

Ressources en eau et santé publique au Sahel : exemple de la propagation des maladies infectieuses à Saint-Louis (Sénégal)

Moussa Mbaye^{1,2,4}
 Gil Mahé¹
 Eric Servat¹
 Richard Laganier²
 Sylvain Bigot³
 Oumar Diop⁴
 Jean-Francois Guégan⁵

¹ Hydrosociences Montpellier
 UMR 050 (IRD)/UMR 5569 (CNRS)
 Université Montpellier
 2, place Eugène-Bataillon
 34095 Montpellier, France
 <gil.mahé@msem.univ-monpt2.fr>
 <eric.servat@msem.univ-monpt2.fr>

² Équipe DYNAMIRIS-UMR PRODIG 8586
 CNRS
 Université Denis-Diderot Paris-VII
 2, place Jussieu
 75251 Paris cedex 05
 France
 <richard.laganier@univ-paris-diderot.fr>

³ Institut de géographie alpine
 Université Joseph-Fourier
 14 bis, avenue Marie-Reynard
 38100 Grenoble
 France

<sylvain.bigot@ujf-grenoble.fr>
⁴ Groupe GIRARDEL
 Université Gaston-Berger
 Saint-Louis, Sénégal
 <moussa.mbaye@msem.univ-monpt2.fr>
 <om_55@yahoo.fr>

⁵ GEMI, UMR 2724 IRD-CNRS,
 Équipe dynamique des systèmes
 et maladies infectieuses
 Centre IRD de Montpellier
 911, avenue Agropolis
 BP 64501
 34394 Montpellier cedex 05
 France
 <jean-francois.guegan@mpl.ird.fr>

Tirés à part : M. Mbaye

Résumé

Les villes sahéniennes d'Afrique, notamment Saint-Louis du Sénégal, sont pour la plupart soumises à une variabilité hydroclimatique assez notable. Parmi les conséquences les plus remarquables de ces fluctuations climatiques figurent sans doute la grande sécheresse due depuis plus d'une trentaine d'années à des déficits pluviométriques importants et un retour à des précipitations plus abondantes à partir de la fin des années 1990. En effet, durant cette dernière décennie, on peut observer des occurrences plus fréquentes de pluies annuelles un peu plus élevées. Ces hivernages pluvieux occasionnent à leur tour des inondations qui, sont facilitées entre autres par la médiocrité des sites d'habitat. Sur le plan sanitaire, ces situations hydrologiques participent à la propagation de vecteurs et parasites pathogènes chez les populations locales et d'autres types de moustiques nuisibles comme *Culex quinquefasciatus*. On peut citer notamment le cas des *Anophèles* et des *Aedes* qui transmettent respectivement le paludisme et la fièvre jaune dans sa composante urbaine. La commune de Saint-Louis souffre ainsi de la multiplication des eaux stagnantes surtout dans les points bas intra-urbains. Le manque d'équipements socioéconomiques et surtout la faible couverture sanitaire fragilisent la capacité adaptative de ses habitants face aux agents pathogènes. En outre, les situations hydrologiques, notamment la pluviométrie et les apports du fleuve Sénégal sont bien liés aux cas de consultations générales observées dans les structures sanitaires locales et à la morbidité ressentie. Les quartiers densément peuplés en concentrant aussi plus de la moitié des cas cliniques font partie des plus exposés.

Mots clés : moustiques, ressources en eau, Sahel, santé, Sénégal.

Abstract

Water and public health in Sahelian countries: The case of infectious disease in Saint-Louis (Senegal)

Rainfall occurrence in the Sahelian region in places like Saint-Louis (Senegal) depends essentially on Africa's monsoon flux from the South Atlantic drift. This monsoon plays an important role while provoking hydrological consequences that result from climate variability over time and space. Such consequences may be droughts or floods with harsh consequences for the socioeconomic activities of the urban population and the environment. For example, the Sahelian drought of the 1970s forced the urban populations to relocate to former backwaters, ponds and mud flats located within Saint-Louis (Senegal). However, better levels of rainfall in the late 1990s subjected the urban population to severe flooding and precarious environmental conditions. This situation is due to the poor and inadequate water network systems which in most cases are old and obsolete. Hence, the poor environ-

mental conditions and stagnant water encourage the breeding of several species of mosquito. Among the species, Anopheles and Aedes are the most dangerous because of the transmission of malaria and yellow fever. It is thus important to investigate and model the population's vulnerability to infectious diseases as a result of current climate variation and its consequences. This work entails the integration of spatial and non-spatial data within the technological framework of a Geographical Information System (GIS), in order to assess the health impacts due to climatic fluctuation. The results show that there is a relationship between periods of flooding, cases of disease and mosquitoes.

Key words: human health, mosquitoes, Sahel, Senegal, water resources.

La pluviométrie dans le Sahel africain a pour origine essentielle le flux de mousson issu de l'anticyclone de Sainte-Hélène. Cette région est par ailleurs soumise à la variabilité climatique, elle-même corrélée à la dynamique de la mousson africaine [1, 2]. Cette variabilité du climat se caractérise par des déficits ou des excédents pluviométriques dans le temps et dans l'espace [3, 4] provoquant soit la sécheresse, soit des inondations. Les fluctuations hydroclimatiques ont notamment d'importantes répercussions sur la vie socio-économique des populations du Sénégal comme sur leur environnement depuis maintenant plus de trois décennies [5, 6].

La grande sécheresse des années 1970, résultat de la diminution des totaux pluviométriques [7], a été très sévèrement ressentie par toutes les sociétés du Sahel [8, 9]. Les impacts deviennent rudes pour les hommes, car les populations subsistent essentiellement grâce à l'agriculture au niveau des plaines et des cuvettes inondables. Aussi, l'approvisionnement des villes en produits agricoles peut en être très affecté et les pénuries d'eau potable, dans les principaux espaces urbanisés comme dans les centres urbains secondaires, en être accrues.

Ces dix dernières années en revanche, même si ce n'est pas généralisable [10], sont caractérisées par un retour d'hivers plus pluvieux qui ont des conséquences souvent dommageables [11]. En effet, le surplus d'eau est synonyme de beaucoup de contraintes pour les populations, car, à cause de la réduction des totaux pluviométriques et de la faible hauteur des crues, les anciens lits de marigots et mares, ainsi que les champs d'expansion des rivières ont été aménagés, occupés et mis en valeur par les populations riveraines [12, 13]. Ce retour de la pluviométrie abondante met ainsi en évidence la sensibilité des populations locales, et plus particulièrement des citadins, aux inondations [14, 15]. Par ailleurs, c'est surtout au niveau des pathologies infectieuses liées à l'eau et transmises par

des vecteurs d'eau que la menace devient plus contraignante [16-19].

Matériel et méthode

La ville de Saint-Louis (*figure 1*), située à l'exutoire du fleuve Sénégal, appartient à l'environnement estuarien de ce cours d'eau. En effet, le fleuve Sénégal débouche en mer au sud de Saint-Louis, mais auparavant, il suit la côte sur une longueur de 6,5 km, dans une véritable lagune appelée langue de Barbarie, large d'à peine 400 m en certains points, et si basse que les lames en franchissent parfois la crête pendant les fortes marées. Ce milieu est complexe et varié sur le plan géomorphologique, avec en général des sables moyens fins à granulométrie diversifiée, parfois argileuse ou limoneuse. Les altitudes sont basses, variant entre 1,7 et 2,8 m, et les pentes sont presque inexistantes, ce qui expose la ville à la remontée du niveau du fleuve lors des périodes de crue [20]. La ville historique, Saint-Louis, a de tout temps été cernée par l'eau. Le milieu naturel porte depuis toujours les empreintes des paysages d'eau dominés par les marécages et les îles inondables. Aujourd'hui, l'occupation urbaine sous des anciennes vasières se remarque par des îlots très peu étendus et en forme allongée.

Notre recherche est essentiellement menée par le biais d'une étude croisée, c'est-à-dire avec un recoupement des résultats obtenus à des échelles spatiales et temporelles différentes. L'utilisation d'un Système d'information géographique (SIG), dont le rôle consiste particulièrement à traiter un ensemble d'objets géographiques et les relations qu'ils entretiennent les uns avec les autres, a facilité le croisement des multiples résultats statistiques. Diverses méthodes ont ainsi en premier lieu porté sur une analyse univariée, pour mieux apprécier le fonctionnement des différentes variables, et, ensuite, sur une mise en œuvre de liaisons entre les variables les plus pertinentes.

Matériel

Auparavant, cette étude s'est appuyée sur des données journalières de pluies de 1950 à 2005 relevées directement au niveau des tableaux climatologiques mensuels de la station synoptique de Saint-Louis aéroport. Quant aux hauteurs d'eau observées à la station hydrologique de Saint-Louis, elles portent essentiellement sur la période de 1985 à 2005, autrement dit depuis la mise en eau du barrage de Diama situé à plus d'une vingtaine de kilomètres en amont de Saint-Louis. Elles proviennent également du service hydrologique régional de Saint-Louis.

Les statistiques sanitaires sur le paludisme ont été essentiellement recueillies à partir des registres de consultations générales disponibles dans les structures de santé. Le registre comporte plusieurs rubriques, telles que le nom et prénom du patient, son sexe, son âge, son lieu de résidence, le diagnostic et les observations du médecin. Toutes ces informations peuvent être spatialisées. En outre, les cas de paludisme observés au poste de santé de Sor de 1995 à 2005 constituent une assez bonne chronique pour la recherche de liens entre le climat et cette maladie transmise par un vecteur d'eau. En fait, le travail de collecte est porté seulement sur le poste de santé de Sor, car il est le plus ancien et le plus représentatif de toute la commune en termes de disponibilité et d'exploitabilité des registres. Un travail préliminaire a consisté à éliminer les mois qui sont trop incomplets. Par ailleurs, on pourrait être amené à parler plus, ici, de paludisme « présumé », ce qui inclut tout accès fébrile cliniquement suspect de paludisme. Le pourcentage de paludisme « avéré » ne peut être connu également, car, au niveau des structures sanitaires de base, on ne procède pas à une réalisation systématique d'une goutte épaisse et d'un frottis sanguin pour confirmer le diagnostic.

Méthode

La détection statistique de ruptures dans les séries temporelles constitue un outil de

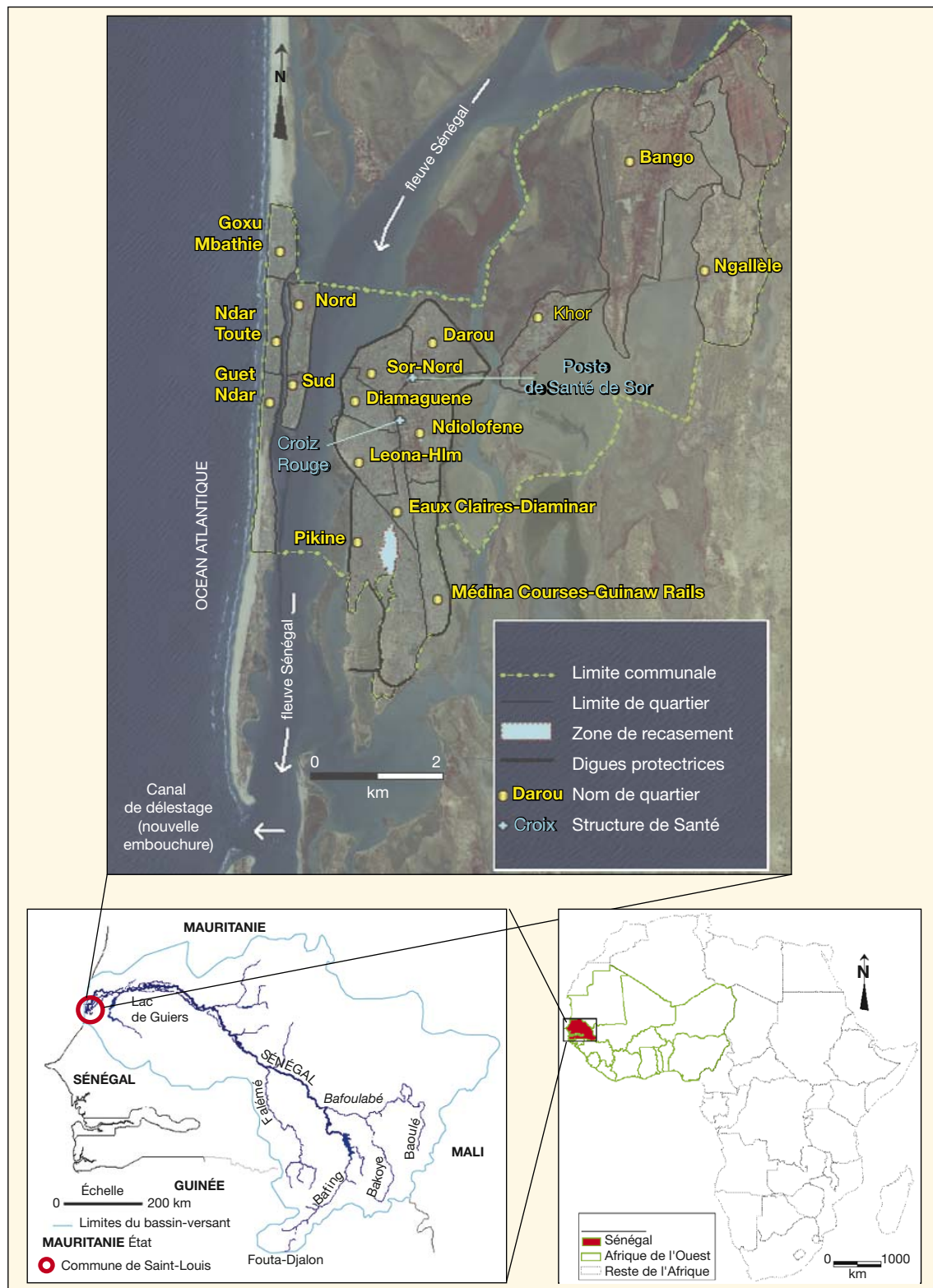


Figure 1. Localisation de la ville de Saint-Louis dans son environnement estuarien.

base dans plusieurs disciplines scientifiques, et les techniques mises en œuvre par Pettitt et Hubert sont les plus utilisées, comme c'est le cas dans notre étude [21].

Une autre méthode quantitative très en vogue pour apprécier le rythme d'évolution d'une série chronologique consiste à la décomposer [22]. Cette décomposition

par modèle additif utilisée, ici, repose sur cette formule $Y_t = C_t + S_t + \varepsilon_t$, avec C_t = tendance, S_t = variations saisonnières, ε_t = variations accidentelles, $t = 1, \dots, n$.

Dans le but d'estimer le niveau d'endémicité des pathologies liées à l'eau et en particulier de celles transmises par les vecteurs d'eau, un volet entomologique a été réalisé [23, 24]. Il s'agissait de réaliser une faune matinale résiduelle sur au moins 3 pièces par ménage pour un ensemble de 115 ménages échantillonnés de manière représentative. Cette technique de capture intradomiciliaire s'effectue par une pulvérisation d'un insecticide dans les chambres et la récolte des moustiques. Ce travail de collecte débute aux premières heures matinales avant que les moustiques ne commencent leur repli vers d'autres lieux. Au total, près de 360 pièces ont été prospectées et seuls 3 ménages sur les 115 ont été réticents. Au préalable, une enquête socio-sanitaire a été menée et tous les 115 ménages y ont participé. C'est seulement au niveau des captures de moustiques que ces trois ont fait part de leur refus.

La recherche de relations entre ces divers facteurs passe par la mise en œuvre de statistiques multivariées [25], notamment le test non paramétrique de Kruskal-Wallis pour identifier des différences significatives entre les populations de moustiques. La prédiction du paludisme à partir des variables exogènes que sont la pluviométrie et la hauteur d'eau du fleuve est réalisée grâce à un modèle linéaire généralisé (GLM).

Résultats

Caractérisation de la variabilité pluviométrique et hydrologique

Sur le plan climatique, le delta est sous l'influence de l'alizé maritime issu de l'anticyclone des Açores pendant la saison sèche qui dure presque neuf mois, d'octobre en juin. Les masses d'air sont incapables de produire des précipitations significatives, car l'alizé maritime est pratiquement inapte à produire des pluies. Les seules précipitations se produisent sous forme de rosée. On peut assister à des précipitations, mais de quantité très faible. Cependant, en janvier 2002, une situation sans doute exceptionnelle s'est produite : la ville de Saint-Louis a enregistré un cumul mensuel de 67,9 mm, qui a occasionné des inondations de grande ampleur. La totalité des pluies est enregistrée pendant la saison des pluies qui dure trois mois de juillet à septembre (figure 2). Les pluies sont causées par le flux de mousson issu de l'anticyclone de Sainte-Hélène situé en Atlantique sud. La remontée de l'équateur météorologique n'atteint cette zone deltaïque qu'à partir du mois de juillet, et sa descente se fait en fin septembre. Cela explique les faibles quantités de pluies observées dans cette zone. L'hydro-

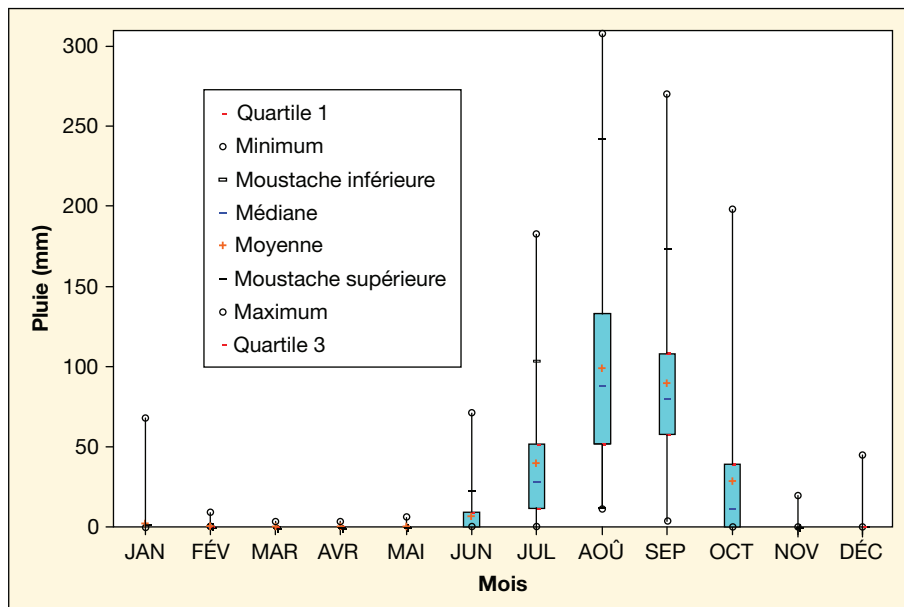


Figure 2. Distribution mensuelle de la pluviométrie à Saint-Louis (1950-2005).

logie du fleuve pour sa part est marquée par une longue période d'étiage et une courte période de hautes eaux de juillet à octobre (figure 3). On note une grande variabilité interannuelle avec un fort total annuel, comme en 1994, 1999 et 2003, et contrairement à 2004 et 2005 (figure 4). Cependant, l'hydrodynamique de l'estuaire a, depuis octobre 2003, considérablement évolué avec l'ouverture, en aval de Saint-Louis, d'un canal de délestage des eaux douces vers la mer à travers la langue de Barbarie, pour faciliter l'éva-

uation du surplus d'eau qui menaçait la ville.

• Tests de détection de rupture de la pluviométrie annuelle

Depuis plus de trois décennies, le Sahel africain enregistre une pluviométrie marquée par une grande variabilité climatique sur le plan spatio-temporel. Cela se caractérise par une baisse notable, autour de 1970 pour l'essentiel, des séries pluviométriques, même si les années de rupture diffèrent station par station. Concernant la station

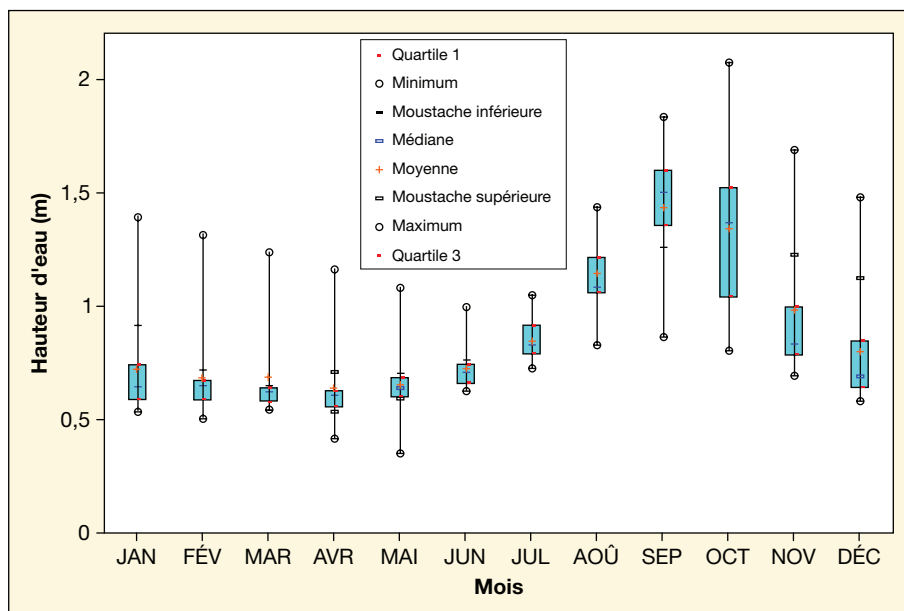


Figure 3. Distribution mensuelle de la hauteur d'eau à la station hydrologique de Saint-Louis (1985-2005).

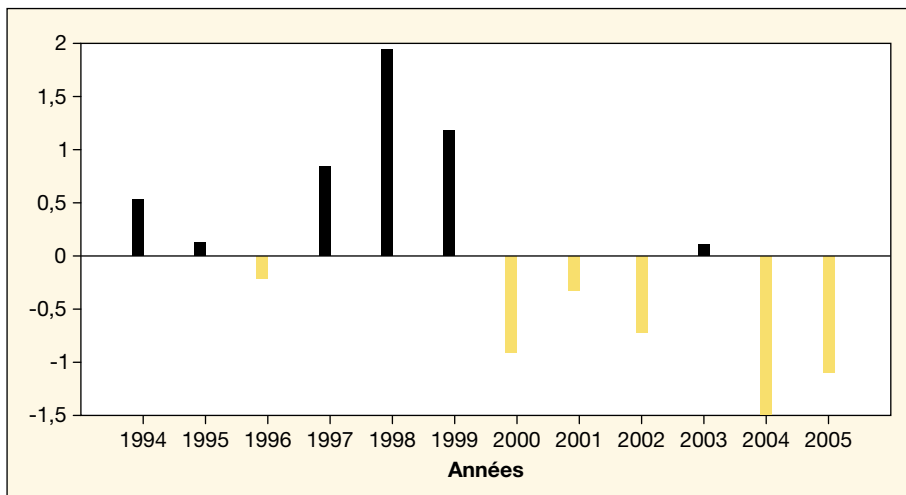


Figure 4. Indice hydrologique à Saint-Louis.

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

x_i = hauteur d'eau observée de x pour l'année i .

\bar{x} = moyenne de l'échantillon.

σ = écart type de l'échantillon.

Avec échantillon = 1994-2005, $\bar{x} = 0,83$ cm, $\sigma = 0,14$ cm.

synoptique Saint-Louis aéroport une diminution importante des pluies est observée durant la période 1970-1993. En revanche, depuis une dizaine d'années les totaux annuels sont devenus plus élevés bien que le nombre de jours de pluies soit réduit. En outre, les intensités journalières de pluies deviennent ainsi très fortes comme c'est le cas en 2000 avec 115,7 mm. Précisément, une rupture nette est décelée en 1969 avec des moyennes annuelles respectives de 345 et 228 mm pour les séquences 1950-1969 et 1970-2005 d'après la segmentation de Hubert. Selon le test de Pettitt, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est rejetée au seuil de confiance de 95 % avec une probabilité de dépassement de la valeur critique du test de 0,001 en 1969 (figure 5). L'analyse de la sous-série 1970-2005 ne décèle ainsi pas d'hétérogénéité à des seuils alpha de 90, 95 et 99 %. Dès lors, même si on note une reprise récente d'une pluviométrie abondante, on se demande si elle n'est que partielle et s'il ne faudrait pas attendre plusieurs années encore pour avoir plus de précisions sur cette tendance.

• Décomposition

de la pluviométrie mensuelle

L'étude de la série temporelle confirme bien la tendance à la baisse de la pluviométrie, à partir du point d'inflexion constitué par l'année 1969. On remarque une saisonnalité de période de 12 mois (figure 6). L'originalité de cette technique est qu'elle nous permet d'extrapoler les données passées dans le futur, autrement dit de faire des prévisions.

Capture et détermination de moustiques

Les moustiques capturés dans les chambres ont été déterminés sur place et certains d'entre eux ont été acheminés au laboratoire pour y être analysés [26-28]. On note une prédominance des *Culex*, suivis des *Aedes* (tableau 1). En revanche, peu

d'anophèles ont été capturés. Cette situation pourrait s'expliquer par le fait que les eaux stagnantes se souillent vite et que l'abondance d'eau saumâtre dans l'estuaire réduirait les gîtes potentiels des anophèles aptes à la transmission du paludisme par exemple [29]. Ainsi les techniques de spatialisation notamment les polygones de Thiessen [30], confirment que ce sont les moustiques, tels que *Aedes egypti*, qui prolifèrent dans les eaux sales et peuvent coloniser de plus en plus cet environnement (figure 7). Une attention particulière devrait cependant être prêtée à *Aedes egypti*, car ce vecteur est à l'origine des maladies comme la dengue et surtout la fièvre jaune dans sa version urbaine [31-33]. D'autant plus, en termes de diagnostic syndromique, que la fièvre jaune a certaines ressemblances avec le paludisme. L'enquête sociosanitaire effectuée a même montré également qu'en termes de morbidité ressentie, les patients utilisent le plus souvent la pharmacopée traditionnelle destinée à la fièvre jaune pour soigner le paludisme et guérissent dans la plupart des cas [34].

Dépouillement des registres de consultations générales

L'analyse révèle que le paludisme est le premier motif de consultations dans cette structure de santé. La plus grande affluence de patients est notée entre juillet à octobre, avec deux pics observés entre juillet et septembre, et durant les années

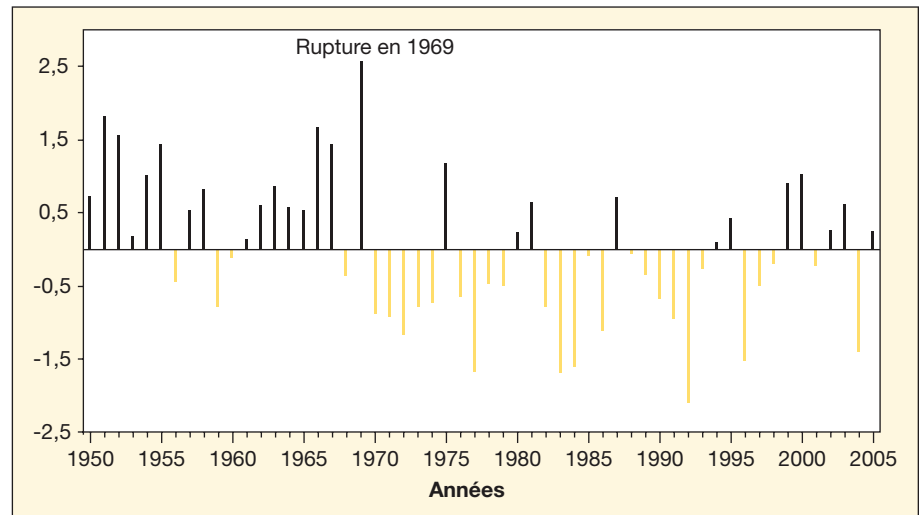


Figure 5. Indice pluviométrique à Saint-Louis.

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

x_i = pluviométrie observée de x pour l'année i .

\bar{x} = moyenne de l'échantillon.

σ = écart type de l'échantillon.

Avec échantillon = 1950-2005, $\bar{x} = 270,20$ mm, $\sigma = 101,14$ mm.

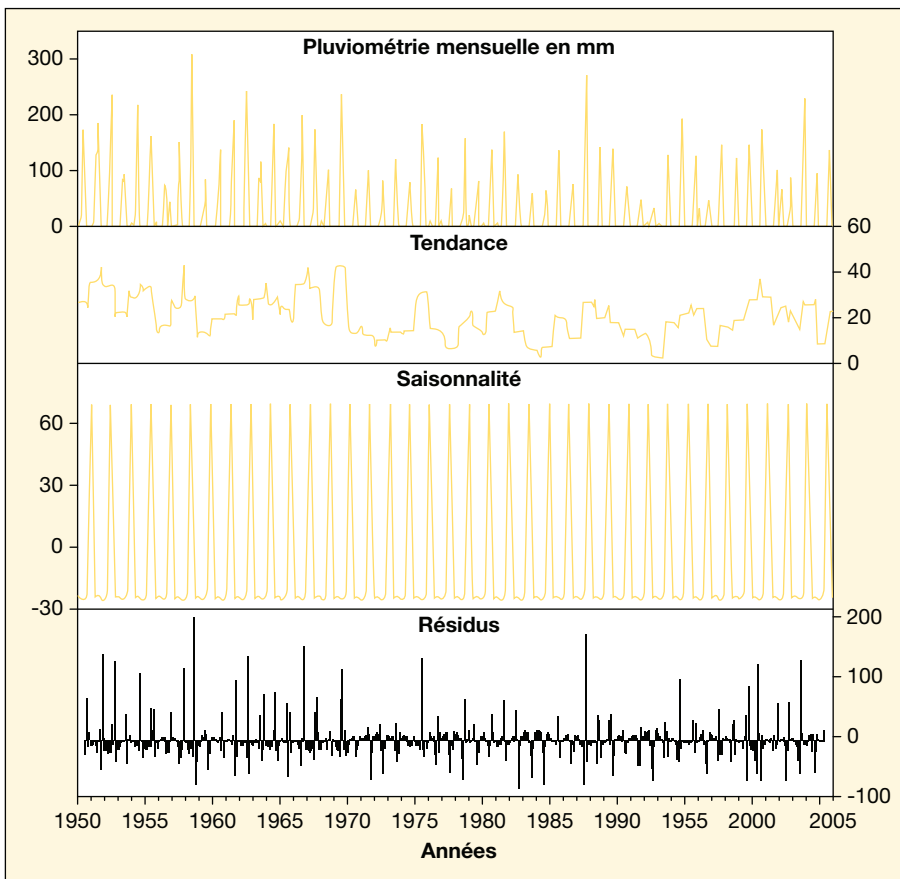


Figure 6. Décomposition de la pluviométrie mensuelle à Saint-Louis.

$$Y_t = C_t + S_t + \varepsilon_t.$$

C_t = tendance, .

S_t = variations saisonnières, .

ε_t = variations accidentelles, .

$t = 1, \dots, n.$

Tableau I. Capture et détermination de moustiques dans le faubourg de Sor.

Quartiers	Pers	A1		A2		A5		CLX		ADS	
		F	M	F	M	F	M	F	M	F	M
Eaux Claires-Diaminar	67	0	0	0	0	0	0	156	118	4	3
Léona-Hlm	87	0	0	0	0	0	0	372	256	0	0
Médina Courses G Rails	72	0	0	0	0	0	0	385	216	1	0
Darou	67	0	0	0	0	4	1	278	85	0	2
Sor Nord	93	0	0	0	0	0	0	653	409	5	3
Ndiolofène	118	1	0	1	0	1	0	664	306	1	0
Diamaguene	85	0	0	0	0	0	0	395	321	40	3
Pikine	315	0	0	0	0	0	0	885	759	24	10
	904	1	0	1	0	5	1	3788	2470	75	21

F : femelle ; M : mâle ; A1 : *Anopheles gambiae s.l* (*Anopheles gambiae* et *Arabiensis*) ; A2 : *Anopheles pharaoensis* ; A5 : *Anopheles rufupes* ; CLX : *Culex* ; ADS : *Aedes* ; Pers : nombre de personnes ayant passé la nuit dans la chambre.

1997, 2002 et 2003, on a enregistré les prévalences les plus fortes. La couche des enfants de moins de 15 ans représente plus de la moitié des malades et elle est dominée par les patients de sexe féminin.

Analyse multivariée

Près de 61 % des moustiques récoltés sont constitués de femelles et les *Culex* représentent environ 97,9 de celles-ci contre

1,9 % d'*Aedes*. C'est aussi au niveau des quartiers, comme Pikine et Ndiolofène, que l'on trouve le plus grand nombre de moustiques femelles, avec respectivement 23,5, et 17,3 %, et les plus fortes concentrations sont rencontrées à Sor Nord et Diamaguene. La domination des *Culex* par rapport aux autres espèces est confirmée par le test de Kruskal-Wallis (tableau 2). La *p-value* calculée est nettement inférieure au niveau de signification $\alpha = 0,05$, on doit rejeter H_0 (Les échantillons ne sont pas significativement différents) (tableau 3).

En outre, on voit des différences non significatives des *Culex* avec toutes les autres espèces. Cette situation est favorisée entre autre par l'insalubrité et la prolifération des eaux stagnantes le plus souvent souillées ou non douces.

Le GLM pour sa part précise que l'association entre la pluie et la hauteur d'eau mensuelles (figure 8) explique bien les consultations mensuelles (tableau 4). La *p-value* calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha = 0,05$, et on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 (absence de relation linéaire significative entre les variables). Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 , alors qu'elle est vraie, est inférieur à 0,01 %. Ce modèle est d'autant plus intéressant que la part de variance expliquée ne vaut qu'environ 33 %. Cependant, une transformation en logarithmique de toutes les variables a permis une bonne amélioration du R^2 qui vaut désormais 0,41. La déviance résiduelle standardisée suit aussi une distribution normale, mieux que dans le modèle n'incluant que les valeurs originales. Le test de Shapiro-Wilk donne une *p-value* calculée supérieure au niveau de signification seuil $\alpha = 0,05$ validant l'hypothèse nulle H_0 (l'échantillon suit une loi normale). Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 , alors qu'elle est vraie, est de 64,1 % (figure 9). Ces coefficients de significativité du modèle amènent à dire que la relation serait plus forte si elle était complétée par l'action de plusieurs autres facteurs environnementaux [35-37], socio-économiques et liés au système de soins...

Discussion et conclusion

L'analyse à partir des variables de divers ordres reposant sur des méthodes et techniques très variées, apporte des éclaircissements sur l'évolution du climat à Saint-Louis. La pluie, qui représente un des paramètres climatiques les plus importants, a diminué nettement à partir de 1970 et se caractérise de nos jours par une légère hausse. Le niveau du fleuve Sénégal, qui dépend essentiellement de la pluviométrie

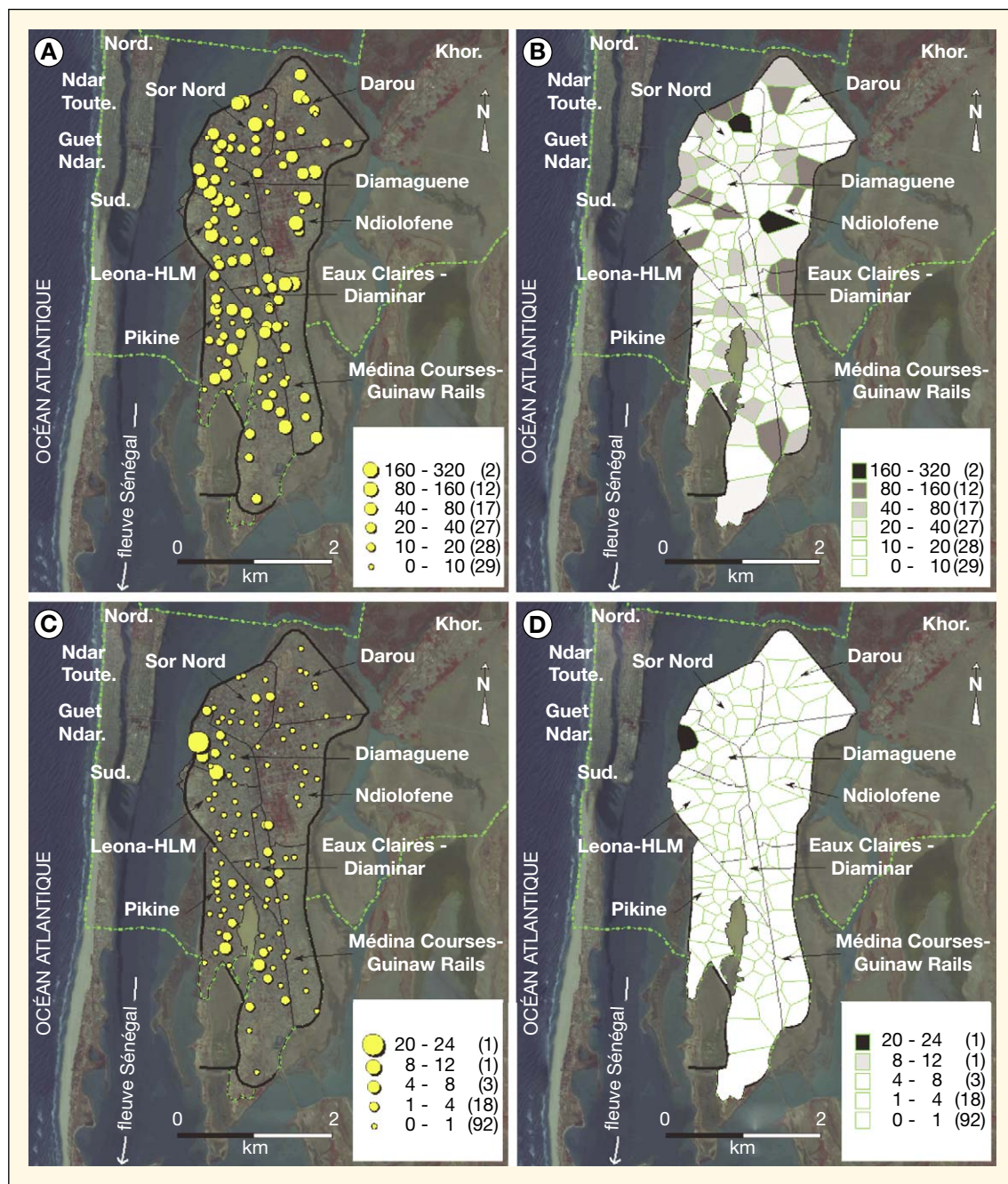


Figure 7. Nombre total de femelles de moustiques récoltées (A et B) et femelles d'*Aedes* (C et D).

Les images B et D ont été obtenues par triangulation de Delaunay (polygone de Thiessen) ; le découpage à l'aide de cette technique permet d'obtenir des polygones irréguliers (appelés polygones de Thiessen ou de Voronoi) qui couvrent entièrement le Sor.

Tableau II. Test de Kruskal-Wallis.

K (valeur observée)	K (valeur critique)	DDL	p-value (bilatérale)	alpha
60,9	16,9	9	< 0,0001	0,05

dans le haut bassin, suit également cette même allure. Sur le plan sanitaire, on note une prolifération de moustiques nuisibles à cause des eaux stagnantes en permanence, mais seulement avec un faible

pourcentage d'anophèles capables de transmettre le paludisme. Cette situation se traduit par les forts volumes d'activités des structures de soins avec le paludisme comme le principal motif de consultations

générales. La modélisation statistique a permis d'étayer l'existence de liens entre l'abondance pluviométrique et le niveau hydrologique d'une part, et d'autre part le nombre de patients observés dans le poste de santé de Sor. La part de variance expliquée par la pluie et la hauteur d'eau dans le fleuve avoisine les 41 %, ce qui constitue un résultat intéressant si on tient compte du rôle d'autres déterminants pouvant entrer en jeu. Parmi ceux-ci, on peut citer, entre autres paramètres climatiques,

Tableau III. Test de Kruskal-Wallis sur les différents échantillons de moustiques.

Différences par paires (différence critique : 37,9)												
		A1		A2		A5		CLX		ADS		
		F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	
A1	F	0	3,4	0,0	3,4	-4,4	0,0	-46,4	-42,9	-22,1	-17,3	
	M	-3,4	0	-3,4	0,0	-7,8	-3,4	-49,8	-46,3	-25,4	-20,7	
A2	F	0,0	3,4	0	3,4	-4,4	0,0	-46,4	-42,9	-22,1	-17,3	
	M	-3,4	0,0	-3,4	0	-7,8	-3,4	-49,8	-46,3	-25,4	-20,7	
A5	F	4,4	7,8	4,4	7,8	0	4,4	-42,0	-38,5	-17,7	-12,9	
	M	0,0	3,4	0,0	3,4	-4,4	0	-46,4	-42,9	-22,1	-17,3	
CLX	F	46,4	49,8	46,4	49,8	42,0	46,4	0	3,5	24,3	29,1	
	M	42,9	46,3	42,9	46,3	38,5	42,9	-3,5	0	20,8	25,6	
ADS	F	22,1	25,4	22,1	25,4	17,7	22,1	-24,3	-20,8	0	4,8	
	M	17,3	20,7	17,3	20,7	12,9	17,3	-29,1	-25,6	-4,8	0	

Différences significatives (niveau de signification corrigé de Bonferroni : 0,001)												
		A1		A2		A5		CLX		ADS		
		F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	
A1	F	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	
	M	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	
A2	F	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	
	M	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	
A5	F	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	
	M	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	
CLX	F	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	
	M	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	
ADS	F	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	
	M	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	

F : femelle ; M : mâle ; A1 : *Anopheles gambiae s.l* (*Anopheles gambiae* et *Arabiensis*) ; A2 : *Anopheles gharaoensis* ; A5 : *Anopheles gufupes* ; CLX : *Culex* ; ADS : *Aedes*.

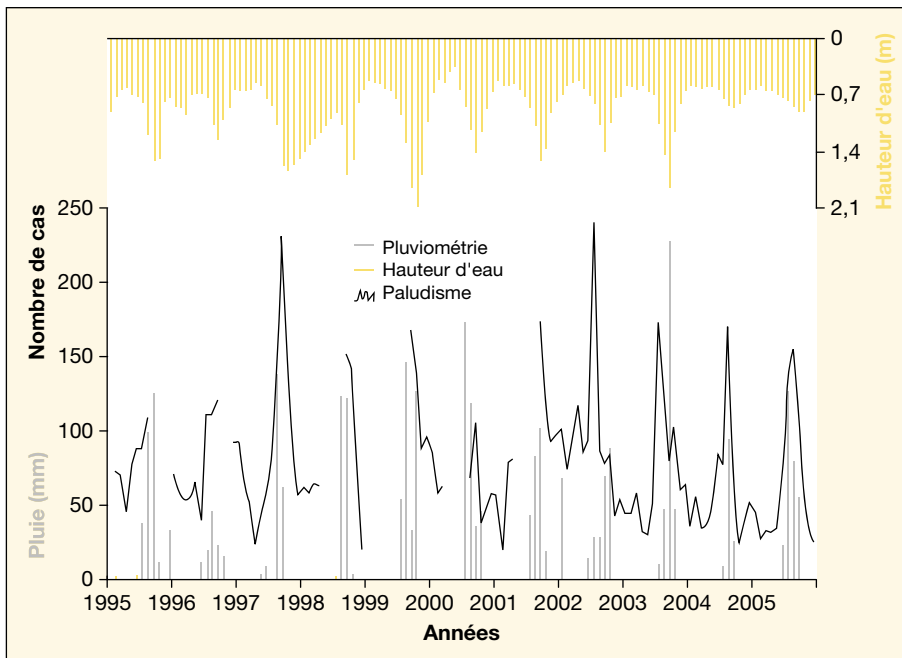


Figure 8. Évolution mensuelle des cas de paludisme (poste de santé de Sor). Trait noir = nombre de cas mensuels de paludisme, bâton gris = pluviométrie mensuelle à la station synoptique de Saint-Louis aéroport, bâton jaune = hauteur d'eau mensuelle à la station hydrologique de Saint-Louis.

la température de l'air et l'humidité relative, auxquels peuvent s'ajouter d'autres données environnementales comme la topographie, la nature du sol...

Cette analyse révèle également toute la difficulté de spécifier les critères d'évaluation des relations entre variabilité hydroclimatique et maladies infectieuses. Même si plusieurs auteurs s'intéressent à cette thématique, le nombre d'études de modélisation qui lient directement le climat aux cas observés de maladies reste encore faible. En effet, la plupart mettent plus en évidence l'action des paramètres climatiques sur l'écologie et la survie des vecteurs. Par exemple, des auteurs ont démontré la sensibilité des moustiques à la température de l'air. Dans nombre de villes sahéliennes, comme c'est le cas de Saint-Louis, l'habitat est spontané et irrégulier dans les quartiers périphériques. Ceux-ci reposent le plus souvent sur des zones *non aedificandi*, accentuant ainsi les problèmes liés au manque de réseau d'assainissement et d'évacuation des eaux pluviales. En saison des pluies, la plupart de ces quartiers se retrouvent les pieds dans l'eau, ce qui

Tableau IV. Modèle linéaire généralisé (paludisme ~ pluviométrie + hauteur d'eau).

Source de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carrés moyens	F	Pr > F
Modèle	2	11,8	5,9	35,6	0,000
Erreur	102	16,8	0,2		***
Total corrigé	104	28,6			
Source	Valeur	Écart type	t de student	Pr > t	
Constante	3,5	0,2	21,9	0,000 ***	
log(pluie + 1)	0,1	0,0	4,8	0,000 ***	
log(hauteur d'eau + 1)	0,9	0,3	3,3	0,002 **	
Source	Borne inférieure (95 %)	Borne supérieure (95 %)		s	0,41
Constante	3,2	3,8			
log(pluie+1)	0,1	0,2		R ²	0,41
log(hauteur d'eau+1)	0,4	1,4		R ² ajusté	0,40
Anova	Degré de liberté	Déviante	Degré de liberté résiduel	Déviante résiduelle	
NUL			104	28,6	
log(pluie+1)	1	10,0	103	18,6	
log(hauteur d'eau+1)	1	1,7	102	16,8	
AIC	113,7				
Interactions	2				

Significativité : 0 ; ***p = 0,001 ; **p = 0,01 ; *p = 0,05 ; .p = 0,1 ; p : 1.

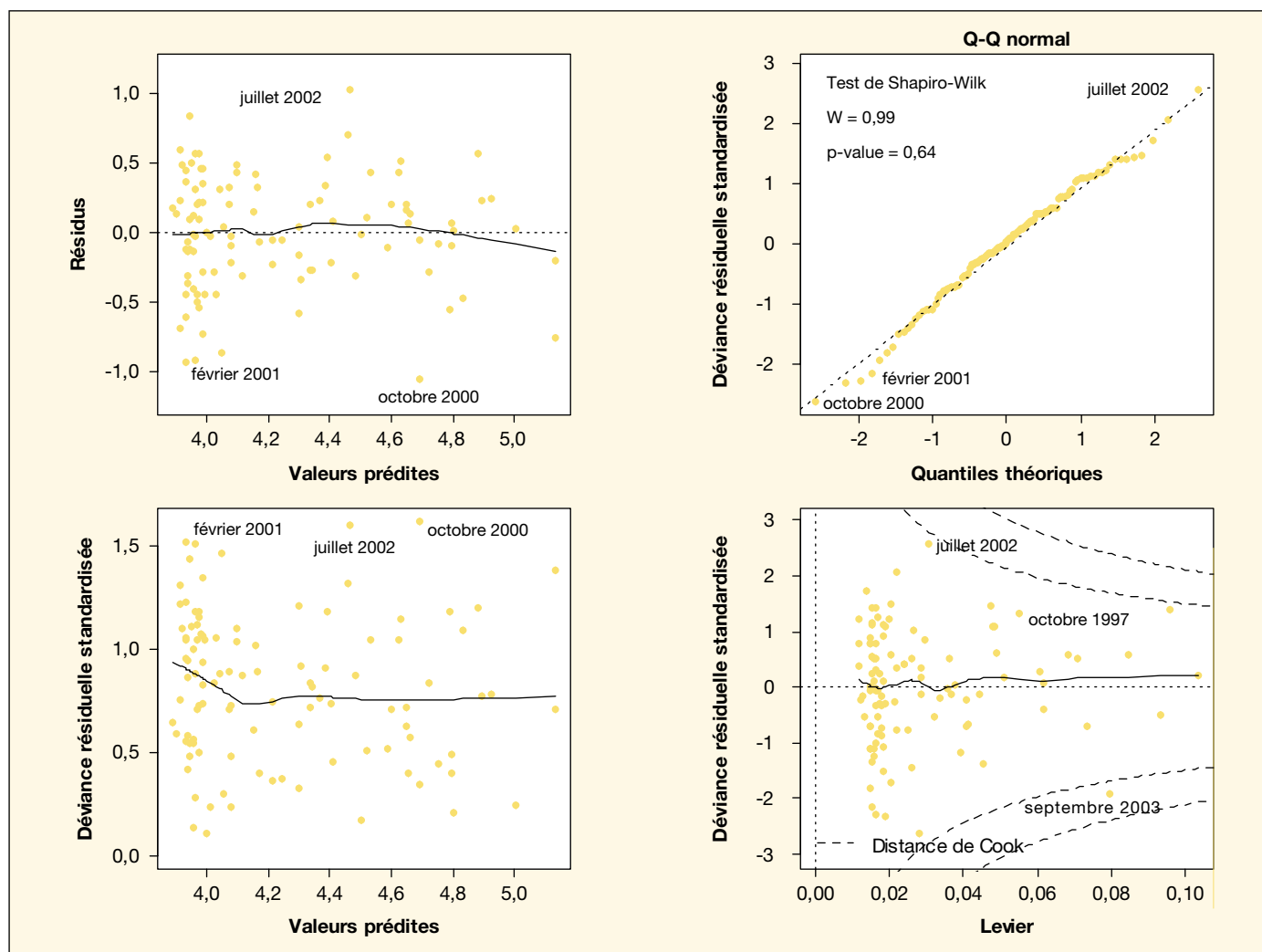


Figure 9. Diagnostic du modèle linéaire généralisé (paludisme ~ pluviométrie + hauteur d'eau).

peut être le plus souvent synonyme de déclenchement ou de propagation de maladies d'origine hydrique. Sur le plan sanitaire de base, un souci de taille peut se situer au niveau du manque de diagnostic systématique fiable en termes de santé publique. Dès lors, beaucoup de pathologies qui sont mal soignées peuvent créer des résistances de parasites aux médicaments. Par exemple, pour le cas du paludisme, le fait de privilégier l'approche syndromique, fondée essentiellement sur des signes cliniques, pour diagnostiquer cette maladie dans la santé communautaire de base, risque à la longue de créer beaucoup de difficultés. En plus de cela, un grand volet de sensibilisation des populations doit s'effectuer pour réduire le risque. L'originalité de notre approche réside dans son caractère multidisciplinaire. Par ailleurs en dehors des facteurs climatiques et des statistiques sanitaires et entomologiques, une grande attention doit être portée à la morbidité ressentie, pour réduire la confusion sur les manifestations de certaines pathologies. En fait, certains patients ne maîtrisent pas totalement les symptômes de certaines maladies. Ensuite, il peut exister parfois un décalage entre ce que ressent le malade, ce qu'il déclare, et, finalement, le diagnostic du technicien de santé. Pour illustration, on peut citer le paludisme dans sa phase la plus grave – on parle alors d'accès pernicieux. La personne touchée est victime de crises convulsives qui, dans la société traditionnelle africaine, seront le plus souvent assimilées à des possessions mystiques et surnaturelles plutôt qu'à un paludisme grave. En plus, seul le recours systématique à la goutte épaisse et au frottis sanguin peut permettre d'avoir de statistiques précises sur la prévalence réelle du paludisme, surtout en milieu urbain. ■

Remerciements

À Jean François Trape et Cheikh Sokhna (UMR 198 paludologie afrotropicale, IRD-Dakar) pour l'accueil au laboratoire et les analyses en parasitologie ; à Lassana Konaté et Malick Faye (laboratoire d'écologie vectorielle, faculté des sciences, UCAD-Dakar) pour la capture et la détermination des moustiques à Saint-Louis ; à *Espoir Pour la Santé* à Saint-Louis et à toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Références

1. Fontaine B, Janicot S. Sea surface temperature fields associated with West African rainfall anomaly types. *J Clim* 1996 ; 9 : 2935-40.

2. Diedhiou A, Janicot S, Viltard A, de Felice P, Laurent H. Easterly wave regimes and associated convection over West Africa and the tropical Atlantic: results from NCEP/NCAR and CEPMMT reanalyses. *Clim Dyn* 1999 ; 15 : 795-822.

3. Servat E, Paturel JE, Lubès-Niel H, Kouamé B, Travaglio M, Mariéu B. Variabilité des écoulements en Afrique tropicale humide. *CR Acad Sci* 1997 ; 325 : 679-82.

4. Paturel JE, Servat E, Lubès H, Delattre MO. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrol Sci J* 1998 ; 43 : 937-46.

5. Mahé G, L'Hôte Y, Olivry JC, Wotling G. Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa, 1951-1989. *Hydrol Sci J* 2001 ; 46 : 211-26.

6. L'Hôte Y, Mahé G, Somé B, Triboulet JP. Analysis of a sahelian annual rainfall index updated from 1896 to 2000; the drought still goes on. *Hydrol Sci J/J Sci Hydrol* 2002 ; 47 : 563-72.

7. Lamb PJ. Persistence of Sub-Saharan drought. *Nature* 1982 ; 299 : 46-8.

8. Eltahir EAB, Gong C. Dynamics of wet and dry years in West Africa. *J Clim* 1996 ; 9 : 1030-42.

9. Balme M, Lebel T, Amani A. Dry years and wet years in the Sahel: quo vadimus? *Hydrol Sci J* 2006 ; 51 : 254-71.

10. Dai A, Lamb PJ, Trenberth KE, Hulme M, Jones PD, Xie P. The recent Sahel drought is real. *Int J Climatol* 2004 ; 24 : 1323-31.

11. Mbaye M, Sagna P. Analyse de la vulnérabilité des sociétés aux variations climatiques : l'exemple du faubourg de SOR à Saint-Louis (Sénégal). In : Beltrando G, Madelin M, Quénel H, eds. *Les risques liés au temps et au climat*. Colloque AIC, Epernay, 2006.

12. D'Ercole R. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyses. *Rev Geogr Alp* 1994 ; 4 : 87-96.

13. Wisner B, Blaikie P, Cannon T, Davis I. *At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. London : Routledge, 2004.

14. Baudon D, Louis FJ, Martet G. En Afrique, le paludisme urbain est le paludisme de demain. *Med Trop* 1996 ; 56 : 323-5.

15. Besancenot JP, Handschumacher P, Ndione JA, Mbaye I, Laïdi K. Climat, eau et santé au Sahel ouest-africain. *Sécheresse* 2004 ; 15 : 233-41.

16. Martens WJM, Jetten TH, Rotmans J. Climate change and vector-borne diseases: a global modelling perspective. *Glob Environ Change* 1995 ; 5 : 195-209.

17. Bouma MJ, Dye C, Van der Kaay HJ. Falciparum malaria and climate change in the North West Frontier Province of Pakistan. *Am J Trop Med Hyg* 1996 ; 55 : 131-7.

18. Constantin De Magny G, Guégan JF, Petit M, Cazelles B. Regional-scale climate-variability synchrony of cholera epidemics in West Africa. *BMC Infect Dis* 2007 ; 7 : 20.

19. Craig MH, Snow RW, Le Sueur D. A climate-based distribution model of malaria transmission in Sub-Saharan Africa. *Parasitol Today* 1999 ; 15 : 105-11.

20. Mbaye M. L'apport de l'imagerie satellitaire et des Systèmes d'information géographique (SIG) dans l'évaluation des contraintes hydrologiques à Saint-Louis du Sénégal, in Spatialisation et cartographie en hydrologie. *Rev Mosella* 2004 ; 29 : 167-80.

21. Lubès H, Masson JM, Servat E, Paturel JE, Kouamé B, Boyer JF. *Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques-étude bibliographique*. Montpellier : Orstom éditions, 1994.

22. Bourbonnais R, Terraza M. *Analyse des séries temporelles en économie, applications à l'économie et la gestion*. 2^e édition. Paris : Dunod, 2008.

23. Petrarca V, Vercryste J, Colluzzi M. Observation on the anopheles gambiae complex in the Senegal river basin. *West Africa. Med Vet Entomol* 1987 ; 1 : 303-12.

24. Carrara G, Petrarca V, Niang M, Colluzzi M. Anopheles pharoensis and transmission of plasmodium falciparum in the Senegal river delta, West Africa. *Med Vet Entomol* 1990 ; 4 : 421-4.

25. Saporta G. *Probabilités, analyse des données et statistique*. Paris : Technip, 2006.

26. Diallo S, Ndir O, Diop BM, et al. Le paludisme dans le district sanitaire sud de Dakar (Sénégal). 1. Parasitisme et accès paludéens. *Bull Soc Pathol Exot Filiales* 1998 ; 91 : 208-13.

27. Diallo S, Konate L, Faye O, et al. Le paludisme dans le district sanitaire sud de Dakar (Sénégal). 2. Données entomologiques, parasitologiques et cliniques. *Santé* 2000 ; 10 : 221-9.

28. Organisation mondiale de la santé (OMS). Entomologie du paludisme et contrôle des vecteurs. *Guide du stagiaire*. Genève : OMS, 2003.

29. Pages F, Orlandi-Pradines E, Corbel V. Vecteurs du paludisme : biologie, diversité, contrôle et protection individuelle. *Med Mal Infect* 2007 ; 37 : 153-61.

30. Meylan P, Musy A. *Hydrologie fréquentielle*. Bucarest : H*G*A, 1999.

31. Chastel C. Réflexions sur deux viroses d'actualité : la fièvre jaune et la dengue. *Ann Biol Clin (Paris)* 1997 ; 55 : 415-24.

32. Thonnon J, Fontenille D, Tall A, et al. Re-emergence of yellow fever in Senegal in 1995. *Am J Trop Med Hyg* 1998 ; 59 : 108-14.

33. Mutebi JP, Barrett ADT. The epidemiology of yellow fever in Africa. *Microbes Infect* 2002 ; 4 : 1459-68.

34. Baudon D, Gazin P, Galaup B, Pelletier-Guinart E, Pica JJ. Fiabilité de l'examen clinique dans le diagnostic des fièvres palustres en zone d'endémie ouest-africaine. *Med Trop* 1988 ; 48 : 123-6.

35. Mouchet J, Carnevale P. Impact des transformations de l'environnement sur les maladies à transmission vectorielle. *Santé* 1997 ; 7 : 263-9.

36. Bourée P. Aspects actuels du paludisme. *Rev Francophone Lab* 2006 ; 385 : 25-38.

37. Guégan JF, Prugnolle F, Thomas F. Global spatial patterns of infectious diseases and human evolution. In : Stearns SC, Koella J, eds. *Evolution in Health and Disease*. Oxford (U.K) : Oxford University Press, 2007.