

Variations climatiques et mortalité attribuée au paludisme dans la zone de Niakhar, Sénégal, de 1984 à 1996

Ousmane Ndiaye, Jean-Yves Le Hesran, Jean-François Etard,
Aldiouma Diallo, François Simondon, Michael Neil Ward,
Vincent Robert

Une certaine prise de conscience semble s'être opérée ces dernières années sur l'importance du climat. Chacun reconnaît être concerné par d'éventuelles modifications du climat à l'échelle de la planète, convaincu que ces modifications auront des conséquences sur son propre mode de vie. L'incertitude sur la réalité des changements climatiques, l'aspect spectaculaire et parfois dramatique de plusieurs de leurs manifestations ces toutes dernières années, ainsi que l'inquiétude sur l'ampleur future de leurs dérèglements ont considérablement stimulé la recherche dans ces domaines [1]. Le climat varie considérablement d'une année à l'autre, en particulier en association avec « *El Niño Southern Oscillation* » (ENSO), ou sur des périodes plus longues telles que les décades (variations décennales). Par exemple, la sécheresse au Sahel, considérée initialement comme un accident climatique exceptionnel dans les années 1969-1972, a constitué le début

d'une longue période de déficit pluviométrique en Afrique sub-saharienne (de -0 à -40 % selon les régions) qui a perduré au moins jusqu'en 1998 [2]. De plus, l'activité humaine modifie le climat de la planète, entraînant notamment un réchauffement global [3].

L'impact de ces variations climatiques sur différents aspects tels que l'environnement et l'ensemble des activités humaines est activement recherché. L'impact des modifications climatiques sur les grandes endémies tropicales constitue un domaine où les recherches se multiplient [4-9]. Certaines de ces références rapportent un lien entre un événement climatique exceptionnel observé une année particulière et une augmentation associée du poids du paludisme [5, 9].

Généralités

Climat et transmission du paludisme

Le climat influence considérablement la répartition géographique et l'épidémiologie du paludisme [10]. Il intervient sur sa transmission par trois mécanismes partiellement liés [11]. Le climat a une influence sur :

- la répartition et l'abondance des anophèles vecteurs ;
- la possibilité et le succès du développement sporogonique du parasite à l'intérieur du vecteur ;

- la modulation du contact homme-vecteur.

De nombreuses composantes du climat sont impliquées dans ces processus. En voici les principales.

- La température influence la durée du développement sporogonique du parasite, la durée du développement pré-imaginal du vecteur, et la survie de l'anophèle adulte.

Au-delà de 35 °C et en deçà de 18 °C le développement sporogonique de *P. falciparum* est stoppé ; aux températures de 20, 24 et 30 °C il est respectivement de 20, 11 et 9 jours. L'espèce *P. vivax* supporte des températures plus modérées, jusqu'à 15 °C et, aux températures de 20, 24 et 30 °C, le développement sporogonique est respectivement de 16, 9 et 7 jours.

Le développement pré-imaginal des anophèles est aquatique. Il dure une dizaine de jours pour *An. gambiae* et une vingtaine pour *An. funestus* à 25 °C. Cette phase s'allonge lorsque la température diminue (jusqu'à trois semaines pour *An. gambiae*) et raccourcit lorsqu'elle augmente (cinq jours à 30 °C pour *An. gambiae*).

- La pluviométrie influence la disponibilité et la qualité des gîtes larvaires.

Dans toutes les régions du monde où il existe une longue saison sèche, les anophèles sont très peu abondants durant toute cette saison. Dans ces régions, le rythme et l'importance des précipitations sont les facteurs essentiels qui déterminent les espèces anophéliennes existantes ainsi que leur abondance et la durée de leur présence saisonnière. En zone sahéenne,

O. Ndiaye : Direction de la météorologie nationale, BP 8257, Dakar, Sénégal.

J.-Y. Le Hesran, J.-F. Etard, A. Diallo, F. Simondon, V. Robert : Institut de recherche pour le développement, BP 1386, Dakar, Sénégal.

<lehesran@ird.sn>

M.N. Ward : International Research Institute for Climate Prediction, 101 Momell Building, LDEO, 61 Route 9W, Palisades, NY 10964-8000, USA.

Tirés à part : J.-Y. Le Hesran

Thèmes : Sénégal/Afrique ; Paludisme.

la sécheresse a réduit la durée de mise en eau des gîtes larvaires et l'intensité de la transmission du paludisme, si bien qu'une « retraite du paludisme » a été observée [12]. La prévalence parasitaire dans la population a fortement diminué. L'explication proposée est qu'un grand nombre de petites rivières et de marais autrefois semi-permanents sont désormais totalement à sec huit à dix mois par an depuis le début des années 70, ce qui a eu pour conséquence la disparition dans cette partie de l'Afrique d'*An. funestus*, un des trois principaux vecteurs du paludisme en zone afro-tropicale, car le développement larvaire de cette espèce nécessite des étendues d'eau pérennes ou semi-pérennes avec une végétation aquatique abondante. Des pluies exceptionnelles, suivies par des inondations, ont entraîné une recrudescence importante des cas de paludisme en Asie et au Kenya [13-15].

L'impact des gouttes de pluies sur les larves d'anophèles ne semble pas être un facteur influant sur la mortalité larvaire [16]. En revanche, il est bien établi qu'une forte pluie peut occasionner une mortalité considérable par lessivage des gîtes larvaires, les stades aquatiques étant emportés et détruits par le flot d'eau de ruissellement.

- L'humidité influe sur la survie des adultes.

En insectarium, on cherche à maintenir une humidité relative de 80 %, favorable à la survie des anophèles. Même de faibles écarts autour de cet ordre de grandeur (± 5 %) ont un fort impact négatif sur la survie.

- Les vents influencent les déplacements des adultes.

Ils peuvent jouer un rôle favorable ou défavorable à la dispersion des anophèles selon leur direction et leur vitesse. Par exemple *An. pharoensis*, vecteur potentiel de paludisme en Égypte, présente habituellement une dispersion à partir des gîtes larvaires, de l'ordre de 6 km. De façon occasionnelle, en utilisant des vents venant du nord-ouest, ses déplacements à partir du delta du Nil ont pu être observés sur plus de 100 km, une fois même sur 280 km. Au contraire, des vents violents s'opposent aux déplacements habituels des moustiques en quête d'un repas de sang.

Mortalité palustre

Seule l'espèce *P. falciparum*, parmi les quatre espèces parasitant l'homme, est capable d'entraîner un accès aigu mortel.

L'épidémiologie du paludisme est radicalement différente en fonction du niveau de transmission.

Dans les zones endémiques, une seule piqûre infectée n'entraîne le plus souvent pas d'accès palustre. Ceci est dû à l'acquisition progressive d'une prémunition, état immunitaire se manifestant par une protection relativement efficace sur le plan de la maladie mais pas assez efficace pour éliminer tous les parasites. Cette prémunition ne peut se construire et s'entretenir qu'à la faveur de réinfections multiples, presque permanentes, entre l'homme et son parasite. Dans les zones de forte transmission, elle s'établit dès le plus jeune âge, en quelques années, si bien qu'au-delà de 5 ans, on estime que le risque de décéder du paludisme devient très faible. On comprend pourquoi, dans ce contexte de transmission intense et permanente, l'essentiel de la morbidité et la quasi-totalité de la mortalité sont concentrés chez les jeunes enfants.

Dans les zones épidémiques, la situation est bien différente. Une seule piqûre infectée entraîne fréquemment un accès palustre. Le contact entre l'homme et son parasite est trop peu fréquent pour que se construise une prémunition. Toutes les classes d'âge sont concernées par la maladie palustre et le risque de décès.

Les principales sources d'information sur la mortalité due au paludisme dans différentes régions sont au nombre de deux. La mesure de l'efficacité des programmes de lutte antipaludique procurent des informations essentielles [17, 18]. D'autres données sont disponibles sur des populations de tailles variables, suivies régulièrement sur le plan de la démographie et dans lesquelles les causes de mortalité font l'objet d'une attention spéciale [19, 20]. Une approche plus globalisante, intégrant aussi les systèmes d'informations géographiques et les connaissances récentes des schémas épidémiologiques de la maladie, est également disponible [21]. Les estimations les plus récentes de l'OMS chiffrent de 1,5 à 2,7 millions le nombre de décès provoqués chaque année par cette maladie dans le monde [22]. Bien que la répartition géographique du paludisme couvre la majeure partie des zones inter-tropicales du globe et que près de la moitié de la population mondiale vive en zone d'endémie, c'est en Afrique tropicale que sont concentrés plus de 90 % de la mortalité et de la morbidité attribuables à

cette affection. Les chiffres suivants ont été proposés [23]. Chez les moins de 5 ans, 3 % de tous les cas cliniques de paludisme sont associés à des accès graves et 25 % des accès graves entraînent le décès. Chez les 5 ans et plus, cette létalité est de 0,1 % dans les zones hyper-holocendémiques et de 1 % dans les zones méso-hypoendémiques. En d'autres termes, le paludisme est responsable de 16 % de décès des moins de 5 ans et de 6 % de décès des plus de 5 ans. La diffusion de la résistance de *P. falciparum* à la chloroquine en Afrique dans les années 80 et 90 a été identifiée comme un facteur aggravant considérablement la mortalité palustre [24].

Variabilité climatique au Sahel

La variabilité du climat au Sahel et en particulier au Sénégal est fortement liée au rayonnement solaire. La répartition énergétique de ce rayonnement n'est pas uniforme autour du globe. La zone inter-tropicale est excédentaire en énergie thermique tandis que les régions polaires en sont déficitaires. Cette inégalité entretient la circulation générale atmosphérique et concourt à expliquer une certaine variabilité saisonnière des paramètres climatiques.

Une zone soumise en permanence au réchauffement solaire est le siège de mouvements atmosphériques ascendants (convection) qui transportent l'excédent énergétique vers les couches supérieures et vers les zones déficitaires des moyennes et hautes latitudes. Ce processus s'initie par une évaporation et une montée de la vapeur d'eau dans les hautes couches atmosphériques ; il se poursuit par un transport éolien de la vapeur d'eau et s'achève par une condensation avec libération de chaleur latente. La zone d'ascendance permanente est appelée la zone de convergence inter-tropicale (ZCIT). Une telle ascendance est favorable à la formation de nuage et occasionne d'importantes précipitations. La ZCIT se déplace avec le mouvement apparent du soleil avec un délai de quelques semaines dû à l'inertie du système terre-mer-océan. Dans l'hémisphère boréal, la ZCIT atteint sa position la plus septentrionale en août, au cœur de la saison des pluies dans une zone qui correspond en Afrique au Sahel.

Ce schéma simplifié explique la variabilité intra-annuelle du climat. Sa variabilité

inter-annuelle, plus complexe, est une combinaison de phénomènes spatiaux et temporels. En Afrique de l'Ouest, l'importance de la variabilité inter-annuelle ou inter-décadaire de la pluviométrie de mousson doit être soulignée. La quasi-totalité de la vapeur d'eau précipitable durant la saison pluvieuse est transportée par le flux de mousson qui provient de l'anticyclone de Sainte-Hélène. Sa variabilité est liée aux conditions de surface de la mer. La vapeur d'eau amenée par la mousson est précipitée à l'occasion de perturbations atmosphériques, véritables systèmes orageux appelés ligne de grains (ou alignement de nuages pluvio-orageux).

Plusieurs hypothèses sur la variabilité des précipitations au Sahel ont été émises. Eltahir *et al.* [25] ont trouvé une liaison entre le flux de la mousson et le gradient de température de la couche superficielle de l'océan Atlantique. Fontaine *et al.* [26] ont lié la variabilité des pluies en août à la direction et à la force des vents en altitude. Folland *et al.* [27, 28] et Rowell *et al.* [29] ont montré que la variabilité de la pluviométrie au Sahel est très liée à la distribution de la température de surface de l'océan à l'échelle quasi globale. Ward [30] a fait ressortir la liaison avec l'océan Pacifique (ENSO). Ces études procurent la base sur laquelle repose la prédiction du climat en Afrique de l'Ouest [30].

Compte tenu de cette importante variabilité climatique au Sahel et de ses conséquences potentielles dans l'épidémiologie du paludisme, il nous a paru intéressant de rechercher une éventuelle implication de certains paramètres climatiques sur la mortalité attribuée au paludisme dans la zone de Niakhar au Sénégal.

Matériel et méthode

Présentation de la zone de Niakhar

Niakhar (14°28' N-16°24' O) est une sous-préfecture de la région de Fatick, Sénégal, située à 115 km – à vol d'oiseau – à l'est de Dakar. La « zone de Niakhar » couvre 230 km², ne comprend pas le village de Niakhar et relève de la région administrative de Fatick. Les habitants appartiennent majoritairement à

l'ethnie Sérère. La densité de population est forte (en moyenne 126 habitants/km²); tout l'espace est anthropisé dans le but de favoriser les activités agricoles. Le paysage, dont l'absence de relief est un élément essentiel, est marqué par les « concessions » dispersées au milieu des champs, qui constituent l'unité traditionnelle d'habitation pour une famille. Les cultures principales sont le petit mil et l'arachide. La quasi-totalité de la zone n'est pas électrifiée; l'eau courante (provenant de forages profonds) est disponible dans un peu plus de la moitié de la zone, sinon l'eau provient de puits traditionnels. L'usage des moustiquaires de lit, pratiquement jamais imprégnées d'insecticide, est très limité.

Un suivi démographique continu est mené depuis 1962 dans une partie de la zone sur 8 villages, et depuis 1983 dans toute la zone sur 30 villages. Des études nutritionnelles, épidémiologiques et géographiques sont également menées, faisant de cette zone un observatoire régional de population et de santé [19]. À partir de 1987, la zone a servi de cadre à des essais vaccinaux contre la rougeole et la coqueluche. La zone concernait 23 141 et 29 104 personnes respectivement aux 1^{er} janvier 1984 et 1997 [19], soit un accroissement de 25,8 % en 13 ans. Toutes les personnes résidentes dans la zone sont enregistrées pour la naissance, la parenté, le lieu de résidence, la grossesse, les déplacements hors de la zone, et le décès. La cause du décès est systématiquement recherchée *a posteriori* auprès des familles, de l'entourage et dans les établissements de santé. Un interrogatoire standardisé mené dans la langue locale permet de recueillir les circonstances du décès, et éventuellement les symptômes survenus à ce moment [19]. Pour chaque décès un dossier d'autopsie verbale anonyme est établi. L'attribution de la cause probable de décès est décidée par un groupe de médecins au vu de ce dossier.

Le paludisme est endémique dans la zone de Niakhar. La prévalence a été évaluée par trois enquêtes parasitologiques en février, juin et novembre 1995, avec environ 500 enfants et 150 adultes sélectionnés par tirage au sort à partir du recensement de la population [31]. Chaque goutte épaisse a été examinée avec un seuil de lecture estimé à deux parasites par microlitre de sang. Chez les enfants de 0-9 ans, l'indice plasmodique moyen était de 47 % en février, 41 % en juin et 83 % en

novembre. Chez les 15 ans et plus, cet indice était de 30 % en février, 14 % en juin et 65 % en novembre. C'est essentiellement en novembre que des fortes densités parasitaires, associées à des accès palustres, ont été observées.

Une étude sur les anophèles et la transmission du paludisme a été réalisée dans trois villages de la zone de Niakhar en 1995 [32]. Les anophèles responsables de la transmission du paludisme appartiennent exclusivement au complexe *An. gambiae*. Il s'agit d'*An. arabiensis* et d'*An. gambiae*. La première espèce est de loin la plus importante puisqu'elle a représenté 97 % des femelles du complexe. Le taux annuel de piqûre d'*An. gambiae* s.l. a varié entre 512 et 1 558 piqûres par personne, selon les villages. Des vecteurs ont été observés toute l'année, à une densité très faible en saison sèche. Une importante augmentation de la population anophélienne, liée aux pluies, a atteint un maximum en septembre et début octobre. L'indice sporozoïtique moyen d'*An. gambiae* s.l. a été de 1,7 %. Dans les deux villages représentatifs de la zone de Niakhar, la transmission a été estimée à 9 et 12 piqûres d'anophèles infectés par personne par an, survenant presque exclusivement entre août et octobre. Dans le troisième village, non représentatif de la zone par ses gîtes larvaires permanents, la transmission a été estimée à 26 piqûres d'anophèles infectés par personne par an.

Données de mortalité palustre

Les données de mortalité proviennent de la base de données du suivi démographique et couvrent la période de 1984 à 1996. Seule la mortalité attribuée au paludisme a été retenue dans cette étude. Elle exclut les nourrissons de moins d'un mois.

Des visites hebdomadaires dans tous les foyers de la zone ont été organisées entre 1986 et 1997. Les résidents étaient interrogés sur les événements survenus dans la famille. En cas de déclaration de décès, un enquêteur formé à la technique de l'autopsie verbale passait dans le trimestre pour remplir un questionnaire standardisé sur les conditions de survenue du décès. Chaque autopsie verbale a été vue indépendamment par deux médecins. En cas de discordance dans les diagnostics posés, les dossiers étaient revus en commission par plusieurs médecins

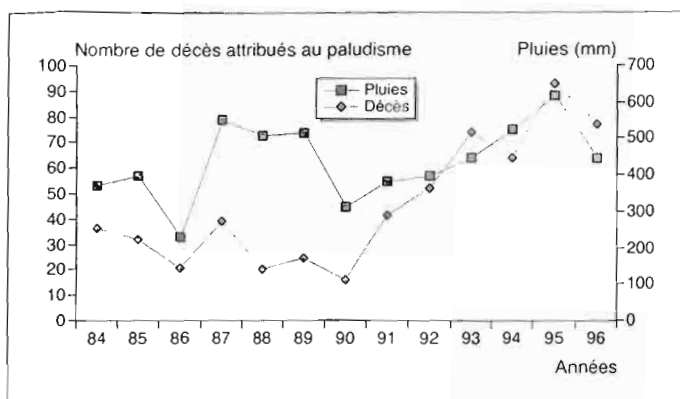


Figure 1. Evolution du nombre annuel de décès attribués au paludisme et de la pluviométrie totale, de 1984 à 1996, dans la zone de Niakhar, Sénégal.

Figure 1. Evolution of the annual number of deaths attributable to malaria and the annual rainfall total at Niakhar, Senegal over 1984 to 1996.

afin de dégager un accord sur le diagnostic le plus probable.

Données météorologiques

Les données météorologiques utilisées concernent trois paramètres : la pluviométrie, l'humidité relative et la température. Pendant la période d'étude, elles sont à l'échelle mensuelle. La pluviométrie est celle enregistrée à la station pluviométrique de terrain de l'IRD à Niakhar. Les données d'humidité relative et de température non enregistrées à Niakhar proviennent de la moyenne des trois stations météo les plus proches de Niakhar : Bambey, Diourbel et Fatick (respectivement à 17, 31 et 25 km à vol d'oiseau du centre de la zone de Niakhar). Parce que ces deux derniers paramètres présentent une faible variabilité spatiale, on estime que ces trois localités sont représentatives de la zone de Niakhar.

Variabilité et méthode d'analyse

Les quatre variables analysées sont le nombre de décès attribués au paludisme, la pluviométrie (hauteur de pluie cumulée par mois), la température (enregistrée sous abris, en degré Celsius), l'humidité relative (en pourcentage de masse de vapeur d'eau contenue dans l'air, sur la masse maximale de vapeur d'eau que peut contenir l'air à cette température). La température moyenne mensuelle est définie comme la moyenne des températures moyennes journalières, elles-mêmes obtenues par la moyenne des 24 valeurs horaires. La température moyenne mensuelle des minima et des maxima est

définie comme la moyenne des températures journalières, respectivement, les plus basses et les plus élevées.

Pour permettre la comparaison entre les variables de nature différente, on a procédé à la standardisation des variables : chaque variable a été centrée autour de la moyenne, puis réduite ($X - \bar{X} / \sigma$).

Nous avons estimé les coefficients de corrélation entre les valeurs standardisées de la pluviométrie, de la température et de l'humidité et celles des décès attribués au paludisme : la corrélation a été mesurée entre chacun des trois paramètres climatiques de juin à septembre et la mortalité attribuée au paludisme entre le 1^{er} septembre et le 31 octobre.

Nous avons considéré le sens de la covariation entre chaque paramètre météo et la mortalité. Nous avons testé la signification statistique du sens des covariations par le test des rangs *T* de Wilcoxon sur des séries appariées.

Les coefficients de corrélation croisée ont été mesurés entre chacun des trois paramètres climatiques et le nombre de décès attribués au paludisme mois par mois (un décalage de 0 correspondait à coupler une variable météo d'un mois donné avec le nombre de décès le même mois ;

un décalage de +1 correspond à coupler une variable météo d'un mois donné avec le nombre de décès survenus le mois suivant ; un décalage de +2 correspond à coupler une variable météo d'un mois donné avec le nombre de décès survenus deux mois plus tard, etc.). Ces données ont été analysées comme une série continue (13 années x 5 mois = 65 valeurs mensuelles de mortalité).

Résultats

Variabilité inter-annuelle

De 1982 à 1996, dans la zone de Niakhar, le nombre total de décès attribués au paludisme est de 661. D'une année sur l'autre, ce nombre de décès montre une variabilité importante (figure 1). L'augmentation de la mortalité est notable après 1991. Au cours de la même période, la pluviométrie présente des écarts importants. Au contraire, la variabilité inter-annuelle de la température et de l'humidité est faible (tableau 1).

La corrélation entre la mortalité annuelle attribuée au paludisme et la pluviométrie de la même année est proche de la signification ($r = 0,523$, $n = 13$, $p = 0,07$).

Variabilité intra-annuelle

Température (figure 2). La température moyenne présente des variations inverses de celles de l'humidité et de la pluviométrie. La température diurne des mois d'août et de septembre est la moins élevée sur la période mai-décembre. Ceci est classiquement observé car, durant ce mois, l'occurrence des précipitations et

Tableau 1

Statistiques élémentaires sur les valeurs annuelles des quatre variables analysées, de 1984 à 1996, dans la zone de Niakhar, Sénégal

	Nombre de décès attribués au paludisme	Pluviométrie (°C)	Température (mm)	Humidité relative (%)
Moyenne	50,8	436,1	29,61	61,5
Médiane	43,0	439,0	29,57	61,3
Minimum	23,0	227,0	29,31	58,2
Maximum	100	613,7	30,32	65,7

Descriptive statistics for the annual values of the four analysed variables. Data are for 1984 to 1996, Niakhar, Senegal

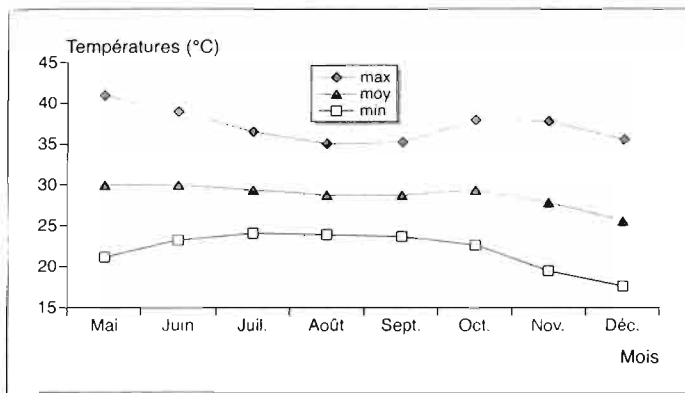


Figure 2. Températures mensuelles minimales, moyennes et maximales, de 1984 à 1996, dans la zone de Niakhar, Sénégal.

Figure 2. Monthly values of the minimum, mean and maximum temperature for 1984-1996, Niakhar, Senegal.

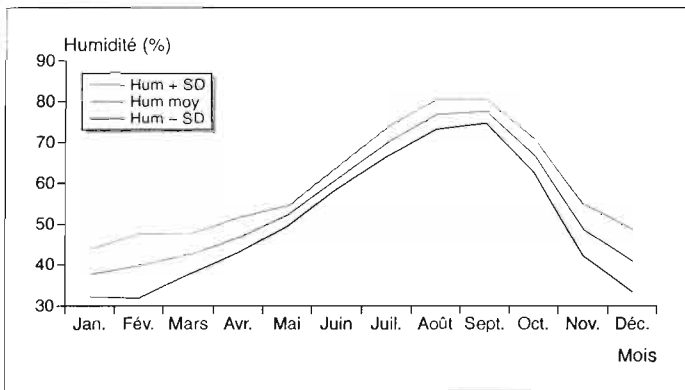


Figure 3. Humidité mensuelle moyenne (± 1 écart type), de 1984 à 1996, dans la zone de Niakhar, Sénégal.

Figure 3. Monthly values of relative humidity (\pm one standard deviation) for 1984-1996, Niakhar, Senegal.

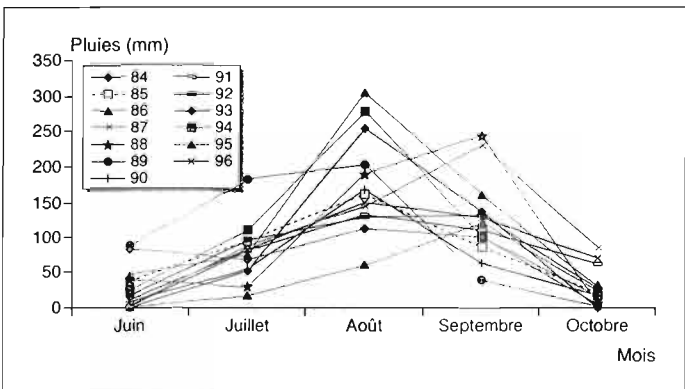


Figure 4. Évolution de la pluviométrie de juin à octobre, entre 1984 et 1996, dans la zone de Niakhar, Sénégal.

Figure 4. Evolution of the precipitation from June to October in each year 1984 to 1996 at Niakhar, Senegal.

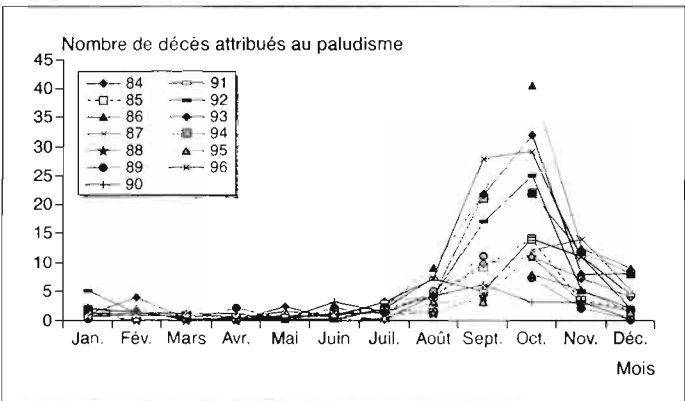


Figure 5. Évolution mensuelle du nombre de décès attribués au paludisme, de 1984 à 1996, dans la zone de Niakhar, Sénégal.

Figure 5. Monthly evolution of the number of deaths attributable to malaria for each year 1984 to 1996 in the Niakhar region, Senegal.

l'importance de la couverture nuageuse tendent à adoucir la température.

Humidité (figure 3). L'humidité relative a une distribution semblable à celle des précipitations mais beaucoup plus régulière. Un maximum absolu est observé en août et septembre (80 %) au milieu de la période pluvieuse.

Pluviométrie (figure 4). Aucune pluie significative n'est enregistrée en dehors de la période mai-octobre. La variabilité mensuelle de la pluviométrie montre une distribution unimodale des pluies avec un maximum (entre 100 et 300 mm) observé 10 fois en août et 3 fois en septembre.

Mortalité palustre (figure 5). La mortalité palustre mensuelle montre une distribution unimodale bien nette. Douze fois (sur 13 années), la mortalité a atteint un pic en octobre. Un accroissement très rapide a été observé à partir d'août, ainsi qu'une décroissance symétrique à partir de novembre.

Les données météorologiques et de mortalité palustre présentent des distributions différentes. Les paramètres météorologiques présentent tous un extremum en août : il s'agit de maxima pour la pluie et l'humidité relative et d'un minimum pour la température moyenne. La mortalité palustre, quant à elle, présente un maximum en octobre, soit deux mois après.

Relation entre mortalité palustre et conditions climatiques

Les coefficients de corrélation ont été calculés entre la mortalité palustre survenue en septembre-octobre (qui correspond à 59,5 % de la mortalité totale attribuée au paludisme) et la pluviométrie de chaque mois entre juin et septembre. Les corrélations sont très faibles dans l'ensemble (tableau 2), excepté pour le mois d'août ($r = 0,61$, $n = 13$, $p = 0,02$). Ceci montre que la mortalité palustre semble davantage liée aux conditions pluviométriques du mois d'août que de celles de chacun des autres mois. L'élargissement de l'observation de la mortalité sur la période septembre-décembre (qui correspond à 89,1 % de la mortalité totale) ne change pratiquement pas ces corrélations (pour la pluviométrie en août, $r = 0,63$, $n = 13$, $p = 0,02$).

La distribution des coefficients de corrélations obtenue avec l'humidité relative moyenne mensuelle est assez similaire à

Tableau 2

Valeurs des coefficients de corrélation entre la mortalité attribuée au paludisme en septembre-octobre et la valeur mensuelle de trois variables climatologiques (n = 13), de 1984 à 1996, dans la zone de Niakhar, Sénégal

	Pluviométrie	p	Température	p	Humidité relative	p
Juin	-0,0963	0,76	0,0163	0,96	0,3113	0,31
Juillet	0,1001	0,75	0,0027	0,99	0,0813	0,80
Août	0,6141	0,024	-0,3620	0,23	0,4435	0,13
Septembre	0,1061	0,74	-0,0480	0,88	0,2290	0,46
Octobre	0,0521	0,87	0,3293	0,28	-0,1408	0,65

Correlation between the number of deaths attributable to malaria during September-October and monthly climate indices. Data are for Niakhar, Senegal, from 1984 to 1996 (n = 13)

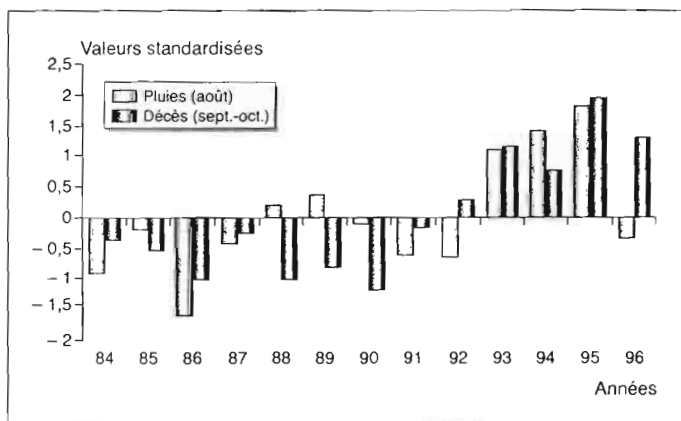


Figure 6. Co-variation du nombre de décès attribués au paludisme en septembre-octobre, et de la pluviométrie en août de la même année. L'échelle des ordonnées est exprimée en écart type au-dessus et en dessous de la moyenne calculée sur la période 1984-1996.

Figure 6. Covariation of the number of deaths each year attributable to malaria during September-October and the August rainfall at Niakhar, Senegal over

1984 to 1996. Units are standard deviations above or below the 1984-1996 mean value.

Tableau 3

Valeurs des coefficients de corrélation croisée entre la mortalité attribuée au paludisme entre août et décembre et les séries de données climatologiques décalée de 0, 1, 2 et 3 mois (13 années x 5 mois, n = 65), de 1984 à 1996, dans la zone de Niakhar, Sénégal

Décalage (en mois)	Pluviométrie	p	Température	p	Humidité relative	p
0	0,1165	0,35	-0,1969	0,11	0,2026	0,10
+1	0,4261	0,0004	-0,2081	0,10	0,3397	0,0056
+2	0,2643	0,033	-0,0932	0,46	0,1646	0,19
+3	0,2041	0,10	-0,0780	0,54	0,1623	0,19

Lagged correlation coefficient between monthly (August, September, October, November, December) malaria indices (13 years x 5 months, n = 65) and standardized monthly precipitation indices. Results are for 1984-1996, Niakhar, Senegal. Lags are for 0, + 1 month (malaria lags: rainfall by one month), + 2 months and + 3 months

celle obtenue avec la pluviométrie (tableau 2). Là encore, la corrélation maximale est observée avec le mois

d'août (r = 0,44). Ceci est conforme à la forte liaison entre la pluviométrie et l'humidité relative ; c'est au mois d'août

que la pluie atteint son maximum, tout comme l'humidité relative.

Contrairement aux deux corrélations précédentes, le coefficient de corrélation entre la mortalité palustre et la température moyenne mensuelle est négatif (tableau 2). La valeur absolue maximale de la corrélation est observée en août (r = -0,36). Quand la pluie et l'humidité relative atteignent leur maximum en août, la température présente un minimum. En raison de la forte corrélation qui lie ces trois variables climatologiques, nous avons choisi de considérer la variable pluviométrie pour laquelle la valeur absolue de la corrélation en août est la seule statistiquement significative. La covariation entre la pluie d'août et le nombre de décès attribué au paludisme en septembre-octobre (figure 6) montre une évolution qui va dans le même sens neuf années sur treize (p = 0,165 par le test des rangs T de Wilcoxon sur des séries appariées).

Les coefficients de corrélation croisée sont significatifs pour la pluviométrie avec un décalage de un et de deux mois, et pour l'humidité avec un décalage de un mois (tableau 3). Le coefficient de corrélation entre la mortalité et la pluviométrie décalée d'un mois (+0,43) est sensiblement inférieur à celui obtenu précédemment (+0,61) entre la pluviométrie d'août et la mortalité de septembre-octobre.

Discussion

Les relevés pluviométriques utilisés ont été comparés aux relevés officiels de la sous-préfecture de Niakhar et montrent une excellente concordance (non présentée ici). Les séries de température et d'humidité sont des moyennes de trois points géographiques de la zone, minimisant ainsi le poids d'éventuelles erreurs de relevé et de données aberrantes. Le diagnostic de paludisme a été porté à partir de l'analyse des dossiers d'autopsie verbale. Cette méthode est actuellement la seule qui permette d'évaluer la mortalité palustre survenant hors des structures de soins. Les limites de cette méthode ont été soulignées par ceux-là mêmes qui l'ont largement utilisée [33, 34].

Nos résultats mettent en évidence un lien entre la mortalité attribuée au paludisme et les trois paramètres météorologiques étudiés. L'hypothèse d'une relation entre la mortalité attribuée au

Summary

Climate variability and number of deaths attributable to malaria in the Niakhar area, Senegal, from 1984 to 1996

O. Ndiaye, J.Y. Le Hesran, J.F. Etard, et al.

There are a number of reasons why climate, in certain physical and social environments, could have an impact on the epidemiology of malaria. Events, such as floods or drought, are related to the number of malaria cases and deaths, both seasonally and interannually. At a smaller scale, this study analyses the relation between climate variability and the variability in the number of deaths attributable to malaria in Niakhar, Senegal. The Niakhar area has a population of 30,000 and has been under demographic surveillance system since 1984. The rainfall in this region is highly seasonal, with a rainfall maximum in August and almost no rain between October/November and May/June. In addition to this seasonal cycle, rainfall also varies greatly from year to year (interannual variation).

Over the 13 years, there were 661 deaths attributed to malaria with a marked interannual variability (range from 23 to 100, with a median of 43). There was also a strong seasonality in mortality, with nearly all deaths (89.1%) occurring between August and December. The number of deaths peaks in October, two months after the rainfall peak. Standardised monthly values were calculated for each climatic series (rainfall, relative humidity, temperature) as well as standardised five-month and monthly values of the number of deaths attributed to malaria between August and December. Correlation coefficients were calculated between these standardised values. The correlation between the variability in August rainfall and the variability in the number of deaths attributed to malaria between August and December was positive and statistically significant ($r = +0.61$, $p = 0.02$). In addition, highly significant cross-correlations were found between monthly rainfall series and monthly mortality series at one- and two-month lag ($r = +0.43$, $p = 0.0004$ for one-month lag; $r = +0.26$, $p = 0.03$ for two-month lag). This correlation is somewhat lower than the correlation of August rainfall alone with August to December mortality, but the result adds confidence to the signal given the increased degrees of freedom in the analysis. Similar, but slightly weaker, results were found when precipitation data were replaced with surface humidity data. Results with temperature were less clear; while temperature could in some circumstances have a direct impact on malaria, in this case here it is possible that the weak negative correlation between malaria deaths and temperature arises mainly because precipitation is physically connected to both the indices, correlating positively with malaria and negatively with temperature.

The availability of a continuous demographic and medical survey since 1984 in a region of highly variable rainfall has created a rare opportunity to analyse with some confidence a climate versus malaria relationship. The findings are consistent with our understanding of the proposed link between rainfall and conditions for the reproduction of the malaria vector, leading to a lag time (here of one to two months) between anomalies of rainfall and deaths attributable to malaria. These results may have practical implications in Sub-Saharan regions marked by a great seasonal and interannual variability in rainfall by providing a simple tool to forecast the impact of climate variability on malaria mortality.

Cahiers Santé 2001; 11: 25-33.

paludisme cumulée d'août à décembre et la pluviométrie du mois d'août semble pouvoir être posée dans la zone de Niakhar. Elle permet de faire ressortir certaines conditions météorologiques favorables au paludisme telles qu'une forte pluviométrie en août et, probablement aussi, une forte humidité et une légère baisse de la température. Des précipitations abondantes entraînant la formation de mares et flaques pluviales sont nécessaires pour le développement larvaire du moustique et pour d'abondantes populations de vecteurs. La forte humidité qui lui est associée favorise la survie des moustiques adultes. Les températures des mois d'août et septembre, variant entre 24 et 35 °C, sont constamment favorables à un développement sporogonique

optimum de *P. falciparum*, alors que les températures maximales supérieures à 35 °C, telles qu'observées lors des autres mois, sont défavorables tant pour le développement sporogonique que pour la survie des moustiques adultes. Le décalage de un à deux mois observé entre les maxima de pluviométrie et les pics de décès attribuables au paludisme est un fait notable qu'il faut tenter d'expliquer. La mise en eau par la pluie des gîtes larvaires des moustiques est suivie en quelques semaines par la pullulation des anophèles qui ont une forte capacité de multiplication due à la fois à un fort taux de croissance (jusqu'à 2 000 œufs pondus par une femelle au cours de sa vie) et à un développement pré-imaginal ultra-rapide pour un méta-

zoaire (une dizaine de jours). La prévalence des gamétocytes de *P. falciparum* est relativement faible en début de saison de transmission palustre (16 % chez les 5-9 ans en juin 1995 *versus* 37 % en novembre 1995 [31]); on peut donc penser que les premières anophèles s'infecteront peu et qu'il faudra attendre la multiplication des porteurs pour voir se multiplier le nombre d'accès palustre. De plus, seuls les anophèles femelles âgés au moins de dix jours (durée du cycle sporogonique du parasite) sont capables d'inoculer des sporozoïtes à un homme. Enfin, le parasite doit achever la phase hépatique (une semaine) et plusieurs cycles érythrocytaires (au moins une semaine) avant, éventuellement, de provoquer un accès palustre. Au total, le

Résumé

De nombreux arguments permettent de penser que le climat influence l'épidémiologie du paludisme. L'alternance des saisons ou les événements particuliers tels que les inondations ou la sécheresse se traduisent par une modification de l'impact du paludisme tant en morbidité qu'en mortalité. À une moindre échelle, nous avons étudié les relations entre les variations mensuelles du climat et les variations mensuelles de la mortalité attribuée au paludisme. L'étude a été réalisée dans la zone de Niakhar, Sénégal, sur les données accumulées au cours de 13 années, de 1984 à 1996. La zone d'étude de Niakhar comprend 30 000 personnes et fait l'objet d'une surveillance démographique continue depuis 1984. Les pluies dans cette région sont caractérisées par une saisonnalité marquée, un maximum le plus souvent en août, et une forte variabilité inter-annuelle. Au cours des 13 années étudiées, 661 décès ont été attribués au paludisme avec d'importantes variations inter-annuelles (médiane 43 ; extrêmes 23-100). La majeure partie (89,1 %) des décès attribués au paludisme a été observée entre août et décembre, avec un maximum en octobre. La corrélation entre la variabilité de la pluviométrie du mois d'août et la variabilité de la mortalité attribuée au paludisme entre août et décembre était positive et significative ($r = 0,61$, $p = 0,02$). De plus, il existait une corrélation entre la variabilité de la pluviométrie observée au cours d'un mois et la variabilité du nombre de décès attribués au paludisme observé au cours des deux mois suivants ($r = 0,43$, $p = 0,0004$ avec un décalage de un mois ; $r = 0,26$, $p = 0,03$ avec un décalage de deux mois). Ce décalage de un à deux mois est en accord avec nos connaissances du cycle du parasite et des interactions parasite-homme-vecteur. Des résultats similaires, quoique moins nets, ont été obtenus avec l'humidité et la température. Ces observations pourraient aider les décideurs à anticiper l'importance de la mortalité attribuée au paludisme dans les régions soudano-sahéliennes où la variabilité de la pluviométrie inter et intra-annuelle est marquée.

décalage de un à deux mois entre les pics de pluviométrie et de mortalité palustre semble tout à fait logique par rapport à ce que l'on connaît de la biologie du vecteur et du parasite.

Malgré la taille limitée de notre série, la distribution des sens de covariation entre la mortalité palustre et chaque paramètre météo semble bien aller dans le sens d'une telle liaison paludisme-climat ($p = 0,165$ pour 13 couples d'observations répartis en 9 versus 4). L'année 1996 pose problème (figure 6). Lors de cette année, une forte mortalité palustre est observée. Celle-ci est supérieure à ce qui est attendu sur la seule base des données climatologiques. Tout au long de cette année, une importante épidémie de choléra est survenue dans la zone [35]. On peut se poser la question d'une surmortalité palustre due à une altération de l'état général des enfants, conséquence de l'épidémie de choléra.

Il est intéressant de noter que Niakhar est une zone d'endémie non saturante où la transmission est relativement faible. Ces conditions sont *a priori* favorables à

la mise en évidence de relations climat/mortalité palustre. C'est en effet dans ce contexte que l'impact d'une réduction de la transmission, naturelle ou provoquée par l'homme, peut avoir le maximum de conséquence [36]. Si le taux d'inoculation entomologique (EIR) pour les adultes est de 10 les années de forte pluviométrie (tel qu'il a été estimé au cours de l'année 1995 [32]), il pourrait être largement inférieur à cette valeur pour les enfants et nourrissons au cours des années de faible pluviométrie. On considère en effet qu'un adulte est deux fois plus piqué par des moustiques qu'un enfant, et que ce dernier est deux fois plus piqué qu'un nourrisson [37]. Il semble donc raisonnable de présager que certains enfants échappent à l'impaludation et donc au décès par paludisme les années de faible pluviométrie.

Cependant, il reste clair que les conditions climatiques n'expliquent pas à elles seules la totalité des variations de la mortalité palustre. Beaucoup d'autres facteurs interviennent tels que l'accès aux soins de santé, les ressources écono-

miques, la qualification du personnel soignant, le délai entre la survenue de l'accès palustre et sa prise en charge. Il a également été proposé [24] que l'émergence de la chloroquinorésistance, qui date de 1992 dans la zone de Niakhar, a été responsable de l'augmentation de la mortalité attribuée au paludisme à partir de cette date.

En conclusion, nos observations dans la zone de Niakhar mettent en évidence une relation entre la variabilité de la pluviométrie du mois d'août et la variabilité du nombre des décès attribués au paludisme au cours des mois qui suivent. Cette relation pourrait être utile pour les responsables de santé publique car elle permet, un à deux mois à l'avance, de faire des prévisions sur l'importance à venir de la mortalité attendue et d'en tenir compte, notamment par rapport à la prise en charge des cas de paludisme grave ou compliqué. Toutefois, il sera, d'une part, intéressant de confirmer nos résultats sur une série plus longue dans la zone de Niakhar quand nous disposerons des données pour les années 1997, 1998, 1999 et 2000 et, d'autre part, de confirmer cette relation dans d'autres sites ■

Remerciements

Nos remerciements vont :

- aux familles de la zone de Niakhar pour avoir autorisé les enquêtes sur les causes de décès ;
- aux personnels ayant assuré le suivi démographique : Anouch Chahnazarian (†), Valérie Delaunay, Waly Diarfe, Joseph Diatte, Samba Diatte, Latyr Diome, Abdou Diouf, Djibril Diouf, Saliou Diouf, Samba Diouf, Raphaël Dogue, Bassirou Fall, Aldiouma Faye, Ernest Faye, Latyr Faye, Ousmane Faye, Diaga Loum, Adama Marra, Emile Ndiaye, Emilie Ndiaye, Michel Ndiaye, Ousmane Ndiaye, Antoine Ndour, Marie Sane ;
- aux médecins ayant attribué les causes de décès : Jean-Pierre Bau, Badara Cissé, Marème Dia, Belco Kodio, Malick Ndiaye, Marie-Pierre Preziosi, Badara Samb, Aminata Simaga, Jean-François Trape, Ablaye Yam ;
- au Pr Peter Lamb (CIMMS) pour son soutien matériel et technique et au Pr Yves Tourre (International Research Institute for Climate Prediction) pour avoir posé la première pierre de cette publication lors du « Training course : climate prediction and diseases/health in Africa » organisé à Bamako.

Références

1. Folland CK, Karl T, Vinnikov KY. Observed climate variations and change. In : Houghton JT, Jenkins GJ, Ephraums JJ, eds. *Climate change : the IPCC scientific assessment*. Cambridge : Cambridge University Press, 1990 : 195-238.

2. Hulme M. Rainfall changes in Africa : 1931-1960 to 1961-1990. *Int J Climatol* 1992 ; 12 : 685-99.
3. Mitchell JF, Manabe S, Tokioka T, Meleshko V. Equilibrium climate change. In: Houghton JT, Jenkins GJ, Ephraums JJ, eds. *Climate change : the IPCC scientific assessment*. Cambridge : Cambridge University Press, 1990 : 131-72.
4. Tickell C. Global warming : trends and effects. *Parasitology* 1993 ; 106 : S5-9.
5. Loevinsohn ME. Climatic warming and increased malaria incidence in Rwanda. *Lancet* 1994 ; 343 : 714-8.
6. Sharp D. Malaria range set to spread in a warmer world. *Science and Medicine* 1996 ; 347 : 1612.
7. Jetten TH, Martens WJM, Takken W. Model simulations to estimate malaria risk under climate change. *J Med Entomol* 1996 ; 33 : 361-71.
8. Martens WJM, Jetten TH, Focks DA. Sensivity of malaria, schistosomiasis and dengue to global warming. *Climatic Change* 1997 ; 35 : 145-56.
9. Lindsay SW, Bodker R, Malima R, Msangeni HA, Kisinza W. Effect of 1997-1998 El Niño on highland malaria in Tanzania. *Lancet* 2000 ; 355 : 989-90.
10. Trape JF. Changements climatiques et maladies infectieuses : le cas du paludisme et de la borréliose à tiques. *Med Mal Infect* 1999 ; 29 : 296-300.
11. Lindsay SW, Birley MH. Climate change and malaria transmission. *Ann Trop Med Parasitol* 1996 ; 6 : 573-88.
12. Mouchet J, Faye O, Julvez J, Manguin S. Drought and malaria retreat in the Sahel, West Africa. *Lancet* 1996 ; 348 : 1735-6.
13. Organisation mondiale de la santé. El Niño et ses répercussions sur la santé. *Weekly Epidemiol Rec* 1998 ; 20 : 148-52.
14. Bouma MJ, Sondorp HE, van der Kaay HJ. Climate change and periodic epidemic malaria. *Lancet* 1994 ; 343 : 1440.
15. Brown V, Abdir IM, Rossi M, Barboza P, Pugaum A. Epidemic of malaria in north-eastern Kenya. *Lancet* 1998 ; 353 : 1356-7.
16. Robert V, Planchon O, Lapetite JM, Esteves M. Rainfall is not a direct mortality factor for anopheline larvae. *Parasite* 1999 ; 6 : 195-6.
17. Molineaux L. The impact of parasitic diseases and their control on mortality, with emphasis on malaria and Africa. In: Vallin J, Lopez A, eds. *Health policy, social policy and mortality prospects*. Liège : Ordina Editions, 1985 : 13-44.
18. Bradley DJ. Morbidity and mortality at Pare-Taveta, Kenya and Tanzania, 1954-1966 : the effects of a period of malaria control. In: Feacham RG, Jamison DT, eds. *Disease and mortality in Sub-Saharan Africa*. Washington : World Bank, 1991 : 248-63.
19. Delaunay V. Suivi longitudinal de population. In: Delaunay V, ed. *La situation démographique et épidémiologique dans la zone de Niakhar au Sénégal, 1984-1996*. Dakar : Orstom, 1998 : 13-22.
20. Salum FM, Wilkes TJ, Kivumbi K, Curtis CF. Mortality of under-fives in a rural area of holoendemic malaria transmission. *Acta Tropica* 1994 ; 58 : 29-34.
21. Snow RW, Craig M, Deichmann U, Marsh K. Estimating mortality, morbidity and disability due to malaria among Africa's non-pregnant population. *Bull WHO* 1999 ; 77 : 624-40.
22. Organisation mondiale de la santé. La situation du paludisme dans le monde en 1993. *Weekly Epidemiol Rec* 1996 ; 3 : 17-22.
23. Najera JA, Hempel J. *The burden of malaria*. World Health Organization 1996, CTD/MAL/96.10, 58 p.
24. Trape JF, Pison G, Preziosi MP, et al. Impact of chloroquine resistance on malaria mortality. *C R Acad Sci Paris, Ser III* 1998 ; 321 : 689-97.
25. Eltahir EAB, Gong C. Dynamics of wet and dry years in West Africa. *J Climate* 1996 ; 9 : 1030-42.
26. Fontaine B, Janicot S, Moron V. Rainfall anomaly patterns and wind field signals over West Africa in August (1958-1989). *J Climate* 1995 ; 8 : 1503-10.
27. Folland CK, Parker TN, Parker DE. Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901-1985. *Nature* 1986 ; 320 : 602-6.
28. Folland CK, Owen JA, Ward MN, Colman AW. Prediction of seasonal rainfall in the Sahel region of Africa using empirical and dynamical methods. *J Forecasting* 1991 ; 10 : 21-56.
29. Rowell DP, Folland CK, Maskell K, Ward MN. Variability of summer rainfall over tropical north Africa (1906-1992) : observations and modeling. *Quart J Roy Meteor Soc* 1995 ; 121 : 669-704.
30. Ward MN. Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical North Africa at interannual and multidecadal time-scales. *J Climate* 1998 ; 11 : 3167-91.
31. Ndiaye F, Molez JF, Trape JF. Endémie palustre. In: Delaunay V, ed. *La situation démographique et épidémiologique dans la zone de Niakhar au Sénégal, 1984-1996*. Dakar : Orstom, 1998 : 118-22.
32. Robert V, Dieng H, Lochouart L, Traoré SF, Trape JF, Simondon F, Fontenille D. La transmission du paludisme dans la zone de Niakhar, Sénégal. *Trop Med Publ Health* 1998 ; 3 : 667-77.
33. Snow RW, Armstrong JRM, Forster D, et al. Childhood deaths in Africa : uses and limitations of verbal autopsies. *Lancet* 1992 ; 340 : 351-5.
34. Chandramohan D, Maude GH, Rodrigues LC, Hayes RJ. Verbal autopsies for adult deaths : their development and validation in a multicentre study. *Trop Med Int Health* 1998 ; 3 : 436-46.
35. Roquet D, Diallo A, Kodio B, Daff MB, Fenech C, Etard JF. L'épidémie de choléra de 1995-1996 au Sénégal : un exemple de démarche de géographie de la santé. *Cahiers Santé* 1998 ; 8 : 421-8.
36. Robert V, Trape JF. Lutter contre le paludisme en réduisant sa transmission ? Présentation de la controverse. *Médecine/Sciences* 1997 ; 13 : 678-82.
37. Carnevale P, Frezil JL, Bosseno MF, Le Pont F, Lancien J. Étude de l'agressivité d'*Anopheles gambiae* en fonction de l'âge et du sexe des sujets humains. *Bull WHO* 1978 ; 56 : 147-54.