

CONTACTS MARA/ARMA

AFRIQUE AUSTRALE • CENTRE DE COORDINATION

David LeSueur • *Chercheur principal*
Marlies Craig • *Coordonnatrice SIG & chercheur principal* • craigm@mrc.ac.za
Colleen Fraser • *Responsable gestion des données* • fraser@mrc.ac.za
Brian Sharp • *Chercheur associé & Highland Malaria Project* • sharpb@mrc.ac.za
Carrin Martin • *Appui administratif* • martinc@mrc.ac.za
South African Medical Research Council • 771 Umbilo Road • P.O. Box 17120 • Congella • Durban 4013 •
South Africa • Tel : +27-31-2043600 • Fax : +27-31-2051498 / 2043601

AFRIQUE ORIENTALE

Bob Snow • *Chercheur associé* • bobsnow@wtrl.or.ke
Judy Omumbo • *Coordonnateur collecte des données* • judy@wtrl.or.ke
KEMRI / Wellcome Trust Collaborative Program • P.O. Box 43640 • Nairobi • Kenya •
Tel : +254-2-725398 • Fax : +254-2-711673
Don de Savigny • *Chercheur associé* • desavigny.tehip@twiga.com
Rose Lusinde • *Coordonnateur collecte des données*
Tanzania Essential Health Interventions Project (TEHIP) and International Development Research Center (IDRC)
• PO Box 78487 • Dar es Salaam • Tanzania • Tel : +255-51-130672 • Fax : +255-51-112068

AFRIQUE CENTRALE

Pierre Lemardeley • *Chercheur associé* • oceac@camnet.cm
Etienne Fondjo • *Coordonnateur collecte des données* • cht@cam.healthnet.org
Organisation de Coordination pour la lutte Contre les Endémies en Afrique Centrale (OCEAC) •
B.P. 288 • Yaoundé • Cameroun • Tel : +237-23 2232 / 7786 • Fax : +237-23 0061

AFRIQUE OCCIDENTALE ANGLOPHONE

Fred Binka • *Chercheur associé* • fbinka@africaonline.com.gh
Martin Adjuk • *Coordonnateur collecte des données* • navrongo@gha2.healthnet.org
Navrongo Health Research Centre • P.O. Box 114 • Navrongo UER • Ghana •
Tel/Fax (Navrongo) +233-72-3425 • Tel/Fax : (Accra) +233-21-666005

AFRIQUE OCCIDENTALE FRANCOPHONE

Yéya Tiémoko Touré • *Chercheur associé* • yeya@mrtcbko.malinet.ml
Magaran Bagayoko • *Coordonnateur collecte des données* • magaran@mrtcbko.malinet.ml
Faculté de Médecine de Pharmacie et d'Odonto-Stomatologie • Université du Mali • B.P. 1805 •
Bamako • Mali • Tel : +223-22-5277 • Fax : +223-22-9879 / 8109
Thomas Teuscher • *Chercheur associé* • t.teuscher@cgiar.org
Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest (ADRAO/WARDA) • B.P. 2551 •
Bouaké 01 • Côte d'Ivoire • Tel : +225-634514 • Fax : +225-634714

CENTRE D'APPUI

Christian Lengeler • *Chercheur associé* • lengeler@ubaclu.unibas.ch
Institut Tropical Suisse • Case Postale • 4002 Bâle • Suisse • Tel : +41-61-2848221 • Fax : +41-61-2717951

HIGHLANDS MALARIA PROJECT

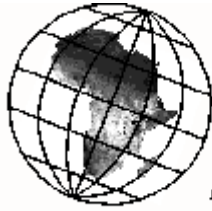
Brian Sharp (voir Afrique Australe)
Jonathan Cox • *Chercheur associé* • jonathan.cox@lshtm.ac.uk
London School of Hygiene and Tropical Medicine • Keppel Str. • London WC1E 7HT • UK
Tel : +44-171-9272617 • Fax : +44-171-5809075

SPECIALISTES

Maureen Coetzee • *Entomologiste* • entosafr@global.co.za
South African Institute for Medical Research • PO Box 1038 • Johannesburg • 2000 • South Africa
Tel : +27-11-4899000
Uwe Deichmann • *Démographie / Statistique spatiale* • deichmann@un.org / uwed@worldnet.att.net
Imo Kleinschmid • *Appui statistique* • kleinschmidt1@med.und.ac.za
Eleanor Gouws • *Appui statistique* • gouws@med.und.ac.za
South African Medical Research Council • voir Afrique Australe

MARA

Mapping Malaria Risk in Africa



ARMA

Atlas du Risque de la Malaria en Afrique

Vers un Atlas du Risque de la Malaria en Afrique

Premier rapport technique
de la collaboration MARA/ARMA

MARA /ARMA, Durban, 1998

Ont contribué à la présente étude (par ordre alphabétique) :

Martin Adjuik, Magaran Bagayoko, Fred Binka, Maureen Coetzee, Jonathan Cox, Marlies Craig,
Uwe Deichman, Don de Savigny, Etienne Fondjo, Colleen Fraser, Eleanor Gouws, Immo
Kleinschmidt, Pierre Lemardeley, Christian Lengeler, Dave le Sueur, Judy Omumbo, Bob Snow,
Brian Sharp, Frank Tanser, Thomas Teuscher, Yéya Touré

Le travail de la collaboration MARA/ARMA a été jusqu'à présent soutenu essentiellement par le Centre de
Recherches pour le Développement International (CRDI) du Canada, le South African Medical Research Council
(SAMRC), Institut Tropical Suisse et le Wellcome Trust, Royaume Uni.

Publié en 1999
par la collaboration MARA/ARMA
Centre de coordination MARA/ARMA :
Medical Research Council, 771 Umbilo Road, Congella, Durban, Afrique du Sud

©MARA/ARMA (Mapping Malaria Risk in Africa / Atlas du Risque de la Malaria en Afrique)

Présentation, graphiques et couverture en Corel Office Suite v8 :
Marlies Craig

Reproduction / impression et reliure :
Hirt & Carter / Rob Print, 1 Intersite Avenue, Umgeni Park, Durban, Afrique du Sud.

Traduction française :

Centre de documentation ADRAO et Consortium bas-fonds, Bouaké, Côte d'Ivoire.

Tous droits réservés. Toute reproduction d'un extrait quelconque de ce rapport par quelque procédé mécanique ou électronique que ce soit, et notamment par photocopie ou microfilm, faite sans l'autorisation écrite des éditeurs, est illicite.

Couverture : Infection de globules rouges par *Plasmodium falciparum*,
moustiques (*Anopheles arabiensis*),
et enfants à l'hôpital Edendale (Afrique du Sud).



Préface

C'est avec un très grand plaisir que je préface ce premier rapport technique du projet MARA /ARMA (Mapping Malaria Risk in Africa / Atlas du Risque de la Malaria en Afrique). Ce plaisir, on le comprendra, je le dois à deux raisons essentielles : d'abord, le projet MARA /ARMA est un exemple de collaboration et de coopération africaine, à l'échelle continentale, avec la création et le fonctionnement d'un réseau de chercheurs africains. Ceci constitue une preuve qu'ensemble en Afrique, avec la contribution de nos compétences locales, nous pouvons réaliser des progrès considérables et faire reculer la maladie. Ensuite, le projet MARA /ARMA a su saisir les opportunités qu'offrent les nouvelles technologies comme le "Geographical Information System" (système d'information géographique, SIG), pour concevoir et réaliser un produit, qui sera de toute première importance dans la surveillance épidémiologique du paludisme en Afrique. Ce premier rapport technique en est une illustration.

Au moment où la lutte contre le paludisme reprend de l'intérêt au sein de la communauté internationale et où se concrétisent des travaux significatifs, tels que "l'Initiative Africaine pour la lutte contre le paludisme au 21^{ème} siècle" et le "Roll Back Malaria", je voudrais féliciter les auteurs et tous ceux qui sont impliqués dans ce projet, pour le travail accompli.

En effet, le résultat final que sont entre autres les cartes détaillées sur l'endémicité du paludisme et surtout la cartographie des zones à potentiel épidémique a nécessité la collecte d'une masse très importante d'informations sur le terrain. Il n'est pas toujours facile de retrouver ces informations. Les produits du projet MARA /ARMA permettront de mieux connaître la distribution du paludisme en Afrique, dans un pays, dans une région. En cela, ils sont de formidables outils de planification et de gestion des programmes antipaludiques.

Au delà de la cartographie, les lecteurs trouveront en ce premier rapport technique, la description d'une base de données climatologiques et épidémiologiques unique, utilisable par les planificateurs des programmes de santé, les épidémiologistes, les médecins et les chercheurs, entre autres. Mieux encore, les modèles statistiques développés sur la transmission du paludisme permettront aux utilisateurs, de pouvoir prévoir, avec un minimum d'informations, la dynamique de la transmission du paludisme dans une zone donnée et ainsi anticiper les mesures à prendre.

Il reste à espérer que le travail qui a débuté soit conduit à son terme, et surtout que tous les programmes nationaux de lutte contre le paludisme en fassent la meilleure utilisation possible.

Dr Ebrahim M. Samba
Directeur Régional de l'OMS pour l'Afrique



Remerciements

Pendant les deux premières années de son existence, l'initiative MARA/ARMA a été financée essentiellement par le Centre de Recherche pour le Développement International (CRDI) du Canada. Des ressources complémentaires ont été fournies par le South African Medical Research Council (SAMRC), le Wellcome Trust du Royaume Uni, l'Institut Tropical Suisse, et le Programme Spécial PNUD/Banque Mondiale/OMS pour la recherche et la formation sur les maladies tropicales (TDR).

L'élaboration et la publication de ce document ont été financées par le South African Medical Research Council (SAMRC). La traduction française a été réalisée par le Centre de documentation ADRAO, Bouaké, Côte d'Ivoire, avec l'appui du Consortium bas-fonds, sous la responsabilité de Thomas Teuscher et Christian Lengeler.

Récemment, la collaboration MARA/ARMA a reçu un don de la part de la "Multilateral Initiative on Malaria" (MIM).

Nos sincères remerciements vont à Colleen Fraser pour sa grande contribution dans le maintien de la base de données MARA/ARMA, et à Carrin Martin pour son soutien logistique.

Beaucoup de personnes ont contribué au succès de MARA/ARMA en fournissant des données ou en localisant des informations. La liste de ces personnes est donnée dans l'annexe 3.

Ce rapport technique constitue le premier document publié par la collaboration MARA/ARMA. Son but est de donner à la fois un aperçu des activités en cours, et de présenter les premiers résultats. Malgré les précautions prises lors de la préparation de ce document, puis lors de sa traduction, il est possible que des erreurs se soient glissées dans le texte. Nous apprécierons vos commentaires sur ce document et sur la collaboration MARA/ARMA en général. Le plus simple est d'utiliser le questionnaire détachable en fin de document. Les remarques et commentaires de responsables de programme de lutte et de chercheurs sont particulièrement bienvenus.

Ce document existe aussi en anglais.

Tout au long de ce document, les termes "malaria" et "paludisme" sont utilisés indifféremment.

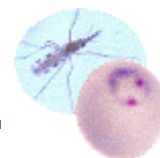


Table des matières

Préface	v	Chapitre 3. Activité B : Modélisation	
Remerciements	vi	Pourquoi modéliser ?	11
Table des matières	vii	Que faut-il modéliser ?	11
Liste des abréviations	viii	Comment modéliser ?	12
Glossaire	viii	Que savons-nous ?	12
Avant-propos	x	Modèle de répartition du paludisme	13
Résumé	xii	Définir la répartition du paludisme	13
Executive Summary (English)	xiii	Que nous indique le modèle ?	17
Chapitre 1. PRÉSENTATION DE MARA / ARMA		Estimation des populations à risque	17
Introduction	1	Caractère saisonnier	18
Le problème du paludisme	1	Durées de transmission	18
Des espoirs pour lutter contre le		Paludisme aux limites de la transmission	21
Paludisme	1	Modèles statistiques	22
Cartographie du paludisme	2	Kenya	22
La nécessité des cartes	2	Mali	23
Cartographie : Passé et future	2	Acquis des modèles régionaux	24
La collaboration internationale MARA/ARMA	3	Chapitre 4. Projets apparentés	
Un double effort de recherche	3	Paludisme des régions d'altitude	25
A Collecte de données	3	Pourquoi le paludisme des régions d'Altitude	
B Modélisation	4	est-il important ?	25
Produits	4	Qu'est-ce que HIMAL ?	25
Objectifs	5	Collecte des données sur le vecteur	26
Chapitre 2. Activité A : Collecte de données		Chapitre 5. Conclusions et perspectives	
Quelles données ?	5	Produits MARA/ARMA à l'intention des	
Incidence de la maladie	5	Responsables de programmes de lutte contre	
Taux d'inoculation entomologique	6	la paludisme	28
Prévalence parasitaire	6	Produits MARA/ARMA à l'intention des chercheurs sur	
Cartes historiques du paludisme	7	le paludisme	28
Collecte des données	7	Le chemin restant à parcourir	28
Comment les données sont-elles		Références bibliographiques	29
Collectées ?	7	Annexe 1. Publications MARA/ARMA	32
Géoréférencement des données	9	Annexe 2. Groupes de données sur l'Environnement	33
Stratégie de recherche et sources de Données	9	QUESTIONNAIRE	35
		Personnes ayant contribué à	
		MARA/ARMA	verso de la page de couverture

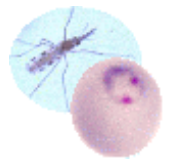


Liste des abréviations

ARMA	Atlas du Risque de la Malaria en Afrique	NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
CRDI	Centre de Recherche pour le Développement International	OMS	Organisation Mondiale de la Santé
HIMAL	Highlands Malaria Project	ONG	Organisation Non Gouvernementale
MARA	Mapping Malaria Risk in Africa	PP	Prévalence parasitaire
MII	Moustiquaire Imprégnée d'Insecticide	RBM	Roll Back Malaria
MIM	Multilateral Initiative on Malaria	SIG	Système d'Information Géographique
MRC	Medical Research Council	TDR	Research and Training in Tropical Diseases
MS	Ministère de la Santé	TIE	Taux d'Inoculation Entomologique.
		TP	Taux de Prévalence

Glossaire

Cycle sporogonique	période de développement sexuel / d'incubation du parasite du paludisme chez le moustique ; temps nécessaire pour qu'un moustique devienne infectant après s'être nourri sur un sujet infecté.
"Complexe" d'espèces	groupe d'espèces qui sont partiellement ou complètement identiques en apparence (morphologiquement), mais qui diffèrent génétiquement.
"Fuzzy logic"	un système logique qui est une extension de la logique booléenne, dans lequel des fractions entre zéro (non) et un (oui) expriment le degré d'existence d'un phénomène.
Géoréférences	coordonnées géographiques d'un point sur la terre (longitude et latitude).
Incidence	nombre de nouveaux cas (de maladie clinique ou de parasitémie) enregistrés pendant une certaine période de temps au sein d'une population définie
Logique booléenne	système logique reposant sur une situation oui/non ou un/zéro ; il comporte des concepts tels que "l'intersection" (1) et "l'union" (c) de groupes de données, et inclut des arguments logiques tels que <i>a</i> ET <i>b</i> , <i>a</i> NON <i>b</i> , <i>a</i> OU <i>b</i> .
NDVI	<i>normalized difference vegetation index</i> : un index dérivé de la télédétection et qui mesure la réflectivité de la végétation.
Paludisme endémique	transmission et incidence mesurable chaque année.
Paludisme épidémique	manifestation occasionnelle de paludisme dans des régions où le paludisme n'existe pas normalement ; ou une occurrence ponctuelle de paludisme particulièrement grave dans une zone à faible risque.
Paludisme instable	voir "paludisme épidémique".



Paludisme stable	voir "paludisme endémique".
Parasitémie	présence des parasites dans le sang ; nombre de parasites par unité de sang.
Point de données	un groupe de résultats dans la base de données MARA/ARMA, unique dans le temps, l'origine, la localité et la méthodologie ; il ne peut être subdivisé qu'en différents groupes d'âges.
Prévalence	pourcentage de la population positif pour le paludisme dans une étude .
SIG	Système d'information géographique : programme informatique qui combine des données spatiales et descriptives ("attributs") pour la cartographie et l'analyse spatiale.
Taux d'infection	nombre d'infections acquises pendant une période donnée.
TIE	taux d'inoculation entomologique : nombre de piqûres infectantes de moustiques auxquelles une personne est exposée pendant un temps donné (d'habitude un an)
Transmission	propagation du paludisme par un cycle complet de transmission (être humain - moustique - être humain).
Zones de données	données SIG sous forme de grille, couvrant une zone de la terre, dans laquelle chaque cellule contient une valeur donnée pour l'attribut choisi.



Avant-propos

Jusqu'à présent, beaucoup des utilisateurs des SIG ont rencontré un certain scepticisme quant à l'importance de cet outil pour la recherche et les interventions dans le domaine de la santé. L'importance des SIG en matière de santé ne sera pas discutée dans le présent document. Il est toutefois utile de rappeler que la collaboration MARA/ARMA a été confrontée, elle aussi, à ce scepticisme vis à vis de la pertinence de l'approche choisie, de sa faisabilité, de son coût et de son efficacité. Tous nos remerciements vont au Centre de Recherche pour le Développement International (CRDI) du Canada, et surtout au Dr. Don de Savigny, pour sa volonté d'investir dans ce que beaucoup considéraient comme un projet à haut risque. Le présent rapport reflète les résultats de cette collaboration, qui a été soutenue par le financement initial de 200 000 \$ du CRDI, ainsi que par des financements complémentaires du South African Medical Research Council (SAMRC) et du Wellcome Trust (Royaume Uni).

Les efforts en matière de SIG du Programme National de Recherche sur la Malaria du SAMRC ont commencé en 1989, avec un financement modeste qui avait pour objectif de cartographier le risque de paludisme en Afrique du Sud, afin de permettre des opérations de contrôle plus ciblées. Avec l'appui inconditionnel du chef du programme, le Dr. Brian Sharp, la division a développé une solide expertise en SIG et en gestion de bases de données. C'est cette expertise qu'a reconnue le Dr. de Savigny lors de la réunion sur l'utilisation des SIG pour la santé et l'environnement, qui s'est tenue au Sri Lanka en 1994 avec l'appui du CRDI (de Savigny et Wijeyaratne, 1995). Des discussions ultérieures entre le Dr. de Savigny et le Dr. Snow sur l'intérêt d'une initiative de type MARA/ARMA ont débouché sur deux petits ateliers financés respectivement par le Groupe d'action sur les moustiquaires imprégnées d'insecticide (MII) du programme TDR et par le CRDI. L'ébauche du protocole de la collaboration fut élaboré lors du premier atelier, regroupant Fred Binka, Bob Snow, Christian Lengeler et moi-même. Le second atelier, pendant lequel le protocole a été mieux mis au point, regroupait un plus grand nombre de participants, 15 au total, et était constitué d'entomologistes, d'épidémiologistes et de géographes.

MARA/ARMA doit son développement et ses succès ultérieurs à l'engagement des chercheurs associés et des coordonnateurs de la collecte des données au niveau des centres régionaux. Qu'il me soit permis ici de mentionner spécialement le dynamisme qu'ont donné le Dr. Snow lors de l'élaboration de la fiche de saisie des données, et Mme Colleen Fraser pour les programmes de saisie. Ce fut une première étape très importante pour le fonctionnement de la collaboration et sa standardisation. Les autres étapes importantes furent la recherche de données de base numériques, et la formation du personnel régional à Durban. Beaucoup d'autres personnes méritent des remerciements, mais j'aimerais mentionner spécialement le nom de Marlies Craig qui a fait preuve d'une capacité remarquable pour l'acquisition des compétences nécessaires à la maîtrise du SIG, et de Carrin Martin pour l'efficacité de son soutien logistique. Ce fut pour moi un privilège de travailler avec des chercheurs Africains de la qualité des coordonnateurs et chercheurs associés des différentes régions de la collaboration MARA/ARMA.

Je pense que MARA/ARMA et ce premier produit constituent un bon exemple de la façon dont les SIG peuvent être utilisés dans le domaine de la santé, de manière efficace et à faible coût. MARA/ARMA constitue aussi un exemple remarquable de collaboration en réseau. L'approche MARA/ARMA contient tous les éléments essentiels pour une compréhension des facteurs déterminants du paludisme et de leurs distributions spatiales.

L'avenir de la collaboration MARA/ARMA est maintenant garanti grâce au récent crédit octroyé par la Multilateral Initiative for Malaria (MIM) et le cofinancement du module "Highlands malaria" par le Groupe d'Action du TDR pour la Santé et l'Environnement. La récente décision du programme "Roll Back Malaria" (RBM) de financer les



activités d'une personne au centre de coordination de Durban pour soutenir les activités RBM est également un signe de reconnaissance envers notre initiative. Le défi majeur qui attend maintenant la collaboration est la diffusion des produits existants et futurs, et la diffusion des SIG, afin de soutenir de manière significative les nouvelles initiatives de lutte contre le paludisme, telles que MIM et RBM. Dans le domaine de la recherche, MARA/ARMA devra dans le futur travailler de façon plus étroite avec des climatologues, afin de permettre une meilleure compréhension du paludisme instable et de son contrôle.

En conclusion, l'utilisation des SIG pour la recherche médicale est un domaine de recherche nouveau, qui n'a probablement que peu d'intérêt pour certaines maladies, mais qui va certainement se révéler capitale dans le cas des maladies transmises par vecteurs, comme le paludisme.

David LeSueur
Chercheur Principal
Collaboration MARA/ARMA



Résumé

Sur le plan international, la santé d'un habitant de l'Afrique sub-saharienne est actuellement la plus mauvaise dans le monde. Sur ce continent, le paludisme est actuellement la principale cause de morbidité et de mortalité, avec un million de décès et 300 à 500 millions de cas cliniques par an. Le contrôle de cette maladie connaît actuellement un regain d'intérêt après des années d'inaction. Malheureusement cela arrive dans un contexte caractérisé par l'absence de mesures préventives, la faiblesse des systèmes de santé en place, et des taux élevés de résistance du parasite aux médicaments courants. La planification et l'exécution du contrôle du paludisme à une large échelle demandent bien sûr des outils et des stratégies de lutte efficaces, mais aussi des statistiques fiables sur (1) la distribution du paludisme endémique et épidémique et (2) les populations à risque pour chaque niveau d'endémicité.

La distribution et l'intensité de la transmission du paludisme sont loin d'être homogènes en Afrique. On trouve en Afrique un large spectre de situations épidémiologiques, du paludisme pérenne de haute intensité au paludisme instable épidémique. Cela est important pour la planification, la hiérarchisation et l'implantation des activités de lutte aux niveaux continental, national et local. Malgré l'importance de ces aspects géographiques notre compréhension actuelle de la distribution (où ?), des déterminants (pourquoi ?), de la quantification (combien ?) et de la saisonnalité (quand ?) de l'endémicité palustre est très imparfaite.

L'objectif principal de la collaboration Mapping Malaria Risk in Africa / Atlas du Risque de la Malaria en Afrique (MARA /ARMA) est d'établir une base de données à l'échelle continentale sur la distribution du risque de paludisme. Deux approches principales sont utilisées pour atteindre cet objectif.

A. Une collecte aussi complète que possible des données paludométriques existant sur le continent, dans 44 pays. Chaque point est situé géographiquement de manière précise.

Les sources utilisées sont les publications scientifiques, les thèses universitaires, les rapports des ministères et les documents produits par des organisations de recherche ou de développement. Les données de prévalence parasitologique sont de loin les données les plus largement disponibles et la collaboration MARA /ARMA s'est concentrée sur ces dernières. Toutefois, d'autres données telles que des données de transmission entomologique, et les taux de parasitémie chez les nourrissons sont aussi collectées. Les données sur l'incidence des cas de paludisme provenant des statistiques courantes des ministères de la santé n'ont été collectées que dans un petit nombre de pays, là où ces statistiques sont réputées fiables. Afin de conduire ce large exercice de collecte, la collaboration MARA /ARMA a établi cinq centres régionaux (et deux centres annexes) avec dans chacun de ces centres un agent employé à plein temps. Ces centres ont été équipés avec des systèmes d'information géographiques (SIG) et les agents ont été formés à leur utilisation.

B. La deuxième approche repose sur une modélisation des facteurs climatiques visant surtout à compléter/suppléer la collecte des données paludométriques dans les zones où ces données ne sont pas disponibles.

La distribution du paludisme, sa saisonnalité et l'intensité de la transmission ont ainsi pu être analysées à diverses échelles géographiques. Ceci a permis de se faire rapidement une première idée de l'épidémiologie du paludisme à l'échelle nationale et continentale.



Ces deux approches sont complémentaires et les données paludométriques ont été utilisées pour valider le modèle climatique dans quelques pays. Les cartes ont été combinées avec d'autres données (démographiques et administratives) pour produire des cartes intégrées, utilisables dans le cadre des activités de lutte à divers échelles, aussi bien par les planificateurs que les chercheurs ou les bailleurs de fonds.

MARA /ARMA est un exemple unique de collaboration panafricaine entre des chercheurs et des responsables des programmes de contrôle. Les premiers produits de cette collaboration commencent à être diffusés. Les cartes paludométriques vont ainsi fournir aux programmes de contrôle gouvernementaux, aux bailleurs de fonds ainsi qu'aux agences internationales, une base de données utilisable pour une planification plus rationnelle des ressources et des activités. Deux projets additionnels, sur le paludisme d'altitude ("Highland Malaria") et sur la cartographie des anophèles vecteurs, sont aussi rattachés à la collaboration MARA /ARMA.

Grâce à une collaboration plus étroite entre les chercheurs et les programme de contrôle, l'expérience accumulée servira à soutenir les efforts en cours pour lutter contre le problème du paludisme en Afrique et pour tenter de l'éradiquer au début du prochain millénaire.

Executive Summary

Sub-Saharan Africa carries the highest per capita burden of disease in the world. Of this malaria is the single most important disease, being responsible for nearly one million deaths and 300-500 million clinical cases every year. The control of malaria is now gaining momentum in Africa after decades of neglect, against a background of lack of preventive measures, weak health services and increasing drug resistance. Large-scale control activities will require not only effective tools and strategies, but also reliable statistics on (1) the distribution limits of endemic and epidemic malaria, and (2) populations at risk at each endemicity level.

The distribution, transmission intensity and clinical consequences of malaria in Africa vary greatly across the continent. Africa experiences a complete spectrum of malaria epidemiology ranging from intense perennial transmission to unstable, epidemic-prone areas. This has implications for the planning, targeting and implementation of control activities at continental, national and regional levels. Despite the importance of these facts, a continental perspective of where (distribution), how much, (transmission intensity), when (seasonality), why (environmental determinants) and who is affected (populations at risk) does not currently exist.

The Mapping Malaria Risk in Africa / Atlas du Risque de la Malaria en Afrique (MARA/ARMA) collaboration was created to fill this gap and to establish a continental database of the spatial distribution of malaria in Africa. To achieve this aim it relies on two complementary approaches :

A. The formation of a continental database of available malariometric data representing precisely geographically positioned survey data from published and unpublished sources in 44 countries.

The largest possible number of existing malaria survey data are being collected from published articles, university theses, ministry reports and unpublished work by research and other institutions. Parasite ratio data in children are by far the most commonly available data in Africa and MARA/ARMA has



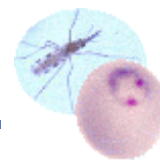
therefore focussed on them. Data on other transmission indicators such as entomological inoculation rates and infant parasite surveys are also being collected. Incidence rates derived from routine statistics will only be used in the few countries with reliable health information systems. In order to carry out this large data collection exercise MARA/ARMA has established five regional (and two sub-regional) centres, each with a data collector. These centres have also been equipped with Geographic Information System (GIS) skills and digital data sets necessary to geo-reference the collected data.

B. The development of environmentally determined models of continental limits of transmission risk, in order to supplement the data collection of empirical data in areas where no such data exist.

Malaria distribution, seasonality, frequency and transmission intensity is being investigated at various spatial scales. This approach has provided an immediate starting point for describing malaria epidemiology on a continental and national scale.

Both approaches are complementary and the empirical data have been used to develop and validate models in a number of countries. The malaria maps have been combined with other data sets such as population and administrative boundaries, thus providing a fundamental resource for planners (district-national-regional level), donors and researchers.

MARA/ARMA is a unique example of a Pan-African collaboration of researchers and control managers. The first products of the MARA/ARMA collaboration are now being distributed. The collection of basic malaria data and risk maps are providing national governments, donors and international agencies with a more empirical basis for evidence-based, strategic planning for malaria control. Complementary projects aiming to describe highland malaria and to establish a malaria vector map for Africa are also part of the MARA/ARMA collaboration. Through a closer collaboration with malaria control programmes and scientists on the continent the collaboration will build upon these experiences to assist the global efforts to Roll Back Malaria into the next millennium.



Chapitre 1

PRÉSENTATION DE MARA / ARMA

Introduction

Le Problème du paludisme

Le paludisme pose d'énormes problèmes en Afrique. On estime qu'il provoque chaque année 1 à 2 millions de décès et 300 à 500 millions d'épisodes cliniques (OMS, 1994). Actuellement, 90% des décès dus au paludisme ont lieu en Afrique. Il en est de même pour les épisodes cliniques. Cette situation résulte à la fois de la situation épidémiologique particulière de l'Afrique et de la quasi absence de lutte au cours des dernières décennies. En conséquence, le poids socio-économique de cette maladie est énorme.

Heureusement, il y a actuellement un regain d'intérêt de la part des bailleurs de fonds et des organisations sanitaires internationales. On peut en particulier citer l'appel lancé récemment par la nouvelle Directrice générale de l'Organisation mondiale de la santé, le Dr. Brundland, pour faire reculer le paludisme ("Roll Back Malaria"). La mise au point d'outils de planification utilisables du niveau local au niveau continental vient donc à point nommé.

Des espoirs pour lutter contre le paludisme

Des innovations médicales et sanitaires récentes offrent, pour la première fois depuis des décennies, de réelles opportunités de réduction substantielle du poids du paludisme sur le continent africain. Par exemple, de nouveaux médicaments, ainsi que des nouvelles formulations et de nouveaux conditionnements, améliorent de plus en plus le traitement symptomatique à domicile. En matière de prévention, l'utilisation à grande échelle des moustiquaires imprégnées d'insecticide (MI) pourrait permettre de faire chuter la mortalité et la morbidité palustres. Il a ainsi été démontré récemment que l'utilisation des MI peut réduire la mortalité infantile de 14 à 64% dans certaines zones endémiques, ce qui traduit une très bonne efficacité pour un coût réduit. Bien qu'il existe d'énormes espoirs placés dans

la découverte d'un vaccin, une utilisation à grande échelle ne sera probablement pas possible avant longtemps. La meilleure stratégie actuellement est donc encore le traitement efficace et précoce en cas d'infection clinique. Les outils nécessaires doivent donc être déployés dès maintenant et de la manière la plus efficace possible.

Beaucoup de facteurs jouent sur le choix des méthodes de lutte contre le paludisme dans une région donnée : l'endémicité, l'espèce du vecteur et son comportement, la saisonnalité, les types de maladies, les services de santé, etc. Puisque tous ces facteurs ne sont pas répartis de manière uniforme sur le continent, une information exacte, pertinente et à jour sur l'ensemble de ces facteurs est nécessaire pour que la lutte contre le paludisme puisse être correctement planifiée et des ressources allouées de manière adéquate.

Pour cela, les cartes offrent un moyen idéal pour représenter une information complexe de manière compréhensible et instructive. Certains facteurs, tels que la disponibilité des services de santé ou de lutte contre le paludisme ainsi que les infrastructures existantes peuvent être cartographiées facilement pour donner une représentation visuelle des informations déjà disponibles. Pour d'autres facteurs, tels que l'endémicité, les cas de maladies, la répartition du vecteur ou la saisonnalité, les méthodes spatiales pourraient être utilisées pour générer des zones de données continues (où l'information est disponible pour chaque point dans l'espace). Une telle couverture ininterrompue fournit l'information à un format pertinent à l'échelle continentale, et permet une vue d'ensemble rapide de la situation jusqu'au niveau national et régional. Ceci permet d'aborder le problème de manière systématique et bien documentée.



Cartographie du paludisme

La nécessité des cartes

Cartographier l'endémicité du paludisme est important pour bon nombre de raisons.

Premièrement, les zones qui ne présentent pas de risque pour le paludisme doivent être identifiées, tandis que les zones de paludisme épidémique doivent être reconnues et intégrées dans un système adéquat d'alerte précoce. Il s'agit là d'une activité fondamentale pour définir l'ampleur du problème du paludisme dans chaque pays.

Deuxièmement, il a été suggéré que dans les zones endémiques, les cas de paludisme grave peuvent varier selon l'intensité de la transmission (Snow *et al.*, 1997). Dans les zones de faible niveau d'endémicité, le paludisme cérébral serait plus fréquent chez les enfants de plus de 2 ans, tandis que dans les zones de très forte transmission la forme la plus fréquente serait l'anémie palustre grave chez les jeunes enfants et les nourrissons. Cette variabilité de la morbidité palustre selon l'intensité de la transmission a une grande importance pratique pour les services préventifs et cliniques, puisque les groupes d'âge à cibler et les soins cliniques doivent être ajustés.

Troisièmement, il se pourrait que l'effet protecteur de mesures préventives telles que les MII soit lié au niveau initial de l'intensité de la transmission, même si le nombre total de vies sauvées par l'intervention dans les quatre essais achevés récemment en Afrique était très similaires (Lengeler, 1998).

D'autres mesures, telles que la lutte contre les larves, ne pourraient être viables que dans certaines zones hautement saisonnières, ou à la limite de la distribution de la maladie, où se trouvent des populations de moustiques suffisamment instables pour être affectées par de telles interventions. Les vaccins pourraient aussi être particulièrement efficaces dans les zones de haute endémicité, où l'immunité initiale acquise grâce au vaccin sera ensuite renforcée par la réponse immunitaire aux fréquentes inoculations. Un autre exemple est l'épandage d'insecticide à domicile, pour lequel l'insecticide doit

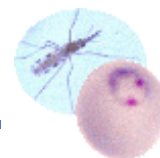
être choisi en fonction de la longueur de la saison de transmission. Un produit chimique dont l'efficacité ne dure que six mois est inutile dans les zones à transmission pérenne.

Cartographie : Passé et future

Cartographier les maladies est une préoccupation ancienne, comme le montre le travail de John Snow sur le choléra à Londres à l'époque victorienne. Il est intéressant de noter que la cartographie a été largement utilisée (y compris pour les maladies les plus rares) dans les pays industrialisés, alors que très peu de travaux ont été conduits sur les principales maladies infectieuses dans le monde. En ce qui concerne le paludisme en Afrique, quelques cartes ont été produites au niveau national (Afrique du Sud, Kenya, Tanzanie Ouganda), largement en s'appuyant sur l'opinion de chercheurs, avis renforcé dans certains cas par un travail approfondi sur le terrain (Clyde, 1967).

En dépit des sérieux problèmes que cause le paludisme en Afrique, les données de base sont rares et la situation mal comprise. Des détails sur les risques de paludisme et sa sévérité, ainsi que des données fondamentales sur les sites (distribution), le pourquoi (déterminants environnementaux), l'intensité (intensité de la transmission) et la période (saisonnalité) font défaut. Jusqu'à présent, personne n'a essayé de préciser les populations qui sont exposées aux différents niveaux de risque du paludisme au niveau du continent. De plus, l'absence de méthodes de diagnostic satisfaisantes et de systèmes statistiques performants fait que les données sur le nombre de cas de maladie et de décès causés par le paludisme sont peu fiables.

Il faut donc repenser la définition de l'endémicité palustre et la cartographie du risque du paludisme, afin de mieux appuyer la planification et la programmation de la lutte contre ce fléau. Compte-tenu du regain d'intérêt pour la lutte contre le paludisme en Afrique, il faut que de telles cartes soient établies de manière systématique pour l'ensemble du continent.



Fournir des données adéquates et en temps utile est la condition *sine qua non* pour une bonne planification en santé publique. Cette nécessité est au centre de la collaboration MARA/ARMA (Mapping Malaria Risk in Africa / Atlas du Risque de la Malaria en Afrique). Le but de ce rapport technique est de donner un aperçu de la collaboration MARA/ARMA et de ses premiers produits, et de solliciter en retour une information réciproque de la part d'utilisateurs potentiels.

mettre au point un atlas dynamique du risque et de la sévérité de la maladie par le biais de cette collaboration internationale. Ceci a été rendu possible grâce à l'accessibilité des logiciels SIG, à la connexion à Internet en Afrique, à un esprit de collaboration internationale, à l'accent de plus en plus fort porté sur la planification basée sur les constats de terrain, et grâce à une disponibilité accrue des données au niveau du continent (population, climat, images satellites, etc.)

La collaboration internationale MARA/ARMA

La collaboration MARA/ARMA a été initiée afin d'élaborer un atlas des risques de paludisme en Afrique à travers l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) sur micro-ordinateur, en intégrant différentes données géographiques, environnementales, et palustres.

Dès le début, la collaboration MARA/ARMA a été une entreprise internationale, pluri-disciplinaire (animée par des biologistes, des médecins, des statisticiens, des géographes), initiée par un groupe de chercheurs actifs en Afrique, et ayant des liens étroits avec les programmes nationaux de lutte contre le paludisme. Il y a aujourd'hui une chance réelle de

Un double effort de recherche

La collaboration MARA/ARMA a été organisée autour de deux approches complémentaires : la collecte de données et la modélisation.

A Collecte de données

Cette approche consiste à collecter le plus grand nombre possible de données existantes provenant d'enquêtes, à partir d'articles publiés dans les revues scientifiques, de thèses universitaires, de rapports de ministères ainsi que les travaux non publiés réalisés par des institutions de recherche. Les données collectées (essentiellement la prévalence parasitaire, mais aussi d'autres types de données lorsque celles-ci sont disponibles) sont décrites dans le chapitre suivant. Dans la plupart des pays, les statistiques

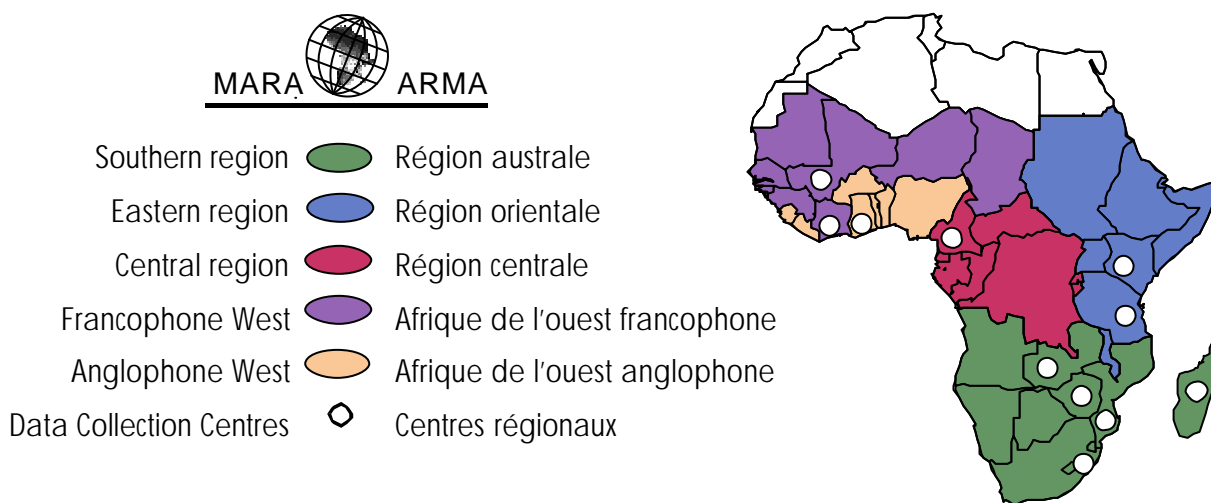


Figure 1. Régions fonctionnelles et centres de collecte des données de la collaboration MARA/ARMA. Les centres de collecte des données sont situés à Bamako, Bouaké, Dar es Salaam, Durban, Nairobi, Navrongo et Yaoundé.



collectées à travers le système de routine n'ont pas été utilisées parce que très incomplètes. La compilation de ces données aboutira à la création d'une base de données panafricaine qui sera rendue publique et qui fournira la base de la cartographie du risque jusqu'au second niveau administratif (le district).

Pour la collecte des données, l'Afrique a été divisée en cinq régions, avec des centres régionaux chargés chacun de 7 à 10 pays, et deux centres secondaires d'appui (figure 1). Les centres régionaux sont basés dans des institutions existantes (voir verso de la page de couverture). Chacun de ces centres est animé par un Coordonnateur de la collecte des données, employé à plein temps et supervisé par un chercheur associé. Du fait de la nécessité de géoréférencer l'ensemble des données collectées, les coordonnateurs de la collecte de données ont été formés à l'utilisation des SIG, et ont été équipés d'ordinateurs, de logiciels et des données numériques nécessaires. Bien que les activités MARA/ARMA soient basées dans des institutions, l'initiative en elle-même est non-institutionnelle et fonctionne dans un esprit de collaboration très ouvert, impliquant tous les pays et les individus prêts à collaborer.

En plus des données sur le paludisme, des données sur les vecteurs et le paludisme épidémique ont aussi été collectées dans le cadre d'initiatives étroitement liées à MARA/ARMA.

B Modélisation

Ce volet englobe la modélisation prédictive (prévisionnelle), basée sur le climat et d'autres facteurs environnementaux, et permet, entre autres, de compléter la collecte des données dans les zones où ces données manquent. Un modèle de la répartition du paludisme a été élaboré à partir de données disponibles à l'échelle du continent sur la pluviométrie et la température moyenne (résolution de 5 x 5 km). Dans le futur, des modèles plus sophistiqués simuleront la saisonnalité, la fréquence des épidémies dans les zones aux limites de la transmission, et, à une échelle plus réduite,

l'endémicité du paludisme ainsi que des niveaux d'intensité de la transmission (en se basant à la fois sur des données empiriques et environnementales).

Les motivations principales sous-tendant la modélisation étaient que : (1) les données relatives au paludisme sont réparties de manière inégale à la fois à l'intérieur des pays et entre pays (2) les données disponibles ne sont pas suffisantes pour donner une image complète de l'endémicité du paludisme, pour des raisons discutées au chapitre 3.

Les facteurs qui déterminent la répartition et la sévérité du paludisme sont divers et complexes, mais on peut considérer le climat comme étant le facteur le plus important. La température et la pluviométrie limitent le paludisme aux régions chaudes et humides d'Afrique, où les moustiques et les parasites peuvent se reproduire et se développer suffisamment et donc assurer la transmission. Ces données climatologiques sont de plus en plus disponibles sous forme de zones de données qui peuvent être manipulées dans un SIG, et qui peuvent être utilisées pour faire des prévisions dans les zones où les données de terrain manquent. Les deux approches choisies par la collaboration MARA/ARMA - la collecte des données et la modélisation - sont utilisées en parallèle et les données de terrain ont déjà été utilisées pour mettre au point des modèles environnementaux dans plusieurs pays.

Produits

Les principaux utilisateurs visés par la collaboration MARA/ARMA sont les responsables des programmes de lutte contre le paludisme, les agences nationales et internationales actives dans le domaine de la santé publique internationale, et les chercheurs. La tendance en Afrique au cours des dernières années a été la décentralisation des systèmes de santé jusqu'au second niveau administratif (le district), et l'atlas MARA/ARMA devrait faciliter la planification sanitaire à tous les niveaux administratifs. La diffusion à grande échelle des produits MARA/ARMA est donc très importante.

Les produits seront présentés plus en détail dans les



chapitres suivants. Ils incluent un atlas sur le risque de paludisme en Afrique, des cartes en format poster, des livres et des brochures, des cartes numériques et des bases de données relatives au paludisme disponibles sur CD-ROM et sur Internet, ainsi que des publications scientifiques. La formation à l'utilisation des SIG et des données sur le paludisme est une composante importante de la collaboration depuis le début, et cet aspect sera renforcé davantage au cours de la phase suivante, avec le support de la *Multilateral Initiative on Malaria* (MIM).

Objectifs

Compte-tenu de ce qui précède, les objectifs de la collaboration MARA/ARMA peuvent être définis comme suit :

1. Faire une collecte aussi complète que possible des données disponibles sur le paludisme pour le continent africain.
2. Mettre en évidence les zones qui ne disposent pas de données ou seulement de données disparates.
3. Définir de manière spatiale les facteurs qui excluent le paludisme (ex. absence de population, haute altitude, déserts) en vue de définir les zones où la transmission est improbable.
4. Définir les classes de risque du paludisme en terme de données climatiques et environnementales, et développer des modèles capables de prédire les risques de paludisme sur tout le continent.
5. Cartographier les zones à risque pour des épidémies.
6. Elaborer une carte de base sur le risque de paludisme en Afrique, au niveau de la seconde unité administrative (le district), qui intègre les facteurs relatifs à la géographie, à la population et à l'environnement.
7. Mettre les cartes de risque à la disposition des organisations nationales, régionales et internationales.
8. Contribuer à la formation du personnel engagé dans la lutte contre le paludisme en matière de SIG avec pour objectif une utilisation pour la planification sanitaire.

Chapitre 2

Activité A : Collecte de données

Quelles données ?

Incidence de la maladie

Les taux d'incidence de la maladie et de mortalité sont les meilleures données pour la collaboration MARA/ARMA puisque ces taux représentent directement le risque de maladie pour une zone déterminée. Malheureusement, beaucoup de pays africains ne disposent pas de systèmes de surveillance fiables, de sorte que les statistiques courantes sur les maladies ne peuvent pas être utilisées (OMS, 1994). Il faut donc collecter d'autres types de données (des indicateurs de substitution) pour refléter l'endémicité du paludisme.

Cependant les données statistiques de pays comme la Namibie, le Botswana, le Zimbabwe et l'Afrique du Sud ont pu être utilisées. Des données relatives à l'incidence du paludisme collectées dans le cadre d'enquêtes particulières, par exemple dans le cadre d'un essai clinique, ont aussi été incorporées dans la base de données MARA/ARMA.

Taux d'inoculation entomologique

Le taux d'inoculation entomologique (TIE) représente le nombre de piqûres infectieuses auxquelles un individu est exposé pendant une période donnée (en général un an). Il permet une estimation directe de la transmission, facile à comprendre et à comparer. En théorie, le TIE est un excellent moyen



d'estimer l'endémicité du paludisme. Malheureusement, la mesure du TIE pose de nombreux problèmes. Premièrement, les méthodes utilisées ne sont pas suffisamment standardisées, de sorte que les estimations du TIE peuvent varier fortement en fonction des méthodes de recueil de données utilisées. Deuxièmement, les erreurs d'échantillonnage peuvent être importantes dans les zones où les moustiques sont rares et/ou rarement infectés, et ceci s'applique en particulier aux zones à faible transmission. Enfin, les études de grande qualité avec suivi de longue durée sont rares, et les TIE restent souvent indisponibles.

Prévalence parasitaire

Les études fondées sur la prévalence parasitaire (PP - le pourcentage de sujets trouvés positifs lors d'un prélèvement sanguin) sont fréquentes en Afrique, et ces données sont donc nombreuses. De plus, de telles enquêtes transversales sont sujettes à moins d'erreurs méthodologiques, bien que la qualité de l'observation microscopique puisse varier. La PP ne donne pas une estimation quantitative directe des nouvelles infections, à moins que l'enquête ne soit limitée aux jeunes enfants, chez lesquels l'apparition de la parasitémie en fonction de l'âge donne une évaluation directe de la transmission (Macdonald, 1957). Néanmoins, la PP est liée à l'intensité de la transmission, et de ce fait elle a été utilisée pour représenter l'endémicité dans l'épidémiologie classique du paludisme.

Le paludisme est considéré comme endémique lorsqu'il y a incidence enregistrable de cas et de transmission naturelle plusieurs années de suite. La méthode la plus fréquente pour représenter le niveau d'endémicité est basée sur l'indice splénique (pourcentage d'individus présentant un grossissement de la rate). Elle avait été proposée à la conférence sur le paludisme de Kampala en 1950 (OMS, 1951).

Par la suite, la définition a été revue en se fondant sur la PP (Metselaar et Van Theil, 1959) :

Hypo-endémique : PP des 2-9 ans # 10%
Mésio-endémique : PP des 2-9 ans 11 à 50%
Hyper-endémique : PP des 2-9 ans toujours >50%

Holo-endémique :

PP chez les nourrissons toujours >75%

Bien qu'elle soit très répandue, cette classification revient à créer artificiellement des groupes à partir de données continues, et masque d'importantes disparités entre localités. Plusieurs autres tentatives ont été faites pour re-définir la classification de l'endémicité (Gill, 1938 ; Lysenko et Semashko, 1968). On a ainsi défini différents faciès épidémiologiques du paludisme à partir des espèces de parasites et de vecteurs, du niveau de transmission, des caractéristiques socio-économiques et du niveau de vie des populations, des infrastructures sanitaires, de l'utilisation de médicaments, de l'influence des projets de développement, du climat et de la géographie. Les classes ont été bâties pour correspondre aux outils de contrôle disponibles. Malheureusement, la plupart des informations nécessaires ne sont pas largement disponibles en Afrique.

Dans le cadre de la collaboration MARA/ARMA, nous avons décidé d'utiliser la PP comme le principal indicateur du paludisme, du fait de sa large disponibilité et de sa fiabilité. Sa validation par rapport à d'autres indicateurs (tels que le TIE et les données disponibles sur l'incidence) pourrait conduire à une redéfinir les groupes classiques de l'endémicité.

Les classes d'âge utilisés par Metselaar & Van Theil (1959), 2-9 ans pour toutes les situations sauf les zones holo-endémiques, sont intéressantes mais n'en sont pas moins arbitraires. Omumbo *et al.* (1997) ont mené une étude sur l'importance des classes d'âge utilisées pour calculer l'endémicité. Bien que les PP varient selon les classes d'âge, (les différences entre les classes 1-5 ans et 6-9 ans étant les plus importantes), cela n'entraîne un classement d'endémicité différent que dans de rares cas (8% des cas). Sur la base de ces résultats, il a été décidé de se concentrer sur les PP des enfants de moins de 10 ans, nourrissons exclus, sans tenir compte des classes d'âge utilisées par chaque enquête.

D'autres éléments ayant un impact sur les PP doivent aussi être pris en compte : par exemple les variations



saisonniers, avec des différences souvent importantes entre la PP de la saison des pluies et celle de la saison sèche. En plus de la variabilité saisonnière, il existe aussi souvent en Afrique une variabilité inter-annuelle et à long-terme. Pour en tenir compte, il faut enregistrer des informations comme la date et la saison, ainsi que les conditions recentrées au moment de l'enquête.

Les différences de PP sur de petites distances ont été bien décrites (Cattani *et al.*, 1986 ; Jambulingham *et al.*, 1991 ; Sharp et LeSueur, 1996 ; Smith *et al.*, 1995). Ces différences ne reflètent pas seulement une variabilité aléatoire, mais aussi une variabilité systématique, liée, par exemple à la distance des gîtes larvaires, au comportement humain, au type d'habitat, etc. Ce genre d'informations n'est malheureusement que rarement enregistré ; de plus, et MARA/ARMA opère à un niveau où ces variations locales ne peuvent être prises en compte, et constituent un "bruit de fond", qui peut brouiller partiellement la perception des relations à grande échelle avec l'environnement. Néanmoins, les informations relatives à la présence de marécages, d'irrigation ou de riziculture ont été enregistrées lorsqu'elles étaient disponibles.

Les types d'enquêtes et les méthodes d'échantillonnage ont aussi été prises en compte puisque les études cliniques (sur des sujets fébriles par exemple) ont tendance à surestimer la prévalence de l'infection dans la communauté. Les enquêtes au niveau des établissements scolaires, qui ne concernent que les enfants assez bien portants pour aller à l'école et incluent souvent des enfants plus âgés (chez lesquels l'immunité peut réduire les infections) ont par contre tendance à sous-estimer la PP. Le dispositif de recherche idéal serait donc basé sur un échantillon aléatoire d'enfants, reflétant la répartition géographique et par classe d'âge d'une communauté bien définie.

A l'origine, on ignorait le volume de données qui pourrait être obtenu, et aucun critère d'exclusion n'a donc été défini pour le recueil initial. Néanmoins, tous les détails ont été enregistrés, afin de pouvoir effectuer ultérieurement un codage de la qualité des

données. La structure schématique de la base de données MARA/ARMA montre toutes les informations collectées (figure 2).

Cartes historiques du paludisme

En dehors des rapports d'études sur le paludisme, les cartes historiques de la répartition du paludisme ont aussi été collectées. Les contenus, l'origine et la qualité varient, mais ces cartes donnent habituellement une bonne indication de la situation perçue ou évaluée du paludisme dans ces pays. MARA/ARMA est en train de digitaliser ces cartes qui constituent une source utile de comparaison pour nos propres cartes.

Collecte des données

Comment les données sont-elles collectées ?

Le format des données à collecter était en grande partie inconnu au début de notre travail, et de ce fait, un système de collecte standardisé, mais restant souple, a dû être mis en place.

Un formulaire de collecte de données a été utilisé pour transcrire l'information issue des rapports originaux. Il comporte différentes sections qui peuvent être assemblées de diverses manières, en vue de permettre l'incorporation de différents types de données de qualité variable. Cette approche a permis d'utiliser un seul formulaire pour transcrire différentes types d'enquêtes entreprises dans différentes localités, à différentes périodes. Des procédures standards guident les agents chargés de la collecte des données des sources bibliographiques.

Une base de données relationnelle (figure 2) a ensuite été conçue avec le logiciel Microsoft Access™ pour gérer les relations complexes entre ces données. La structure choisie permet une évolution, l'incorporation de nouvelles données, donne beaucoup de souplesse pour sélectionner les données à utiliser pour différentes analyses. Pour cela, une application spéciale, compatible avec le formulaire a été élaboré avec le logiciel

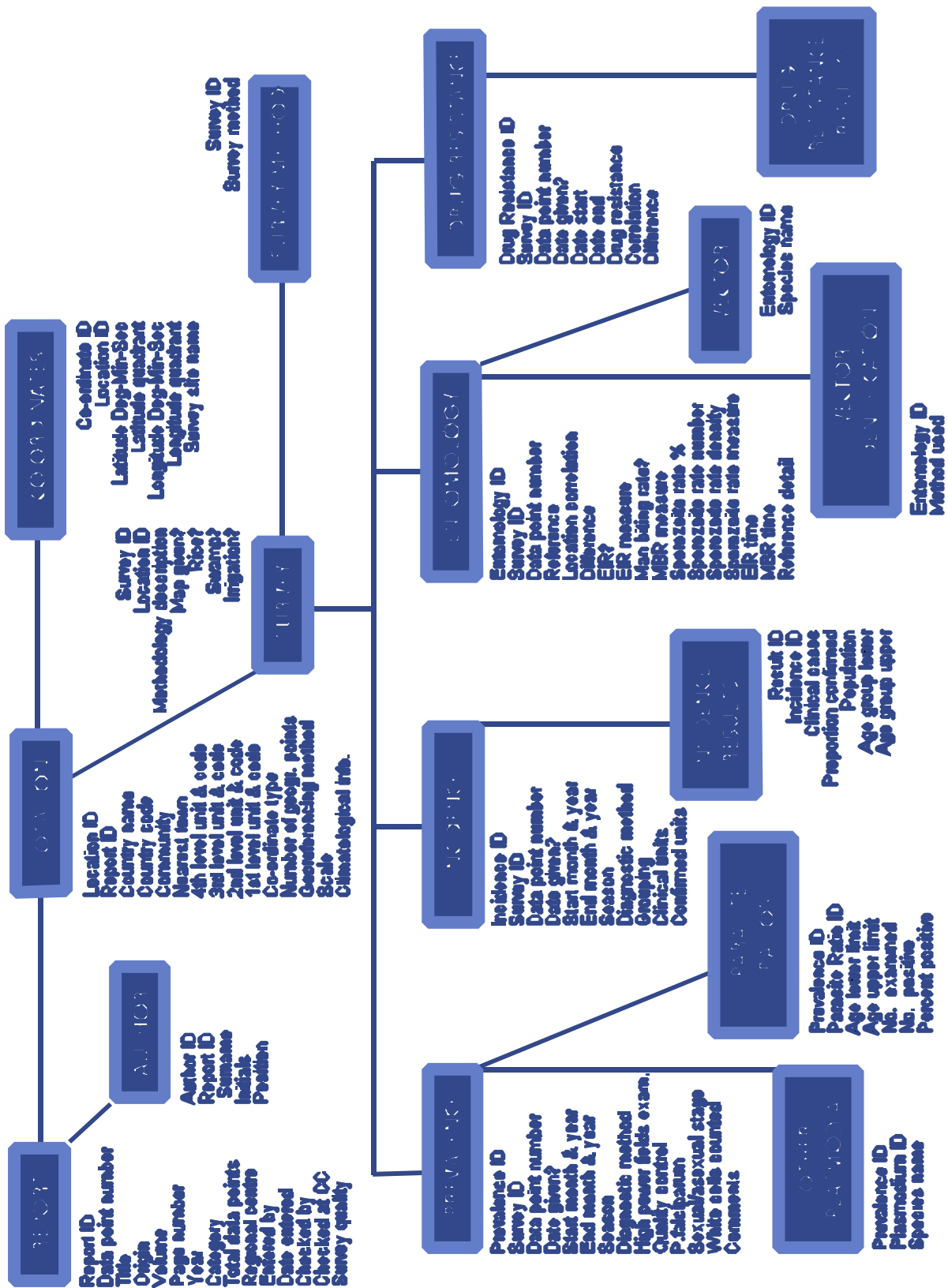


Figure 2. Structure de la base de données MARA/ARMA montrant les données collectées et leur relations.



MSAccess/Visual Basic™. Une première validation des données est faite automatiquement à l'entrée des données dans le système. D'autres vérifications et validations sont ensuite effectuées au centre de coordination de Durban, et en cas de problème, des demandes d'informations sont renvoyées aux coordonnateurs de la collecte des données.

Géoréférencement des données

Les données des enquêtes doivent être géoréférencées (latitude et longitude) pour pouvoir être utilisées dans un SIG. Dans certains des documents consultés, la longitude et la latitude du site d'enquête sont mentionnées, alors que d'autres ne donnent que le nom de la zone ou de la localité où l'enquête a été menée. La localisation géographique doit alors être obtenue soit à partir d'une carte topographique, soit en utilisant des cartes numériques et des bases de données telles que African Data Sampler (World Resources Institute, 1995), Geoname Gazetteer (GDE Systems Inc., 1995) ou Encarta (Microsoft, 1998) ; voir Annexe 2.

Stratégie de recherche et sources de données

La stratégie de recherche des données s'est fondée sur l'utilisation de différents canaux de façon à avoir les données les plus complètes possible. Dans un premier temps, une recherche bibliographique exhaustive a été faite en utilisant les bases de données bibliographiques *Medline* et *Embase*. Les publications concernant l'Afrique ont ensuite été lues en détail pour y relever les autres publications citées. Toutes les revues (nationales ou internationales) susceptibles de contenir des données sur le paludisme ont aussi été analysées manuellement au centre d'assistance situé en Suisse et au Centre Régional pour l'Afrique Orientale. Au total, 30 revues internationales et continentales, et 28 revues nationales ont été ainsi analysées manuellement sur la période 1960-1997. Certaines données ont aussi été obtenues en contactant directement les chercheurs connus pour avoir travaillé dans une région particulière.

Deuxièmement, des visites ont été effectuées dans les différents pays par les coordonnateurs de la collecte des données, afin d'avoir accès aux sources d'informations difficiles d'accès. Les coordonnateurs régionaux ont ainsi visité toutes les institutions susceptibles de posséder des documents non publiés. Ces visites ont concerné les ministères de la santé, les universités et les institutions de recherche. Ce travail de longue haleine, coûteux et fastidieux, est toujours en cours d'exécution. Enfin, les archives internationales existant en Afrique et en Europe (l'OMS à Genève, l'ORSTOM à Paris, les Instituts de Médecine Tropicale de Bâle, d'Anvers et de Lisbonne) ont été explorées.

Mi-1998, ces recherches intensives avaient permis d'identifier 1014 rapports ou sources de données, dont 29% étaient des revues scientifiques, 45,5% des rapports des ministères de la santé, 19,5% des rapports provenant d'agences internationales, bilatérales ou multilatérales, d'ONG et leurs hôpitaux ou de communications personnelles, et 5,9% des thèses universitaires (figure 3). L'énorme quantité de données non publiées a confirmé la nécessité de visites de terrain pour localiser ces données.

A partir de ces sources de données, on a pu recueillir 2529 taux de prévalence parasitaire (PP), calculés pour des enfants de moins de 10 ans entre 1926 et 1997. De plus, 147 enregistrements portant sur l'incidence du paludisme et 52 taux d'inoculation entomologique ont été trouvés. Une carte de tous les sites concernés est donnée à la figure 4. Un rapport peut contenir plusieurs jeux de données, car un jeu est unique par sa source, le lieu et la date de l'enquête. Il peut néanmoins être subdivisé en fonction de différentes classes d'âge. Le nombre d'enquêtes identifiées est remarquable compte-tenu des contraintes logistiques de la collecte. Certains pays ont déjà été bien inventoriés, alors que dans d'autres, les données sont très dispersées ou sont difficilement accessibles.



Une fois le processus de collecte achevé, il faudra combler les vides existants, en modélisant le risque de paludisme à partir des données d'autres régions où les conditions sont similaires.

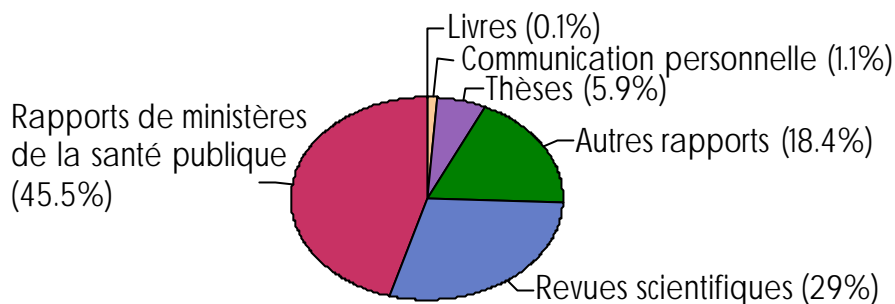


Figure 3. Sources des données MARA/ARMA. Une source peut contenir plusieurs études et plusieurs sites d'étude.

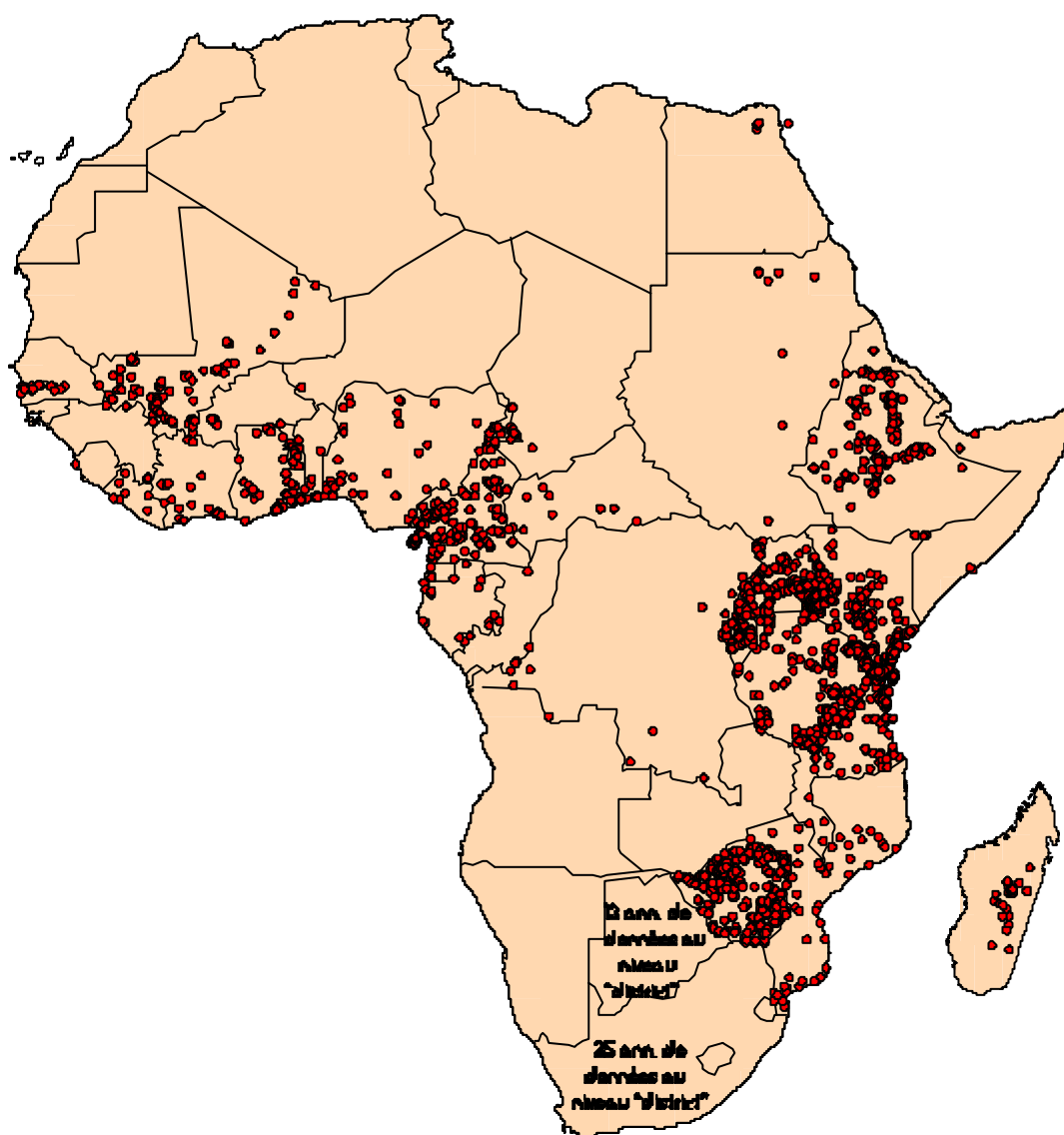


Figure 4. Sites concernés par les données collectées actuellement (juillet 1998) en Afrique. Chaque point représente les résultats d'une étude particulière par sa date, son lieu, ses sources et sa méthode.



Chapitre 3

Activité B : Modélisation

Pourquoi modéliser ?

Pourquoi avoir recours à des modèles parallèlement à la collecte de données ? Premièrement, les données sont très inégalement réparties. Certains pays disposent de données abondantes sur le paludisme, tandis que pour d'autres les données sont rares, très dispersées, ou difficiles à obtenir. Les données sont souvent concentrées là où les chercheurs ont été actifs, et souvent là où le paludisme est prévalent. Même dans les pays où l'on a trouvé des centaines de rapports, de vastes zones restent

inexplorées (Omumbo *et al.*, 1997). Deuxièmement, la prévalence parasitaire par elle-même ne donne pas nécessairement une image claire de l'endémicité du paludisme. Divers facteurs locaux peuvent conduire à des différences très localisées dans les PP et donc induire les épidémiologistes en erreur. Troisièmement, les enquêtes faites pendant des périodes épidémiques ne donnent pas une vision correcte de ces zones pour les années non-épidémiques. Ces problèmes sont illustrés par la figure 5 : les PP disponibles (plus les cercles sont grands, plus les PP sont élevés) dans deux pays différents peuvent être réparties comme montré en (a), alors que la situation "réelle" du paludisme dans ces deux pays ressemble à (b). Il n'est pas possible d'obtenir une image fiable de la situation à partir de quelques données de PP seulement. Il faut donc recourir à différents types de modélisation pour remplir ces "vides".

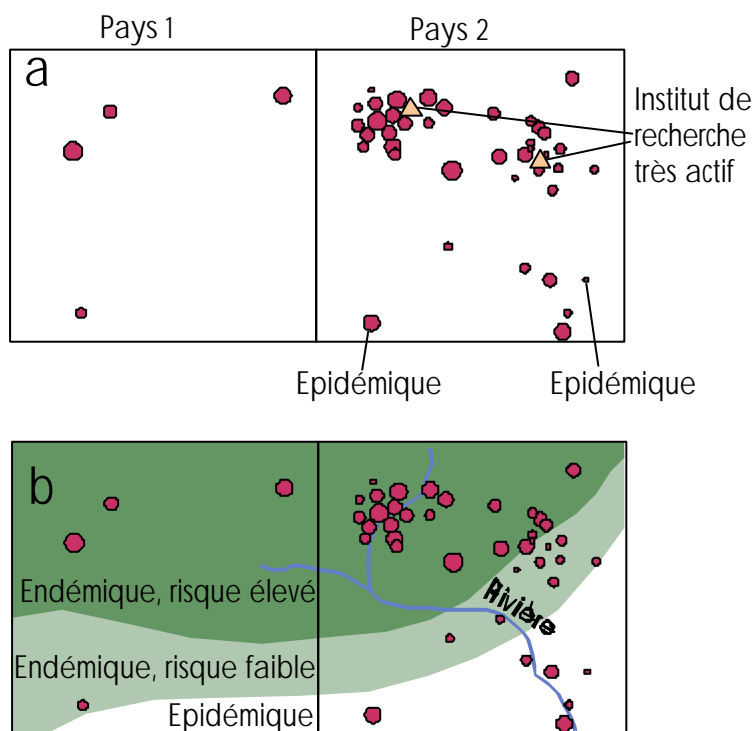


Figure 5. Le besoin de modélisation géographique est illustré avec cet exemple imaginaire : (a) les enquêtes paludométriques ne sont réparties de manière régulière ni à l'intérieur de deux pays voisins, ni entre eux, et ceci pour diverses raisons ; la taille des points reflète la prévalence parasitaire - PP ; (b) La PP réelle pour toute la zone ne peut pas être déduite des seules PP disponibles. L'effet de l'altitude (courbes de niveaux) et d'autres caractéristiques géographiques (rivières), de même que l'impact d'épidémies et la variabilité locale de la PP, sont illustrés.

Que faut-il modéliser ?

Le paludisme en Afrique soulève de nombreuses questions. La principale est : où le paludisme sévit-il régulièrement / occasionnellement / jamais ? La réponse à cette question met en jeu la *répartition* de la maladie, et la délimitation des zones endémiques et épidémiques. On peut aussi se demander combien de personnes sont porteuses du parasite, combien tombent malades ou meurent du paludisme ? En d'autres termes : quel est le risque de contracter la maladie ? Ces questions induisent le problème de l'*intensité de la transmission* et de ses effets sur la santé des êtres humains. Enfin, quand et pendant combien de temps le paludisme se transmet-il ? Nous avons alors à faire face au *caractère saisonnier* de la transmission du



paludisme.

Comment modéliser ?

Cette question doit être traitée à différents niveaux. Les facteurs importants au niveau continental diffèrent en effet de ceux qui jouent au niveau régional ou local. Nous avons abordé la modélisation du paludisme en Afrique avec une approche à quatre niveaux :

- (1) Le premier niveau, continental, définit la macro-répartition de la transmission et de la maladie, à partir des conditions climatiques moyennes.
- (2) Le second niveau, sous-continental, permet d'affiner la répartition de la transmission en tenant compte des changements climatiques entre les années et des différences entre les principales zones écologiques.
- (3) Le troisième niveau, régional ou national, utilise une combinaison de données empiriques et environnementales pour définir l'intensité de la transmission dans un pays ou une zone écologique donnée (transmission pérenne, saisonnière ou bi-saisonnière).
- (4) Le quatrième niveau, local, concerne une superficie inférieure ou égale à 30 km² ; il opère en-dessous de la seconde unité administrative (le district) et s'intéresse à la variation de la transmission à une échelle très locale.

Que savons-nous ?

Le paludisme est déterminé par un grand nombre de facteurs environnementaux qui affectent la répartition, l'intensité de la transmission, l'incidence de la maladie, les variations locales et le caractère saisonnier. Différents facteurs jouent en fonction des échelles spatiales considérées : certains jouent à l'échelle continentale et d'autres à une échelle locale, comme le village. Toute modélisation du paludisme est limitée (a) par les données disponibles et leur résolution spatiale, et (b) par ce qui est connu de la relation entre ces données et la transmission de la maladie.

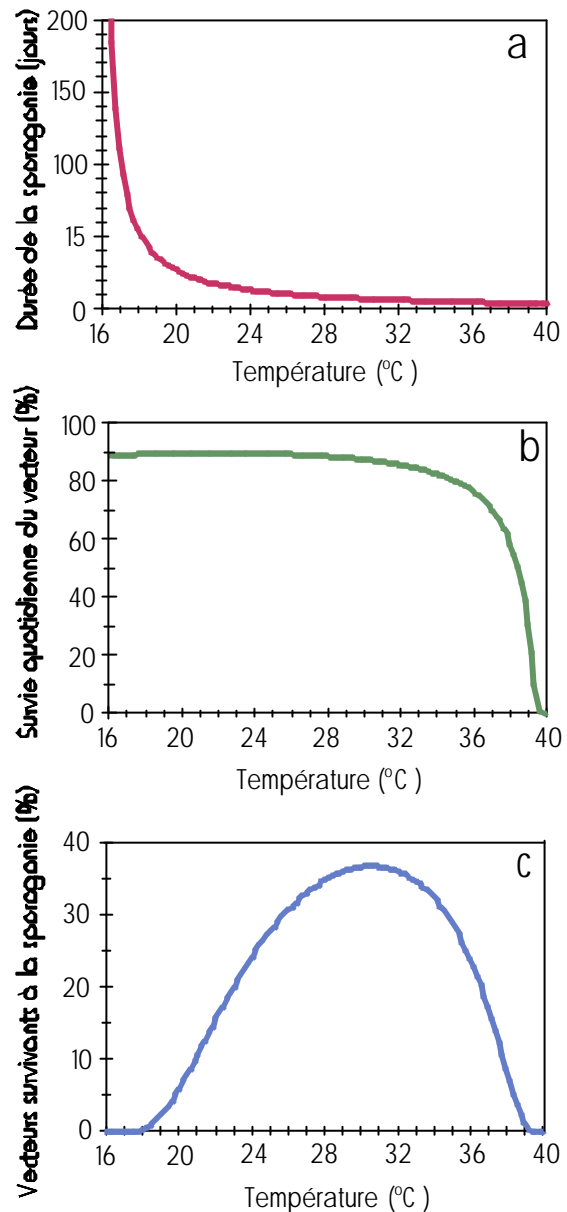


Figure 6. Effet de la température sur la transmission du paludisme: (a) durée du cycle sporogonique " n " en jours (Macdonald, 1957; Detinova, 1962): Plus la température est élevée, plus le cycle est court; (b) survie quotidienne des moustiques " p " suivant la définition de Martens (1997); (c) pourcentage de moustiques survivant durant toute la période nécessaire à la sporogonie " p^n ".

Un facteur primordial dans la transmission du paludisme est la *température*. Elle affecte le cycle de la transmission de diverses manières. Elle joue sur la durée du cycle sporogonique du parasite (n) et sur la



survie du vecteur (p). Ces relations sont illustrées par les figures 6a et 6b. La limite inférieure de la température de transmission est celle à laquelle une proportion trop faible de moustiques survivent la période d'incubation du parasite (p^n , figure 6c). Les températures trop basses limitent également le vecteur : par exemple, l'espèce *A. gambiae* n'existe que dans les zones sans gel (de Meillon, 1934), ou dans des zones où les températures mensuelles en période froide restent au dessus de 5EC (Leeson, 1931).

Second facteur fondamental, la *pluviométrie*, qui favorise les sites de reproduction des moustiques et augmente l'humidité ambiante, ce qui améliore la survie des moustiques. La relation entre l'abondance des moustiques et la pluviométrie a été illustrée à maintes reprises. Malheureusement, cette relation n'est pas linéaire : une quantité donnée de pluie n'entraîne pas nécessairement une densité déterminée de moustiques.

En comparant les pluviométries de zones impaludées et de zones non-impaludées, il apparaît qu'une moyenne de 80 mm par mois pendant au moins trois à cinq mois est nécessaire pour garantir la transmission annuelle du paludisme (Craig *et al.*, 1998).

Modèle de répartition du paludisme (Niveau continental)

Où le paludisme sévit-il régulièrement ?

La question la plus fondamentale est peut-être de distinguer les zones endémiques des zones non impaludées. Beaucoup de facteurs sont déterminants dans la transmission du paludisme, mais au niveau continental, les plus importants sont d'ordre climatique. Ces derniers déterminent le développement du parasite et des moustiques, et la survie des moustiques. Ils conditionnent la possibilité ou non d'une transmission.

Depuis peu, la température et les données pluviométriques pour l'Afrique (à une résolution d'environ 25 km²) sont disponibles

(Hutchinson *et al.*, 1995).

Ces données sont basées sur des extrapolations à partir de données de nombreuses stations météorologiques sur une période de 60 ans en tenant compte du relief. Par conséquent, elles conviennent pour une modélisation de la présence ou de l'absence du paludisme à long-terme.

Définir la répartition du paludisme

Il est clair qu'il n'existe pas de limites bien précises entre les zones endémiques et les zones non impaludées. D'une part, les variations à long-terme et les variations annuelles coïncident rarement et les limites de la répartition du paludisme changent constamment. D'autre part, les facteurs climatiques ont toujours des gradients, et les limites de la transmission endémique ne peuvent donc jamais être définies de manière très tranchée. Une méthode d'interpolation faisant appel à la "fuzzy logic" (Zadeh, 1965) peut résoudre le problème des limites, en caractérisant cette transition. Cette logique peut être utilisée pour décrire dans quelle mesure le climat qui prévaut est propice à la transmission.

En partant de ce que nous connaissons sur les relations entre les facteurs climatiques et la transmission (figure 6) nous pouvons fixer des limites, au-delà desquelles nous sommes sûrs que la transmission peut avoir lieu, et d'autres en-deçà desquelles la transmission est presque impossible. Cette approche permet d'exprimer l'adéquation climatique d'une zone donnée pour la transmission du paludisme, et donc de définir les zones où la transmission est probable.

Le développement du parasite s'arrête à 16EC, mais la transmission au dessous de 18EC est peu probable non seulement parce qu'à cette température très peu de moustiques adultes survivent les 56 jours nécessaires à la sporogonie, mais aussi parce que l'abondance des moustiques est limitée par une longue période larvaire. A 22EC, la sporogonie est achevée en moins de trois semaines et la proportion de moustiques survivant à cette période (15%) est assez importante pour que le cycle de transmission ait lieu. Ainsi une température inférieure à 18EC a



été considérée comme défavorable, et une température supérieure à 22°C comme entièrement favorable à la transmission. La limite supérieure de température est essentiellement déterminée par la survie du vecteur, puisque des températures supérieures à 32°C sont liées à un grand renouvellement des générations, des individus

faibles et une mortalité élevée (LeSueur, Thèse de Doctorat, Université du Natal, 1991 ; Maharaj, Thèse de Doctorat, Université du Natal, 1995). La mort thermique se produit à 40°C. En termes de pluviométrie, un seuil d'au moins 80 mm par mois a été retenu comme favorable, et 0 mm comme défavorable.

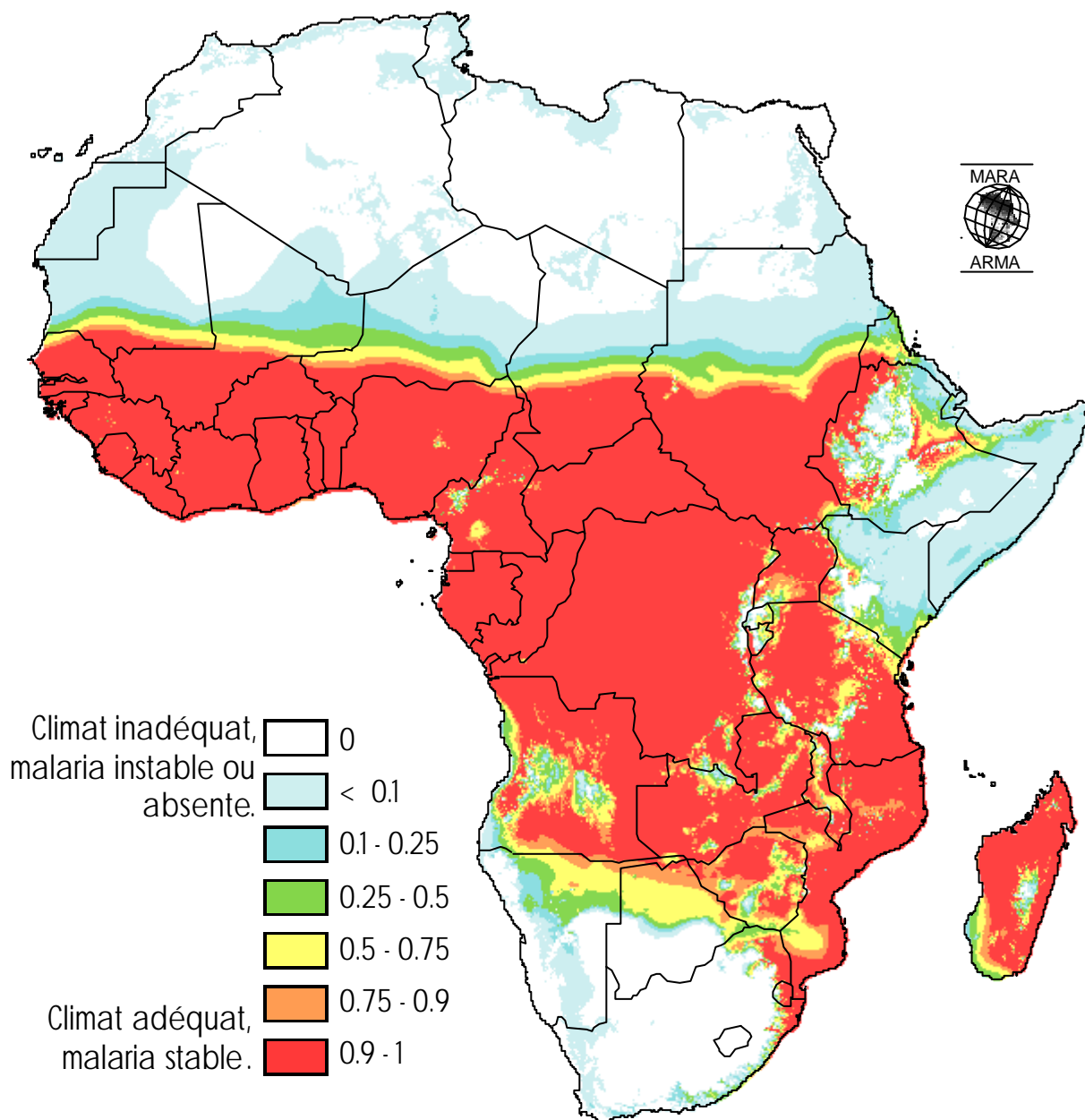


Figure 7. Modèle climatique d'adéquation à transmission stable du paludisme, avec 0 = non adéquat (transmission très instable ou absente), et 1 = extrêmement adéquat (transmission stable). Les fractions entre 0 et 1 représentent des niveaux croissants d'adéquation (transmission de plus en plus stable).



Figure 8. Comparaison du modèle climatique avec une carte du paludisme en Afrique australe : (a) modèle climatique ; (b) carte du risque et répartition selon l'avis d'experts en 1995 en Namibie, cas annuels confirmés de paludisme par district au Botswana (1982-1994), et carte du risque de paludisme en Afrique du Sud en 1993 (d'après le ministère de la santé).

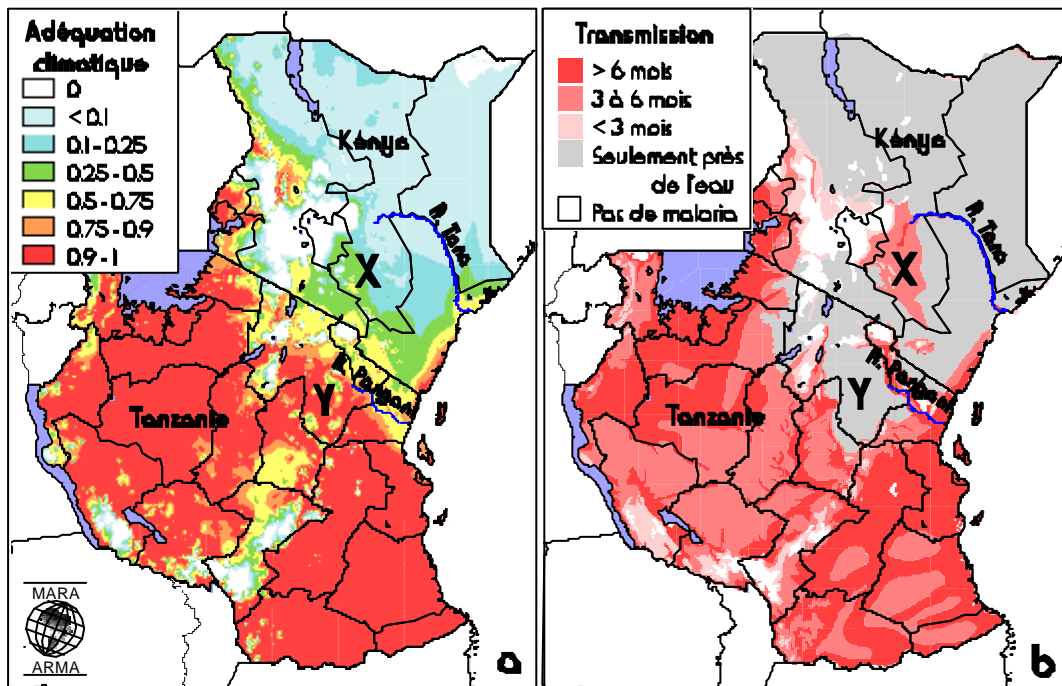
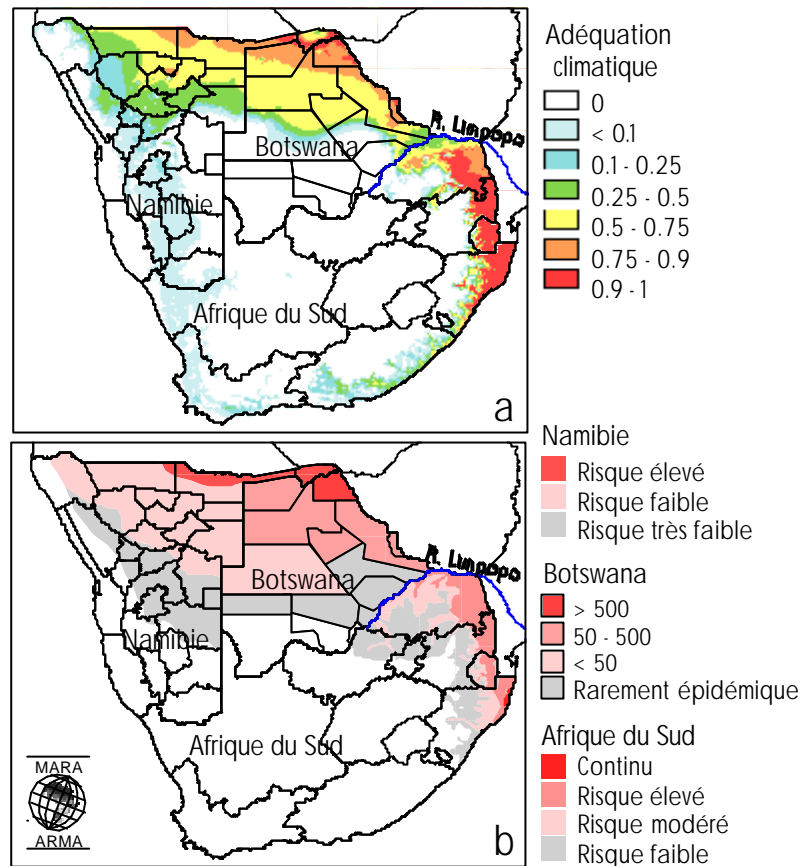


Figure 9. Comparaison du modèle climatique avec des cartes historiques de la répartition du paludisme au Kenya et en Tanzanie : (a) modèle climatique ; (b) carte historique du risque de paludisme au Kenya (Nelson, 1959) et en Tanzanie (Wilson, 1956).



Les cartes climatiques ont donc été basées sur de nouvelles valeurs, obtenues par calcul, et exprimant le caractère favorable ou non au développement sporogonique du *Plasmodium* et au développement des moustiques vecteurs. Une échelle de 0 à 1 a été créée, qui indique dans quelle mesure le climat est propice à la transmission. Puisque la température et la pluviométrie doivent être favorables au même moment de l'année pour permettre la transmission, ces cartes ont été combinées pour identifier lequel des deux facteurs était limitant à une période donnée. De plus, les conditions favorables doivent s'établir pendant une durée suffisamment longue pour que le cycle de transmission puisse s'accomplir. Dans les régions du Sahel, il suffit d'une saison pluvieuse de trois mois pour que les populations de moustiques se développent suffisamment pour permettre la transmission. Par contre, dans le reste de l'Afrique, la période minimale a été fixée à cinq mois. Enfin, toutes les zones qui connaissent le gel en période froide ont été exclues, puisque le gel élimine les populations de moustiques. Plus de détails sont donnés dans Craig *et al.* (1998).

Puisque les données climatiques utilisées sont des moyennes sur de longues périodes, l'adéquation climatique représente la probabilité d'une transmission stable pour une année moyenne. Plus cette adéquation moyenne est faible, plus la fluctuation inter-annuelle de l'adéquation climatique sera importante. Ce fait est particulièrement important pour déterminer les zones à risque d'épidémies.

Que nous indique le modèle ?

Le modèle qui en résulte (figure 7) fait ressortir les régions qui sont très propices (adéquation=1) à une transmission stable du paludisme, et celles qui ne le sont pas du tout (adéquation=0). Une valeur de 1 signifie que la transmission du paludisme est stable et zéro que la transmission est très instable, avec des possibilités d'épidémie extrêmement rares. Entre ces deux extrêmes, oscillent différents gradients allant de la transmission stable à la transmission progressivement instable, jusqu'au cas où le paludisme devient sporadique et imprévisible. Pour

les zones ayant une valeur de 1, l'intensité de la transmission peut cependant varier, car le modèle climatique n'est pas discriminant sur cet aspect.

En comparant le modèle climatique avec des cartes historiques et des données sur les cas de paludisme en Afrique australe (figure 8), au Kenya et en Tanzanie (figure 9) on constate une bonne modélisation. Les différences observées, pour certaines vallées et les principaux fleuves, proviennent du fait que le modèle n'utilise que la pluviométrie pour prédire la disponibilité en eau, alors que les moustiques peuvent aussi survivre le long des cours d'eau et dans les plaines inondées. D'autres différences (régions X et Y dans la figure 9) sont plus difficiles à expliquer. La région X est plate, de basse altitude, avec une végétation abondante qui indique une abondance d'eau. Cependant, les données historiques de cette région indiquent que la transmission du paludisme y est faible et variable. Au vu de ces faits, nous devons nous poser des questions sur l'exactitude de la carte historique. La région Y était probablement considérée comme une région à faible risque car personne n'y vivait. Ces exemples illustrent la nécessité de valider et d'analyser de manière critique les modèles.

Estimation des populations à risque

Le modèle de répartition (figure 7) a été utilisé comme base pour l'estimation des populations exposées au risque du paludisme, après superposition sur la carte électronique de la population au niveau continental (Deichmann, 1996 ; figure 10).

Une estimation a été faite du nombre de personnes vivant dans les zones à transmission considérées comme stables (où la valeur était supérieure à 0,5).

Enfin, en utilisant des estimations moyennes de la morbidité et de la mortalité dues au paludisme (tableau 1), l'importance des populations à risque ainsi que le nombre de décès dus au paludisme ont été calculés (Snow *et al.*, 1998a).

En ce qui concerne le modèle climatique de répartition, bien qu'imparfait, c'est une approche



nouvelle et intéressante de l'estimation de l'impact de la maladie au niveau continental. Comme le processus est basé sur une approche numérique bien définie, les estimations s'amélioreront à mesure que le modèle sera affiné et validé, et que d'autres

d'informations seront disponibles, aussi bien pour les décès dûs au paludisme, que pour les effets indirects du paludisme sur le taux total de morbidité et de mortalité.

Tableaux 1. Estimation de la population totale et de la population infantile (0-4 ans) vivant dans des zones où l'adéquation climatique pour la transmission stable du paludisme est respectivement d'au moins 50% et d'au moins 90%, et estimations de la mortalité annuelle due au paludisme chez les enfants africains de ces zones en 1990 (Snow *et al.*, 1998a).

Adéquation du climat pour une transmission stable	Population exposée au risque d'infection (1990)	Population infantile exposée au risque de paludisme (1990)	Hypothèse basse de mortalité : 4,6 décès pour 1000 enfants par an	Hypothèse médiane de mortalité : 8,0 décès pour 1000 enfants par an	Hypothèse haute de mortalité : 10,3 décès pour 1000 enfants par an
\$ 50%	360243292	66338541	305367	530708	683286
\$ 90%	293955320	54331548	249925	434652	559615

Caractère saisonnier

(Niveau continental)

Quand le paludisme sévit-il ?

Le début, la fin, ainsi que la durée de la période de transmission sont des données importantes pour la lutte contre le paludisme. La durée de la saison va déterminer la dynamique de la transmission, avec des saisons plus longues permettant une transmission plus intense et des niveaux d'infection plus élevés dans la population humaine. La connaissance de la durée de la période de transmission est importante afin de s'assurer que des stratégies et des outils de lutte appropriés sont utilisés. Par exemple, dans une zone avec neuf mois de transmission, l'imprégnation des moustiquaires devra se faire juste avant le début de la saison, et avec un insecticide ayant un effet prolongé sur au moins neuf mois. Les principaux facteurs déterminants le début et la fin de la transmission sont d'ordre climatique, comme c'est le cas pour la répartition.

Dans les zones avec une forte saisonnalité, là où les écarts annuels de précipitation et/ou de température sont importants, les populations de moustiques tombent chaque année à des niveaux où la

transmission ne peut plus être soutenue. Lorsque les pluies commencent et/ou la température s'élève, les populations de vecteurs doivent se reconstituer pour que la transmission puisse reprendre. Cela nécessite une période climatique très favorable, surtout si la saison ne dure que quelques mois. Par contre, là où le climat est stable pendant toute l'année, les populations de moustiques subissent beaucoup moins ces cycles annuels, et peuvent donc persister toute l'année. On comprend alors aisément, que, dans les zones très saisonnières, les étés doivent être plus chauds que dans les régions stables, afin de produire des populations de moustiques capables de transmettre le paludisme.

Durées de transmission

Le continent a été divisé en deux zones : (a) transmission saisonnière et (b) transmission stable. Nous avons considéré comme zones à climat saisonnier celles où les écarts de températures annuelles sont élevés, et où les précipitations annuelles sont inférieures à 720 mm. Nous avons considéré comme zones à climat stable celles où les variations de températures sont faibles et où les précipitations annuelles dépassent 720 mm. Le



nombre total de mois pendant lesquels la transmission est possible a ensuite été calculé en tenant compte de deux facteurs : (1) la transmission ne commence pas immédiatement avec le début de la saison des pluies, mais après un laps de temps

durant lequel les populations de vecteur se multiplient, et (2) la pluie des mois précédents a un effet cumulatif sur les mois suivants (Tanser *et al.*, en préparation).

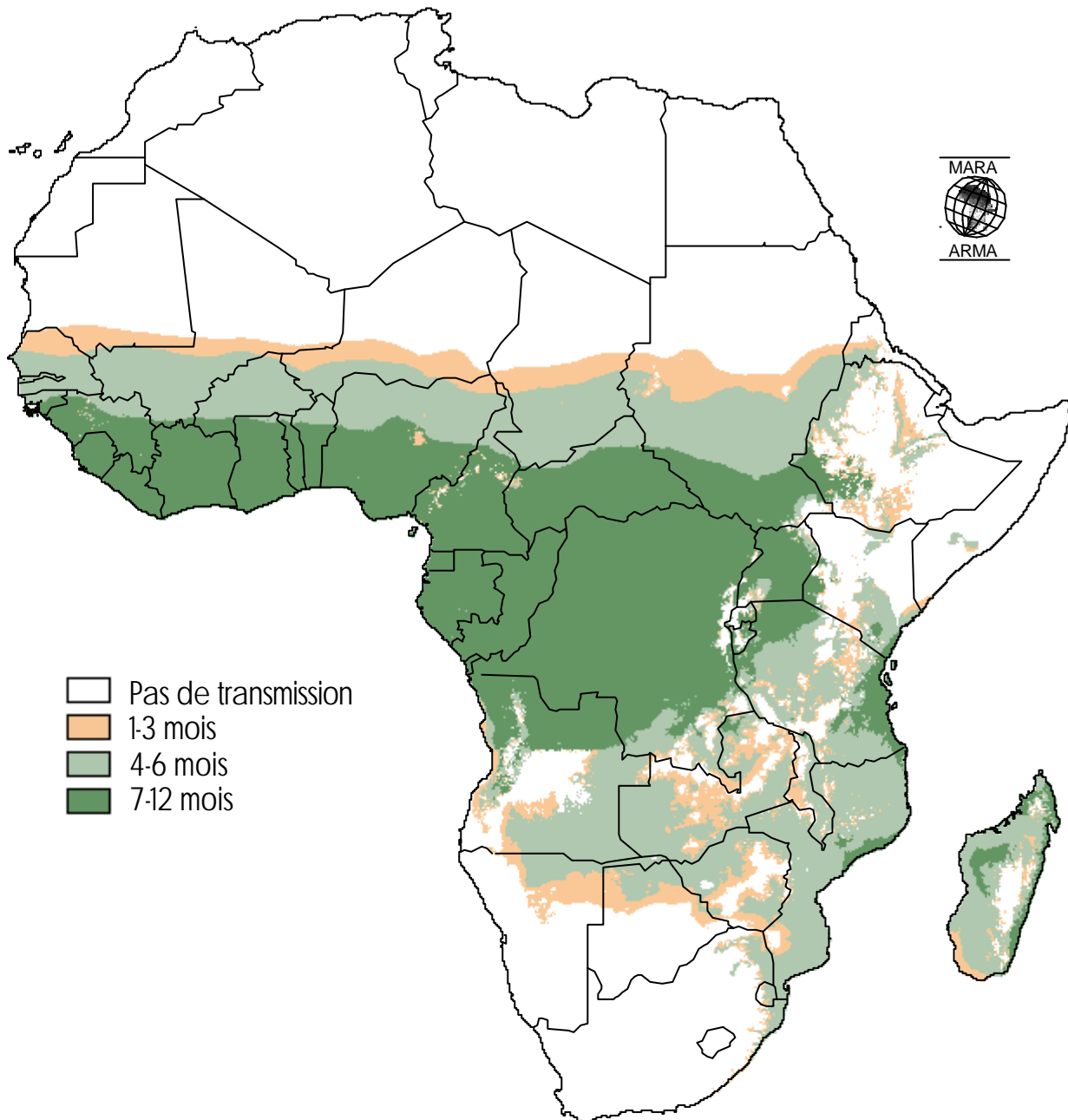


Figure 11. Durée de la période de transmission du paludisme. Pour les zones où le risque de transmission dure de 1 à 3 mois, le paludisme est fortement saisonnier ou épidémique. Pour les zones où le risque dure de 4 à 6 mois, le paludisme est stable mais saisonnier. Là où le risque de transmission dure de 7 à 12 mois, la transmission est pérenne.

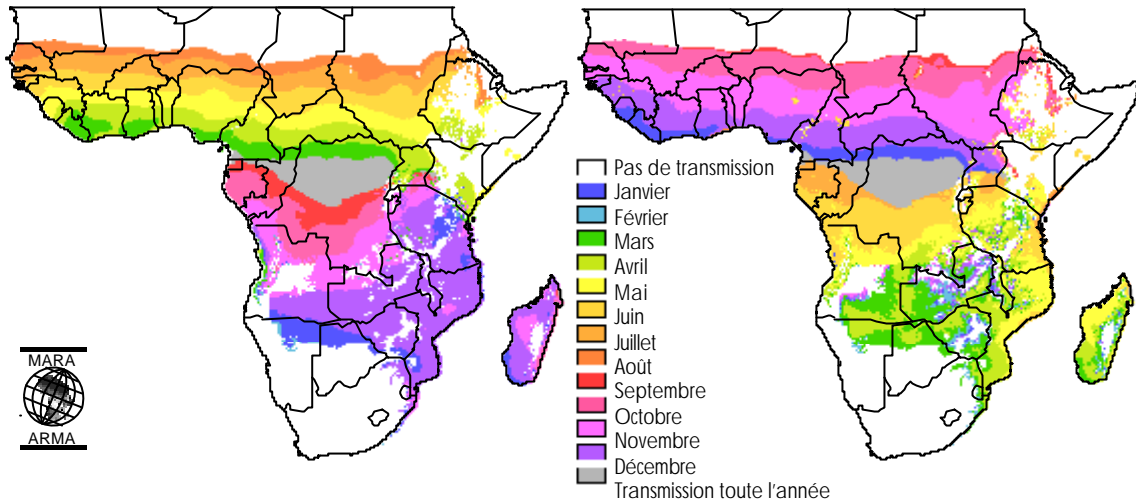
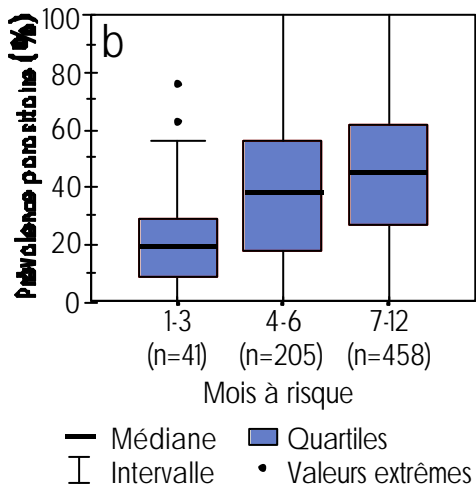
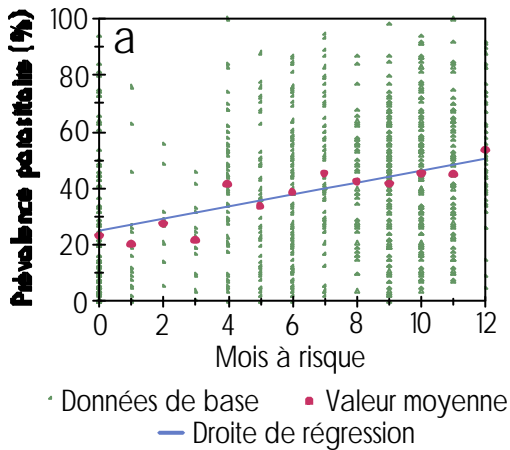


Figure 12. Début (a) et fin (b) de la période de transmission du paludisme. Pour les zones à deux saisons des pluies, cette carte représente la première saison.



Dans les zones à climat saisonnier, la moyenne de la température mensuelle doit être égale ou supérieure à 22°C et celle de la pluviométrie égale ou supérieure à 60 mm pour que le mois puisse être considéré comme faisant partie de la période de transmission. Il doit aussi y avoir au moins un mois de conditions très favorables (> 22°C et > 80 mm) dans la période considérée. Dans les zones de transmission stable, les moyennes mensuelles doivent être d'au moins 19,5°C pour la température, et 80 mm pour la pluviométrie, sans qu'il soit nécessaire d'avoir de mois avec des conditions très favorables. Tous les mois répondant aux conditions décrites ci-dessus sont pris en compte pour établir une carte faisant ressortir le nombre total de mois favorables, et donc la durée de la période de transmission (figure 11).

Figure 13 Relation entre les données MARA/ARMA et le nombre de mois à risque (calculé par le modèle climatique, figure 11) : (a) Prévalence parasitaire et le nombre de mois à risque (n=799, $r^2=0,1$, non significatif) ; (b) Les prévalences parasitaires de trois classes de longueur de période de transmission sont significativement différentes ($p<0,001$).



Ce procédé a aussi permis de calculer le début (figure 12a) et la fin (figure 12b) de la saison de transmission. La figure 12 ne représente que la première saison favorable de l'année. Une autre carte (non présentée ici) a été réalisée pour la seconde saison de transmission, lorsqu'elle existe. Une étude préliminaire a été faite sur la relation entre les données de PP dans la base de données MARA/ARMA, et le nombre de mois à risque. Toutes les enquêtes où la taille de l'échantillon est supérieure ou égale à 50 ont été sélectionnées, et les PP calculées par rapport au nombre de mois à risque. Une relation nette apparaît entre la moyenne des PP et le nombre de mois à risque (figure 13a). Toutefois la

variabilité des valeurs dans chaque catégorie est forte, et la corrélation statistique est donc faible. Cependant, en utilisant les trois classes de risque de la figure 11, les différences entre les PP moyennes dans ces classes sont significatives : $p < 0,001$ (figure 13b). Pour cette analyse, le processus de sélection des PP n'a pas tenu compte de la période de l'enquête, qui est importante dans les zones limites pour la transmission, où les PP sont moins stables. Ainsi, l'utilisation des mois à risque pour déterminer l'intensité de la transmission pourrait être améliorée en traitant séparément les zones stables et les zones instables, et en tenant compte de la saison de l'enquête.

Paludisme aux limites de la transmission

(Niveau sous-continental)

Où les épidémies de paludisme se produisent-elles ?

Les épidémies de paludisme surviennent dans les zones considérées comme n'étant pas à risque. En d'autres termes, cela signifie une saison particulièrement sévère dans une région considérée normalement comme étant à faible risque. Les facteurs susceptibles de déclencher des épidémies sont nombreux. Il peut s'agir de conditions climatiques plus favorables (et/ou plus longues) que d'habitude, de transformations de l'environnement par l'homme permettant une reproduction des moustiques impossible auparavant (irrigation, construction de barrages, déforestation). Ou bien encore de mouvements importants de personnes en provenance de régions impaludées, ou de personnes migrant de zones à faible risque vers des zones à transmission stable (réfugiés).

Pour explorer l'impact des fluctuations climatiques inter-annuelles sur la présence d'épidémies, des données climatiques annuelles ont été demandées à l'unité de recherche sur le climat de l'université de Norwich (CRU/SAMRC, 1998).

Ces données peuvent être utilisées pour rechercher l'influence du climat dans le temps. Les recherches sur les épidémies doivent se faire au niveau sous-continental à cause des différences importantes qui existent entre les types de climats rencontrés au Nord, à l'équateur et au Sud de l'Afrique. Pour débiter ce processus, un modèle de répartition du paludisme au niveau continental, basé sur une période de transmission de cinq mois, a été créé pour chaque année de 1951 à 1995 (années pour lesquelles les données étaient disponibles). Le nombre d'années (sur un total de 45) pendant lesquelles l'adéquation climatique dépassait 10% a été calculé avec ce modèle (figure 14).

La carte résultant de ce modèle est similaire au modèle de répartition original (figure 7). Ceci n'est pas surprenant, puisque si les conditions sont *favorables* pour *une année moyenne* (modèle original), la transmission se fera aussi plus fréquemment que si les conditions sont *défavorables* dans une année moyenne. Cependant, beaucoup reste à faire avant d'obtenir un modèle qui reflète les différences fondamentales à travers le continent, et qui soit validé en le comparant aux statistiques disponibles sur les épidémies.

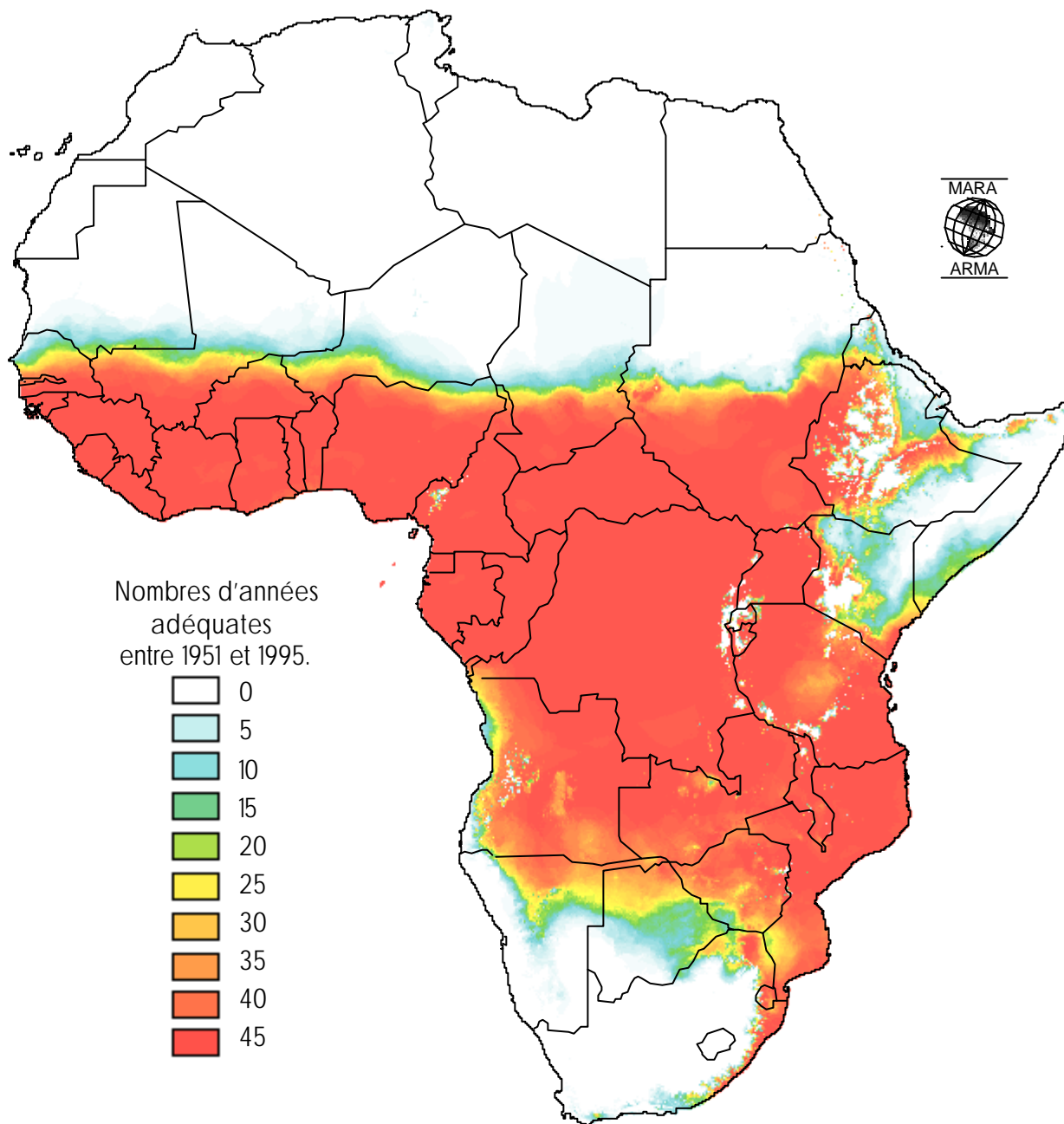
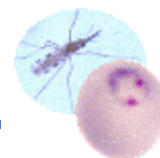


Figure 14. Nombres d'années, entre 1951 et 1995, où l'adéquation climatique pour la transmission du paludisme était d'au moins 10% pendant 5 mois consécutifs (données climatiques non disponibles pour Madagascar).



Modèles statistiques

(Niveau régional)

Extrapolation à partir des données empiriques

Au niveau régional, nous avons considéré le paludisme en termes de taux d'infections et de lien entre ces taux et les facteurs climatiques et environnementaux à l'échelle nationale / régionale. Ce niveau est encore trop général pour prendre en compte les facteurs qui causent des différences de transmission locales dans des zones qui semblent *a priori* homogènes. Au niveau régional, nous recherchons principalement des corrélations entre les données empiriques (PP et autres) et quelques facteurs environnementaux. Ces corrélations peuvent ensuite être utilisées pour des extrapolations vers les zones où il n'y a pas de données disponibles. L'analyse spatiale des données jouera un rôle de plus en plus important dans cette recherche, mais pour le moment, ces modèles sont encore purement statistiques.

Kenya

En dépit d'un nombre important de données publiées et non-publiées, les estimations empiriques de l'endémicité ne couvrent que 30% des régions du Kenya ayant une transmission stable (Omumbo *et al.*, 1997).

Les données d'enquêtes empiriques (limitées aux 124 études conduites après 1960, avec des échantillons sélectionnés au hasard de plus de 100 enfants âgés de 1 à 9 ans) ont été utilisées pour développer un modèle statistique de l'intensité de la transmission, basé sur le climat et d'autres variables (notamment NDVI).

Des analyses discriminantes ont déterminé de quelle manière ces variables pouvaient être utilisées pour distinguer trois classes d'endémicité du paludisme (forte > 70%, moyenne 20-70% et faible <20%). Le modèle a permis de classer 75% des zones

dans ces trois classes (intervalles de confiance 70 - 80%). Le modèle a ensuite été utilisé pour prédire les classes d'endémicité pour le reste du pays, où il n'y a pas de données empiriques (figure 15). Le modèle global de répartition du paludisme (figure 7) a été utilisé pour masquer toutes les zones à transmission instable. (adéquation climatique < 0,5)

Dans une deuxième étape, ce modèle a été utilisé pour estimer la mortalité et la morbidité palustres chez les enfants kenyans. Pour cela, les informations publiées et non-publiées sur la mortalité et la morbidité à différents niveaux d'endémicité ont été utilisées. Les données de population nationales pour les 1080 unités du 4ème niveau administratif (disponibles dans les statistiques du recensement de 1989) ont été extrapolées à l'année 1997. Ces données ont ensuite été combinées aux informations relatives à la mortalité et à la morbidité et au modèle de l'endémicité, pour estimer le nombre d'enfants affectés dans les zones à endémicité palustre forte, moyenne, faible ou instable. De cette manière, on a pu estimer que le paludisme tuait chaque jour 72 enfants âgés de moins de cinq ans, et que 400 autres développaient un paludisme clinique sévère (Snow *et al.*, 1998).

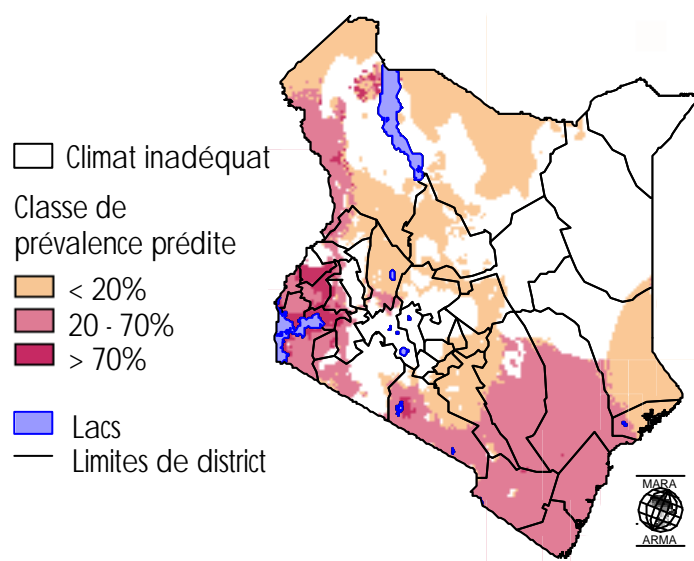


Figure 15. Prévalences parasitaires prédites pour le Kenya : élevée (PP>70%), intermédiaire (PP 20-70%) et faible (PP <20%).



En dépit de certaines faiblesses méthodologiques, une telle approche est bien meilleure que les estimations actuelles pour produire de l'information sur la couverture géographique du paludisme et ses graves conséquences pour le Kenya.

Mali

Un modèle similaire a été produit pour le Mali (Bagayoko *et al.* ; Kleinschmidt *et al.*, manuscrits en préparation). La prévalence du paludisme chez les enfants de moins de 10 ans a été modélisée. Des méthodes de régression statistiques multivariées ont été utilisées pour déterminer les facteurs les plus importants à prendre en compte parmi les suivants : température et pluviométrie (Hutchinson *et al.*, 1995), NDVI (FAO, 1991), distance par rapport aux points d'eau permanents (World Resources Institute, 1995) et densité de la population (Deichmann, 1996). Les facteurs environnementaux associés significativement aux PP étaient la longueur de la saison de transmission (nombre de mois avec une pluviométrie supérieure à 60 mm), la distance du point d'eau le plus proche, la température moyenne pendant les trois mois précédant la saison de pluies, la densité de population et enfin, l'index de végétation au cours de la saison sèche.

Il est intéressant de noter une relation en forme de U inversé entre la prévalence palustre et la distance au point d'eau le plus proche. La prévalence la plus élevée a été trouvée chez les populations vivant à une distance intermédiaire du point d'eau, et non pas chez les populations les plus proches. Ceci s'explique par le fait que les moustiques représentant une très grande nuisance près de l'eau, les populations s'en protègent avec des moustiquaires.

Le modèle a été ensuite appliqué aux zones climatiques pour prédire le risque du paludisme pour l'ensemble du Mali. Finalement, ce risque a été converti en 4 classes (risque élevé >70%, moyen 30-

70%, faible 10-30% et très faible <10%), voir figure 16.

Pour 70 des 101 études considérées dans l'analyse, la PP a été estimée correctement. Des analyses spatiales supplémentaires sont en cours pour identifier des facteurs additionnels jouant sur le risque palustre.

Acquis des modèles régionaux

Le modèle kenyan et le modèle malien ont tous deux fournis des résultats utiles, reflétant la réalité de ces pays. Différentes méthodes statistiques ont été utilisées : les données du Kenya ont été d'abord classées en différents niveaux d'endémicité. Les analyses ont ensuite permis de comprendre comment ces données pouvaient permettre de distinguer différentes classes d'endémicité. Au Mali, les prévalences parasitaires ont été directement utilisées dans une analyse multivariée.

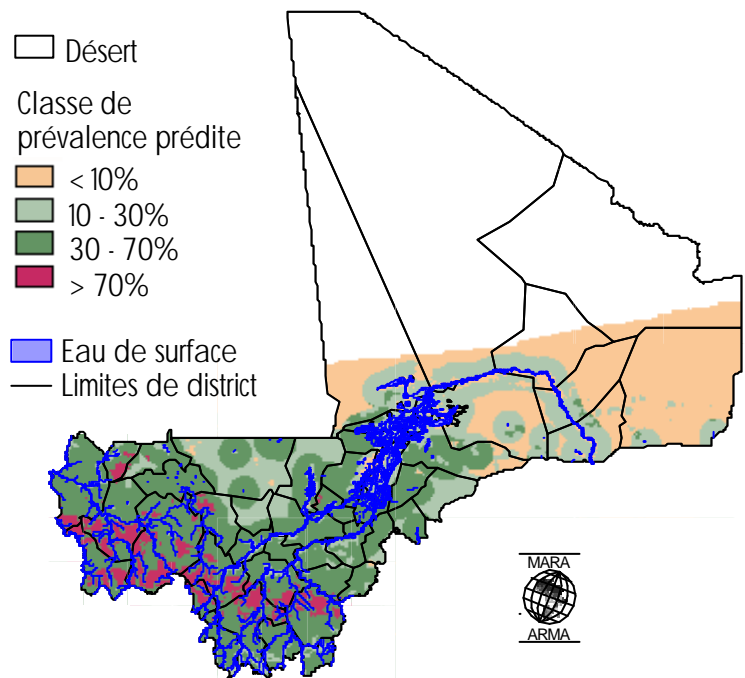


Figure 16. Prévalences parasitaires prédites pour le Mali : élevée (PP>70%), modérée (PP 50-70%), faible (PP 30-50%) et très faible (PP<10%).



Pourquoi différentes techniques ont-elles été utilisées ? Premièrement, cela illustre la nature exploratoire de ces études. Les tailles des échantillons et la répartition des données disponibles affectent aussi le choix des approches. En outre, le fait qu'il existe de grandes différences écologiques entre les différentes parties du continent signifie qu'il faut sélectionner la meilleure approche statistique pour chaque région. Le Mali et le Kenya sont deux pays très différents l'un de l'autre : les conditions naturelles changent énormément à l'intérieur du Kenya, où il y a deux saisons des pluies distinctes dans certaines régions, une saison des pluies ou même des pluies continues dans d'autres régions, des déserts et des forêts tropicales, un littoral et des montagnes très hautes. Quant au Mali, il est assez uniformément chaud, sans hautes montagnes, et avec une seule saison des pluies. Ces différences affectent certaines variables dans leur effet sur la PP. Une variable telle que "les précipitations de juin" peut

avoir un effet positif dans une région et un effet négatif dans une autre. L'interaction avec d'autres variables telles que "la température en juin" ou "les précipitations de mai" peut aussi varier.

Dans la phase finale de la collecte des données, des modèles de prédiction de l'endémicité seront mis au point pour tous les pays où sévit le paludisme. Différentes techniques seront utilisées selon les pays et les écologies, en fonction de la quantité, du type et de la qualité des données empiriques disponibles, et aussi en fonction des conditions climatiques et écologiques. La prochaine étape du projet verra davantage d'efforts consentis à l'utilisation et au développement de nouvelles techniques statistiques et spatiales, pour traiter des problèmes spécifiques que représentent les données MARA/ARMA. L'exactitude des modèles dépendra cependant de l'importance et de la précision des données disponibles sur le paludisme et l'environnement.

Chapitre 4

Projets apparentés

Paludisme des régions d'altitude

Pourquoi le paludisme des régions d'altitude est-il important ?

Récemment, beaucoup de questions se sont posées sur le paludisme dans les régions montagneuses d'Afrique. Ces dernières ont toujours été considérées comme des zones où la transmission du paludisme est faible, voire inexistante, principalement à cause des températures trop basses. Cependant, cette situation est en train de changer. Des données récentes montrent une augmentation du nombre des épidémies dans les zones montagneuses et dans les régions limitrophes. Parmi les raisons avancées pour expliquer ce changement, celles qui impliquent des changements climatiques et/ou écologiques sont les plus vraisemblables. Malheureusement, l'analyse précise s'est avérée difficile à cause du manque de données

fiables sur le paludisme pour la plupart des régions montagneuses d'Afrique.

Le paludisme épidémique représente un important problème de santé publique dans les régions montagneuses. Historiquement, le faible risque d'infection dans ces zones a mené à une situation de faible immunité fonctionnelle chez les populations locales, et à une mortalité élevée parmi les adultes et les enfants pendant les périodes d'épidémies. Parallèlement, les programmes de lutte contre le paludisme ne sont pas bien équipés pour identifier les épidémies à temps et pour y faire face. Il y a donc besoin d'une meilleure compréhension de l'épidémiologie du paludisme des régions montagneuses, ainsi que d'une meilleure capacité de la surveillance et de réponse épidémique. Le Projet HIMAL, né d'un atelier du TDR à Addis Abéba en 1996, va dans ce sens.



Qu'est-ce que HIMAL ?

Le projet "Epidémiologie du paludisme des régions d'altitude en Afrique" (HIMAL) a été financé par le programme TDR et le CRDI dans le cadre de la collaboration MARA/ARMA. Ce projet vise à collecter des données sur la parasitémie, les indices spléniques et les épidémies, afin d'examiner les évolutions récentes de la transmission du paludisme dans les régions montagneuses. Le projet vise aussi à délimiter les zones à risque pour le paludisme dans ces régions, et à évaluer l'utilité du modèle climatique de répartition du paludisme (figure 7).

Ce travail a impliqué une série de visites dans les pays à paludisme d'altitude et une bonne coordination avec les institutions locales de recherches et les programmes de lutte afin d'obtenir la plus grande quantité possible de données. A ce jour, plus de 300 rapports ont été

dépouillés pour neuf pays (Ethiopie, Kenya, Tanzanie, Ouganda, Burundi, Rwanda, Cameroun, Zimbabwe et Madagascar) avec des données sur les PP dans plus de 900 localités.

En Afrique de l'Est, les premiers résultats ont montré que le modèle climatique de répartition du paludisme peut fournir une bonne indication des zones de transmission instable du paludisme. De plus, nous avons utilisé les informations sur la répartition historique des épidémies pour produire des cartes de risque pour les épidémies dans chaque pays en nous basant sur l'altitude (figure 17).

Il s'agit là de produits exploratoires, mais les indications initiales montrent que cette carte correspond bien à l'opinion des experts nationaux (chercheurs et responsables des programmes de lutte).

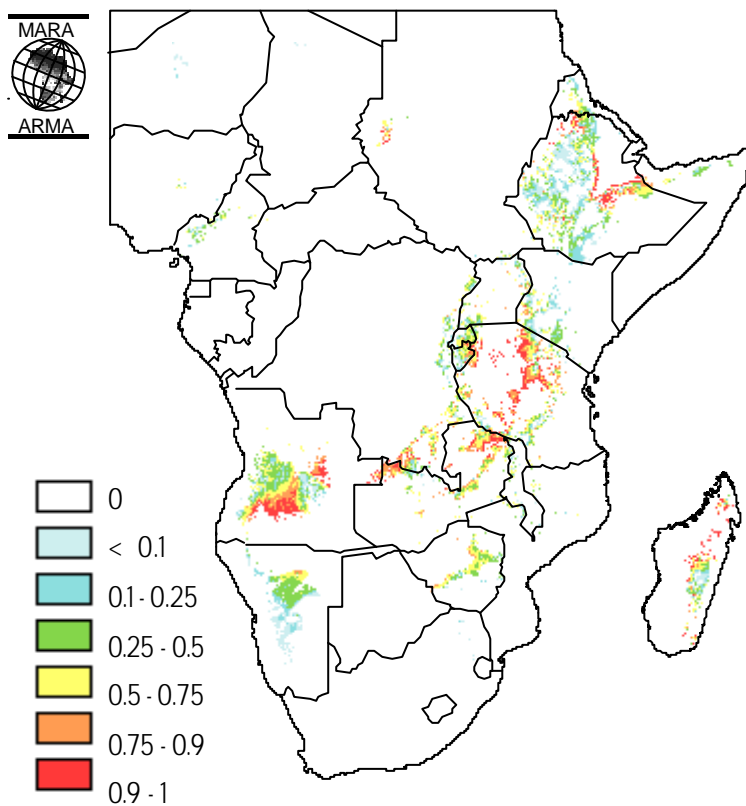


Figure 17. Zones d'altitude (au-dessus de 1300 m) et adéquation climatique pour la transmission du paludisme (d'après figure 7). Cette carte montre donc les zones ayant potentiellement du paludisme d'altitude.

Le projet HIMAL va ensuite concentrer ses efforts sur la collecte de données prospectives sur le paludisme, par une surveillance améliorée dans les régions d'altitude. En particulier, un atelier a été organisé en 1999 avec des chercheurs et des responsables de programmes de lutte au niveau local. Cet atelier devrait permettre d'élaborer des systèmes de surveillance durables, incluant des compétences en matière de SIG et un système d'alerte précoce.

Collecte des données sur le vecteur

Il y a trois principaux vecteurs du paludisme en Afrique : *Anopheles funestus* et deux espèces du complexe *Anopheles gambiae* : *An. gambiae* s.s. et *An. arabiensis*. Les autres espèces du complexe *An. gambiae* : *An. merus*, *An. melas*, *An. bwambae* et *An. quadriannulatus* (espèces A et B), sont soit des vecteurs moins importants soit ne sont pas impliqués dans la transmission.



Toutes les espèces de cette famille sont pratiquement identiques du point de vue morphologique et il faut des techniques sophistiquées pour les identifier correctement.

Les données relatives à la répartition de ces espèces sont importantes parce qu'elles n'ont pas les mêmes comportements, et qu'elles diffèrent aussi quant à leur capacité à transmettre le paludisme. Les espèces *An. funestus* et *An. gambiae* s.s. sont largement associées à l'être humain et à son habitat, et préfèrent se nourrir sur

des humains et se reposer à l'intérieur des maisons. *An. arabiensis*, par contre, se nourrit sur les êtres humains ou sur le bétail, se repose à l'intérieur ou à l'extérieur des maisons, et est un peu moins efficace dans la transmission. Différentes stratégies de lutte sont donc nécessaires pour combattre ces diverses espèces. Par exemple, la pulvérisation des domiciles avec des insecticides à effet prolongé sera efficace contre *An. funestus* et *An. gambiae*, mais le sera moins contre *An. arabiensis*.

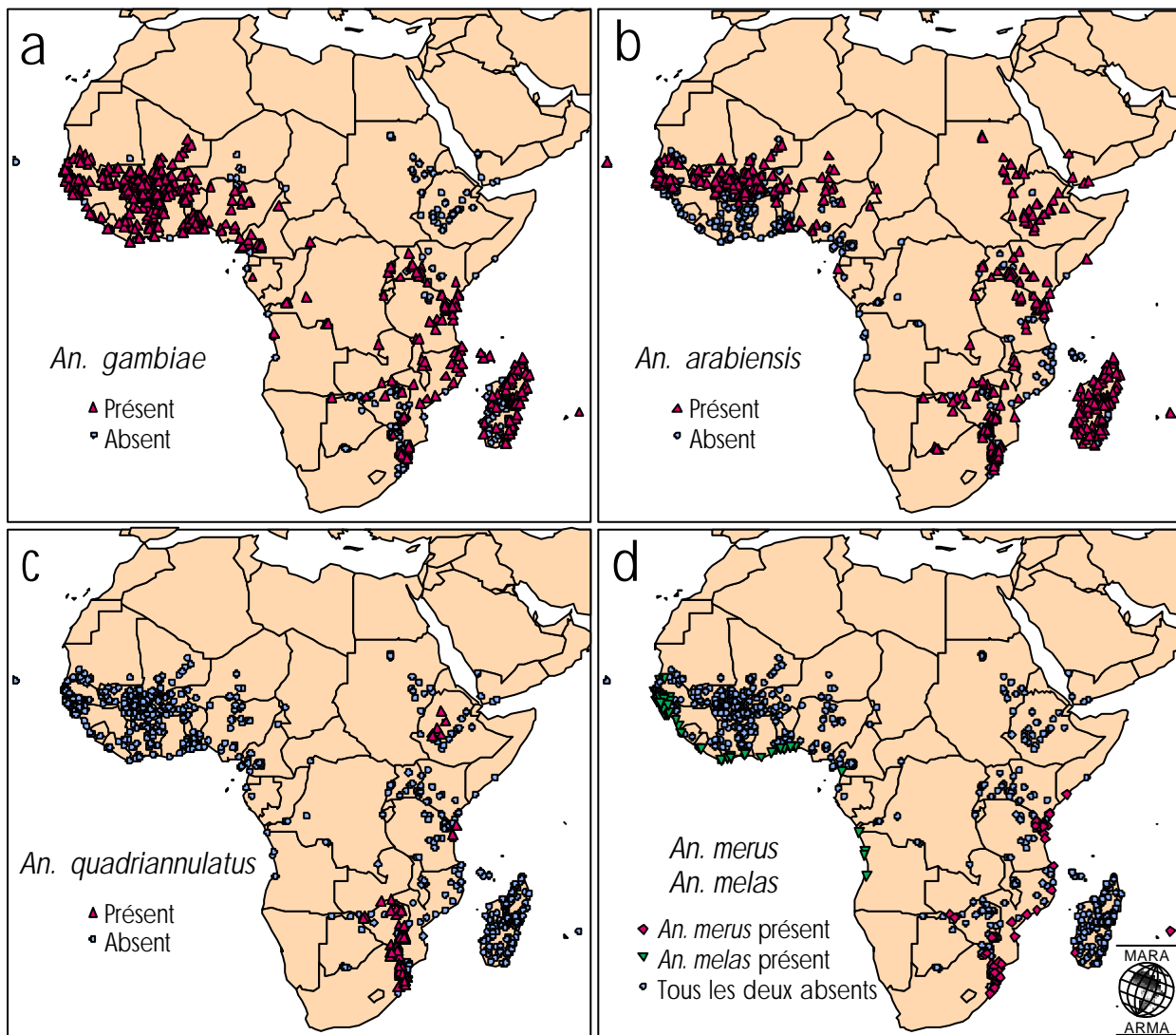
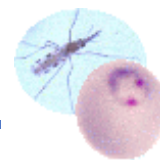


Figure 18. Capture enregistrée de (a) *An. gambiae* s.s. ; (b) *An. arabiensis* ; (c) *An. quadriannulatus* and (d) *An. merus* & *melas*.



Des cartes de répartition d'*An. funestus* et du complexe *An. gambiae* ont été produites par Gillies et de Meillon il y a trente ans (Gillies et de Meillon, 1968). Cette source importante a été mise à jour pour le complexe *An. gambiae*, et les figures 18a-d montrent la répartition connue des membres de ce groupe. Les données sont tirées principalement de publications parues depuis 1962. Des données antérieures à cette date, pour lesquelles l'identification des espèces est

basée uniquement sur la tolérance à la salinité sont aussi incluses, tout comme les identifications faites à partir d'expériences de cross-mating. Les zones sans point ne correspondent pas nécessairement à une absence de moustiques, mais plutôt à l'absence de publication sur l'identification de ces espèces dans ces zones.

Chapitre 5

Conclusions et perspectives

Produits MARA/ARMA à l'intention des responsables de programmes de lutte contre la paludisme

La collaboration MARA/ARMA a commencé à diffuser ses productions au niveau national et international. Les cartes du modèle climatique de répartition (figure 7) fournissent, souvent pour la première fois, une information complète de la répartition du paludisme dans leur pays aux responsables des programmes nationaux de lutte contre le paludisme. Ces cartes se sont déjà avérées utiles dans beaucoup de pays. Au-delà de leur avantage évident pour la planification des activités de contrôle, elles sont un support visuel attractif pour les discussions avec les hommes politiques et les planificateurs. A l'avenir, ces cartes seront complétées par des données sur les populations vivant dans les zones à différents niveaux de risque, avec si possible un niveau de détail jusqu'au second niveau administratif (le district).

Au niveau régional, de telles cartes de répartition pourraient aider des pays voisins à discuter et à planifier la lutte contre leurs problèmes de paludisme de manière coordonnée, afin d'optimiser l'utilisation des ressources. Dans les zones frontalières (comme par exemple entre l'Afrique du Sud et le Mozambique), la lutte contre le paludisme peut poser des problèmes spécifiques, notamment si les moyens mis en oeuvre pour la lutte contre le paludisme ne sont pas au même

niveau de part et d'autre de la frontière. L'augmentation de la résistance aux insecticides, ainsi que beaucoup d'autres problèmes pratiques, pourraient aussi figurer sur les cartes régionales.

Enfin, au niveau continental, la base de données, les cartes et les données sur les populations à risque produites par la collaboration MARA/ARMA devraient fournir un outil de planification utile aux agences internationales, et ceci spécialement dans le contexte actuel de l'intérêt relancé pour la lutte contre le paludisme (initiative "Roll Back Malaria" ou "faire reculer le paludisme").

Ce rapport technique souhaite donner une vue d'ensemble des activités actuelles MARA/ARMA. Nous espérons que ce rapport aidera aussi bien les responsables des programmes de lutte que les agences internationales à avoir une idée plus claire des possibilités offertes par la cartographie sanitaire en général et par la collaboration MARA/ARMA en particulier. Nous réserverons le meilleur accueil à toutes les remarques et suggestions sur notre travail et les considérerons comme d'utiles contributions pour l'avenir de cette entreprise. Nous vous invitons donc à remplir et à nous faire parvenir le questionnaire ci-joint. Notre souhait est que MARA/ARMA soit un instrument utile à tous ceux qui luttent contre le paludisme en Afrique.



Produits MARA/ARMA à l'intention des chercheurs sur le paludisme

Le travail réalisé dans le cadre de la collaboration MARA/ARMA a permis de préciser l'épidémiologie du paludisme au niveau continental. Certains des travaux présentés dans le présent rapport soulignent les possibilités de recherche à partir des données empiriques complètes et des SIG, pour étudier le paludisme en Afrique. Ce travail encore inachevé, permettra, nous l'espérons, à d'autres projets de recherche de voir le jour, tant au niveau national que continental.

Le chemin restant à parcourir

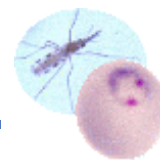
La collaboration MARA/ARMA a déjà parcouru un long chemin : (1) en créant cinq centres régionaux fonctionnels, et une infrastructure de collecte de données au niveau continental, et (2) en élaborant avec succès un modèle de prévision climatique. La collaboration a démontré la faisabilité d'une approche pluri-disciplinaire et internationale pour s'attaquer au problème des risques de paludisme sur le continent.

Quelle direction la collaboration MARA/ARMA va-t-elle prendre ? Premièrement, la collecte des données va se poursuivre pendant au moins deux années supplémentaires, jusqu'à ce que toutes les sources possibles aient été utilisées. Plusieurs pays n'ont pas encore été visités et certaines des données n'ont pas été récupérées. Jusqu'à présent, aucun coordonnateur de la collecte des données n'a pas été nommé en Afrique australe, pour des raisons financières, et la collecte des données s'en est donc trouvée affectée. La base de données est la principale ressource de la collaboration, et il est donc prioritaire de la compléter.

En second lieu, les modèles environnementaux du paludisme seront encore affinés pour le continent. Ce processus devrait aboutir à l'amélioration de l'ensemble des cartes sur le paludisme. Les modèles pourraient aussi servir de point de départ pour la prévision des effets sur le paludisme des changements climatiques. Au niveau national, le processus de modélisation statistique commencé au Kenya et au Mali sera étendu à d'autres pays et à d'autres régions. Les méthodes statistiques seront encore affinées, et intégreront à l'avenir les statistiques spatiales. Ceci permettra d'accroître aussi bien le nombre de cartes détaillées sur l'endémicité, que les cartes des populations avec différents niveaux de risque.

Le produit final de la collaboration MARA/ARMA sera un atlas des risques de paludisme pour l'ensemble du continent, à la fois sous forme d'ouvrage et en format numérique. Il comprendra les cartes nationales de l'endémicité, du caractère saisonnier, ainsi que de la répartition des principaux vecteurs. Il est prévu que d'autres données, telles que la résistance aux médicaments ou l'utilisation de moustiquaires, soient aussi incluses lorsqu'elles seront disponibles. Une version électronique sera enfin mise sur Internet pour permettre un large accès. L'objectif final est de produire un atlas numérisé permettant (1) une mise à jour continue, (2) des possibilités d'extraction sélective des données, et (3) d'affiner les cartes de répartition du risque du paludisme en Afrique.

Finalement, notre souhait est que cette collaboration puisse servir de modèle pour élaborer d'autres systèmes d'information à grande échelle sur les maladies, en Afrique et dans d'autres régions en voie de développement.



Références bibliographiques

- Cattani, J. A., J. S. Moir, F. D. Gibson, M. Ginny, J. Paino, W. Davidson and M. P. Alpers. 1986. Small-area variations in the epidemiology of malaria in Madang Province. *Papua New Guinea Medical Journal* **29** : 11-17.
- Clyde, D. F. 1967 *Malaria in Tanzania*, London, Oxford University Press.
- Craig, M. H., R. W. Snow and D. le Sueur. 1998. A climate-based distribution model of malaria transmission in Africa. *Parasitology Today*, in press.
- CRU/SAMRC. 1998. *African Monthly climate data 1951-1995*, Edition 1, CD-ROM. Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, NR4 7TJ, United Kingdom.
- De Meillon, B. 1934. Observations on *Anopheles funestus* and *Anopheles gambiae* in the Transvaal. *Publications of the South African Institute for Medical Research* **6** : 195.
- Deichmann, U. 1996. *Africa population database*, Internet. National Center for Geographic Information and Analysis, United Nations Environment Programme, World Resources Institute, www.grid2.cr.usgs.
- De Savigny, D and P. Wijeyaratne (eds). 1995. *GIS for Health and the Environment*. Proceedings of an International Workshop, Colombo, Sri Lanka, 5-10 September 1994.
- Detinova, T. S. 1962. Determination of the epidemiological importance of populations of *Anopheles maculipennis* by their age composition. In : *Age Grouping Methods in Diptera of Medical Importance, with Special Reference to Some Vectors of Malaria*, World Health Organization, Geneva.
- FAO. 1991. *FAO - Artemis NOAA AVHRR NDVI Image Bank Africa 1981-1991*, CD-ROM. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations Remote Sensing Center, NASA Goddard Space Flight Center (GSFS), Africa Real Time Environmental Monitoring Information System (ARTEMIS).
- GDE Systems Inc. 1995. *Geoname Digital Gazetteer Version 1*, CD-ROM.
- Gill, C. A. 1938 *The seasonal periodicity of malaria and the mechanism of the epidemic wave*, London, Churchill.
- Gillies, M. T. and B. de Meillon. 1968 *The Anophelinae of Africa South of the Sahara*, Johannesburg, The South African Institute for Medical Research.
- Hutchinson, M. F., H. A. Nix, J. P. McMahan and K. D. Ord. 1995. *Africa - A topographic and climatic database*, Edition 1, CD-ROM. Center for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia.



- Jambulingham, P., S. S. S. Mohapatra, P. Govardhini, L. K. Das, A. Manoharan, S. P. Pani and P. K. Das. 1991. Microlevel epidemiological variations in malaria and its implications on control strategy. *Indian Journal of Medical Research [A]* **93** : 371-378.
- Leeson, H. S. 1931 *Anopheline Mosquitos in Southern Rhodesia*, London, The London School of Hygiene and Tropical Medicine.
- Lengeler, C. 1998. *Insecticide-treated bednets and curtains for malaria control (Cochrane review)*. The Cochrane Library, Issue 3, 1998. Oxford : Update Software.
- Lysenko, A. Y. and I. N. Semashko. 1968. Geography of malaria. In : Lebedew, A. W. (ed.) . *Medical Geography*, Academy of Sciences USSR, Moscow.
- Macdonald, G. 1957 *The Epidemiology and Control of Malaria*, London, Oxford University Press.
- Martens, W. J. M. 1997. *Health Impacts of Climate Change and Ozone Depletion : An Eco-Epidemiological Modelling Approach*. Doctoral thesis, Maastricht University.
- Metselaar, D. and P. M. Van Theil. 1959. Classification of malaria. *Tropical and Geographical Malaria* **11** : 157-161.
- Microsoft. 1998. *Encarta World Atlas*, CD-ROM. Microsoft Corporation.
- Nelson, G. S. 1959. *Atlas of Kenya* Edition 1. Surveys of Kenya, Crown Printers, Nairobi.
- Omumbo, J. A., J. Ouma, B. Rapuoda, M. H. Craig, D. le Sueur and R. W. Snow. 1997. Mapping malaria transmission intensity using geographical information systems (GIS) ; an example from Kenya. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology* **92** : 7-21.
- Sharp, B. L. and D. le Sueur. 1996. Malaria in South Africa - the past, the present and selected implications for the future. *South African Medical Journal* **86** : 83-89.
- Smith, T., J. D. Charlwood, W. Takken, M. Tanner and D. J. Spiegelhalter. 1995. Mapping the densities of malaria vectors within a single village. *Acta Tropica* **59** : 1-18.
- Snow, R. W., M. H. Craig, U. Deichmann and D. le Sueur. 1998. A continental risk map for malaria mortality among African children. *Parasitology Today*, in press.
- Snow, R. W., E. Gouws, J. A. Omumbo, B. Rapuoda, M. H. Craig, F. C. Tanser, D. le Sueur and J. Ouma. 1998. Models to predict the intensity of *Plasmodium falciparum* transmission : applications to the burden of disease in Kenya. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, in press.
- Snow, R. W., J. A. Omumbo, B. Lowe, C. S. Molyneux, J. O. Obiero, A. Palmer, M. W. Weber, M. Pinder, B. Nahlen, C.



Obonyo, C. Newbold, S. Gupta and K. Marsh. 1997. Relation between severe malaria morbidity in children and level of *Plasmodium falciparum* transmission in Africa. *Lancet* **349** : 1650-1654.

Wilson, D. B. 1956. *Atlas of Tanzania* Edition 3. Survey Division, Department of Lands and Surveys, Government Printers, Dar es Salaam.

World Health Organization. 1951. *Report of the malaria conference in equatorial Africa, Kampala, 1950* (Report). Technical Report Series 38, WHO, Geneva.

World Health Organization. 1994. World malaria situation in 1991. *Bulletin of the World Health Organization* **72** : 160-164.

World Resources Institute. 1995. *Africa Data Sampler*, Edition 1, CD-ROM.

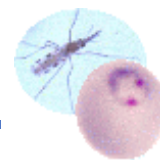
Zadeh, L. A. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* **8** : 338-353.



Annexe 1 :

Publications MARA/ARMA

- Snow, R. W., K. Marsh, and D. le Sueur. 1996. The need for maps of transmission intensity to guide malaria control in Africa. *Parasitology Today* **12** : 455-457.
- Le Sueur, D., F. Binka, C. Lengeler, D. de Savigny, R. W. Snow, T. Teuscher and Y.T. Touré. 1997. An atlas of malaria in Africa. *Africa Health* **19** : 23-24.
- Omumbo, J. A., J. Ouma, B. Rapuoda, M. H. Craig, D. le Sueur and R. W. Snow. 1998. Mapping malaria transmission intensity using geographical information systems (GIS) ; an example from Kenya. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology* **92** : 7-21.
- Craig, M. H., R. W. Snow, and D. le Sueur. 1999. A climate-based distribution model of malaria transmission in Africa. *Parasitology Today*. In press.
- Snow, R. W., M. H. Craig, U. Deichmann, and D. le Sueur. 1999. A continental risk map for malaria mortality among African children. *Parasitology Today*. In press.
- Coetzee, M., M. H. Craig, and D. le Sueur. 1999. Mapping the distribution of members of the *Anopheles gambiae* complex in Africa and adjacent islands. *Parasitology Today*. Submitted.
- Snow, R. W., E. Gouws, J. A. Omumbo, B. Rapuoda, M. H. Craig, F. C. Tanser, D. le Sueur, and J. Ouma. 1998. Models to predict the intensity of *Plasmodium falciparum* transmission : applications to the burden of disease in Kenya. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* **92** : 601-606.
- Bagayoko, M., I. Kleinschmidt, N. Sogoba, M. H. Craig, D. le Sueur and Y. T. T. Touré. 1999. Mapping malaria risk in Mali. In preparation.
- Kleinschmidt, I., G. P. Y. Clarke, M. Bagayoko, M. H. Craig and D. le Sueur. 1999. A spatial statistical approach to malaria mapping. In preparation.



Annexe 2 :

Groupes de données sur l'environnement

Données climatiques : Une base de données topographiques et climatiques (CD-ROM)

M.F. Hutchinson, H.A. Nix, J.P. McMahon and K.D. Ord, 1995, Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia

Données topographiques : African Data Sampler (CD-ROM)

World Resources Institute (WRI), 1995, 1709 New York Ave., NW, Washington, DC 20006, USA

Données sur la population : African population database (public domain)

U. Deichmann (uwe@ncgia.ucsb.edu), 1996, National Centre for Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara, CA 93106

<http://grid2.cr.usgs.gov/globalpop/africa>

Zones peuplées : Geoname Digital Gazetteer v.1 (CD-ROM)

GDE Systems, Inc., 1995, P.O. Box 509009, San Diego, CA 92150-9009

<http://www.GDEsystems.com>

Données d'altitude : Global DEM (public domain)

EROS Data Centre (EDC), 1996, U.S. Geological Survey

<http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtopo30/gtopo30.html>

NDVI : Artemis NOAA AVHRR NDVI Image Bank Africa 1981-1991 (CD-ROM)

Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations Remote Sensing Centre ; 1991, NASA Goddard Space Flight Centre (GSFS) ; Africa Real Time Environmental Monitoring Information System (ARTEMIS), NASA Goddard Space Flight Centre, Greenbelt, MD 20771, USA

Classification de la couverture terrestre (public domain)

R.S. DeFries, M. Hansen, J.R.G. Townshend and R. Sohlberg, 1998, Laboratory for Global Remote Sensing Studies, Department of Geography, 2181 LeFrak Hall, University of Maryland at College Park, College Park, MD 20742-8225, USA

<http://www.geog.umd.edu/landcover/8km-map.html>

Personnes ayant contribué à MARA/ARMA

Données MARA/ARMA et HIMAL

Burkina Faso : R.T. Guiguiemde (OCCGE) • Mme Dao (SEGIS) • Côte d'Ivoire : A. Asidi Ndongidila, A.-M. Ouassa (ADRAO) • Abega (MS) • Ethiopie : T. Seboxa (Université d'Addis Abéba) • A. Kebede (Amhara Health Bureau), T. Abose (MS) • Gabon : M.Y. Kombila, (Faculté de Médecine, Libreville) • E. Nzanga (MS, Hôpital Melen) • Ghana : K. Arned, S. Bugri, A. Wilmot, E.G. Beausoleil (MS) • C. Tettey, G. Armah, K. Koram (University of Ghana) • B.M. Dadzie (Ho Government Hospital) • Guinée Equatoriale : M. Nguema (OMS) • Kenya : B.A. Rapuoda, J.H. Ouma (MS) • B. Nahlen (CDC / KEMRI Kisumu) • C. Mbogo (KEMRI Kilifi) • M. Mutunga (KEMRI / CRC Nairobi) • Mali : N. Sogobar (MRTC Bamako) • O. Doumbo (DEAP / MRTC Université du Mali) • Ouganda : A. Kilian (GTZ Basic Health Services) • République Centrafricaine : M. Nestor (MS) • Tanzanie : A. Mwitwa, R. Mandike (MS) • J. Rugelamila, V. Mvungi, W. Kilama, A. Kitua (NIMR Dar es Salaam) • K. Njunwa, G. Mwaiko (NIMR Amani) • J. Minjas, Z. Premji, L. Msamanga, J. Killewo (Muhimbili University College of Health Sciences) • R. Njau, A. van der Broek (OMS) • O. Mella, Z. Lukmonji (Tanzania Food and Nutrition Centre) • Marijani (Urban Malaria Control Project (UMCP), Dar es Salaam) • H. Kasale (UMCP Tanga) • A. Kitua, J. Schellenberg, H. Mshinada (Ifakara Centre for Health Research and Development) • I. Rooth (Nyamasati Malaria Research Unit) • F. Mosha (Tanzania Pesticides Research Institute, Arusha) • D. Mtwasiva (Dar Urban Health Project) • C. Kihamia (UKUMTA) • D. Ocheng (AMREF) • Magembe (University Library) • F. Maulidi, Library staff (UNICEF) • Tchad : I.D. Gouni (MS) • Zimbabwe : T. Freeman • Europe : P. van den Herder (Archive OMS/CTD) • C. Auer, C. Schneider (Bâle) • P. Guillet (Montpellier) • E. Millet (ORSTOM, Paris) • U. d'Alessandro, F. Alves (Anvers) • V. Rosario (Lisbonne) • J. Hill (Liverpool School of Tropical Medicine) • D. Arnot (Edinburgh University) • R. Sturrock, B. Greenwood (London School of Hygiene & Tropical Medicine) • R. Leuenberger

Mekuria, S.C. Luen, R.L. Turner, G.B. White, V. Ariaratuam, B. Feinstein, M. Fettene • Gabon : A.S. Badawi • Gambie : J.H. Bryan, A.W.R. McCrae, W.F. Snow, M.T. Gillies, J.F. Invest • Ghana : L.F. Delfini, G. Kudicke, R. Iyengar • Guinée : A.S. Badawi, G.E. Bakri, V. Pansini, V. Bespiatov • Kenya : J.E. Hudson, A.G. Carmichael, M.H.M. Abulcader, G.P. Joshi, R.R. Fritz, R.B. Highton, J.A. Chandler, J.H. Bryan, S. Digo, A.W.R. McCrae • Liberia : R.S. Bray, G. Pichou, B.K. Mason, Dr le Du, Per Hedman, B. Colussa • Madagascar : G. Chauvet, S. Laventure • Mali : Y. Touré, J. Coz • Mauritanie : G. Pichou, J.A. Huddleston • Maurice : C.M. Courtois, C.C. Draper, F. Gebert, A.R. Gapaul • Mozambique : J. de Sousa, A. du Silvo Carvalhosa, J. Clarke, C.L. Hatch, M. de C. Pereira, G.E. Bakri, Dr le Du, N. Cuamba • Niger : J. Coz • Nigéria : N. Rishikesh, V. Ramakrishna, R. Elliott, G.E. Bakri, R.B.I. Otitoju, S. Dike, M.W. Service, C.D. Ramsdale, C. Cywinski, N.A. Aslam, J.S. Dodge, P. Rosen, A.M. Robertson, G. Shidrawi, J. Clarke, C.V. Foll, F.R.S. Kellet • Ouganda : G. Shidrawi, E. Ouori, G.B. White, A.W.R. McCrae, L.G. Mukwaya • République Centrafricaine : A.S. Badawi • Réunion : R. van de Vyver, R. Girod • Sénégal : M. Sarr, G. Morcos, D. Goethals, J. Coz • Sierra Léone : J. Storey, O.J. Beltran • Somalie : A.M. Haridi, A.A.M. Djeloutik • Soudan : R.L. Turner, S.R. Chowdhury, J. Akiyama, M.A. Akood, A.M. Haridi • Swaziland : S.K. Sobti, D.M. Eckard, V. Ramakrishna, P.M. Mathews, J.J.P. la Grange • Tanzanie : A.E.P Mnzava, J.E. Hudson, G.B. White, F.M. Bushrod, A. Smith, F. Mosha, J. Clarke, N. Kolstrup, P. Wegesa, M.T. Gillies, G. Pringle, G.D. Chetty, S.K. Sobti, Y.S. Kim, G.E. Bakri, J.A. Odetoyinbo, G.M. Versi, D. Goethals, J. Storey, C. Shiff, E. Temu • Tchad : G. Morcos • Togo : G. Houel, G.E. Bakri, S. Adrieu, G. Pichou, J. Brengues, S. Sales, R. Iyengar, A. Geller, V. Pansini • Yémen : R.L. Koumetsov, S.A. Smith • Zambie : J. Hadjinicolaou, H.E. Paterson, A.J. Shelley • Zimbabwe : J. Hadjinicolaou, C.A. Green, R.H. Hunt, H.E. Paterson, J. Govere • Europe : G. Davidson, R. Page (London School of Hygiene and Tropical Medicine) • C. Ravaonjanahary, P. Carnevale (OMS).

Données sur le vecteur

Afrique du Sud : G. van Eeden, S.J. Miles, A. Smith, A. Gericke • Angola : H. Ribeiro • Bénin : A.S. Badawi, G. Pichou, S. Sales • Arabie Saoudite : G. de Almeida • Botswana : R. Abdulla-Khan • Burkina Faso : R. Subra, J. Coz, J. Hamon • Cameroun : B. Colussa, A. Garcia Morilla, L.F. Delfini, P. Capravi, E.P. de Grimaldo, H. Bailly-Choumara • Côte d'Ivoire : J. Coz, J. Hamon, P. Carnevale • Ethiopie : N. Rishikesh, Y.