Santé*, 3, 21–32.

Towa Djeungoue, Simon Jean (2008).
Épidémiologie de la méningite bactérienne au Mali en 2007. Thèse de Doctorat en Médecine, Bamako, 87 p.

Wymenga, Egbert B. ; Koné, Joseph ; Van der Kamp, Johan ; Zwarts, Leo (2002).
Delta intérieur du Niger : écologie et gestion durable des ressources naturelles. Wetlands International, 240 p.

Yaka, Pascal ; Sultan, Benjamin ; Broutin, Hélène ; Janicot, Serge ; Philippon, Sophie ; Fourquet, Nicolas (2008).
Relationships between climate and year-to-year variability in meningitis outbreaks. *International Journal of Health Geographics*, 7, 34.