

Paludisme et schistosomose : deux exemples d'utilisation des systèmes d'information géographique et de la télédétection à Madagascar.

I. Jeanne

Institut Pasteur de Madagascar, BP 1274, Antananarivo 101, Madagascar. E-mail : ijeanne@pasteur.mg

Manuscrit n° 2155/RIP1. 3e colloque du réseau international des Instituts Pasteur et instituts associés. 14-15 octobre 1999, Institut Pasteur de Paris.

Summary: Malaria and schistosomiasis: two examples using systems of geographical information and teledetection in Madagascar.

Schistosomiasis and malaria constitute major health problems in Madagascar. The main objectives of the national schistosomiasis control programme - launched in 1998 - are to improve knowledge about the modes of transmission of the disease and conduct mass treatment in hyperendemic areas, so as to lower incidence rates. A Geographic Information System (GIS) was established aiming to conduct a series of remote sensing studies based on digital image processing and analysis from Landsat TM and panchromatic Spot. The importance of local environmental and geographic characteristics in the Ihoay region such as proximity to roads and water were assessed by spatial analysis in order to construct a predictive model of Schistosoma mansoni endemicity. Unstable transmission in the Central Highlands of Madagascar caused severe outbreaks of malaria in the 1980s. Attempts to prevent such events reoccurring have been highlighted in the national malaria control programme. Thanks to intense vector control measures introduced in the area over a five-year period, a marked decrease in incidence of malaria was observed. This region borders on the Highlands as well as southern areas, allowing for vector control evaluation. The GIS and remote sensing system were applied to analyse ricefield areas, where the main vector are Anopheles funestus. Rice field surfaces were statistically linked with abundance of vectors evaluated by entomological parameters.

Résumé :

Les schistosomoses et le paludisme sont deux problèmes de santé publique majeurs à Madagascar. Un programme national de lutte contre les schistosomoses a débuté en 1998. Les objectifs sont la baisse de morbidité par traitement de masse au niveau des villages hyperendémiques et une meilleure connaissance des facteurs influençant la transmission. Les informations issues du traitement d'images des satellites Landsat TM et Spot panchromatique ont été utilisées dans le cadre d'un système d'information géographique afin de proposer un modèle prédictif de prévalence de la schistosomose due à S. mansoni dans la région de Ihoay. D'autre part, la problématique actuelle du service de lutte antipaludique du ministère de la santé est de prévenir l'apparition de nouvelles épidémies dans la région des Hautes Terres Centrales, zone de paludisme instable. Les mêmes images satellites ont été utilisées pour étudier certains facteurs favorisant l'abondance des vecteurs et, par là-même, l'augmentation du risque de transmission. Les résultats préliminaires de ces études montrent une liaison significative entre la prévalence à la schistosomose à S. mansoni et des facteurs géographiques, ainsi qu'une liaison entre l'abondance de certains vecteurs du paludisme et la surface des rizières. Les analyses spatiales ont pu se faire grâce à l'apport de la télédétection et la création d'un système d'information géographique.

*schistosomiasis
malaria
geographic information
system
GIS
remote sensing
Landsat TM
panchromatic Spot
anopheles*

*schistosomose
paludisme
système d'information
géographique
SIG
télédétection
Landsat TM
spot panchromatique
anophèle*

Introduction

La prise en compte des facteurs environnementaux dans les maladies infectieuses transmises par un vecteur et/ou un hôte intermédiaire est maintenant facilitée par de nouveaux outils de recueil et d'exploitation de données: la télédétection par satellite, le positionnement par satellite (GPS), du matériel informatique et des logiciels de traitement d'images et de gestion de base de données de plus en plus performants et accessibles. Ces techniques nous offrent ainsi de nouvelles possibilités d'analyse spatiale et temporelle des événements.

Nous proposons ici d'étudier l'apport de ces nouveaux outils que sont les systèmes d'information géographiques (SIG), le GPS et la télédétection (cf. définitions annexe), et leur contribution à répondre à des questions fondamentales concernant deux problèmes de santé publique majeurs à Madagascar, la schistosomose due à *S. mansoni* et le paludisme, tout en tenant compte du contexte et des moyens des structures locales.

Encore rares sont les travaux de télédétection traitant des schistosomoses. Ces travaux, cherchant à déterminer des zones à risque (1, 6), ont utilisé des images de satellites météorologiques pour l'étude des variations nycthémerales de température au sol

Définitions.

Téledétection : Discipline à la confluence des sciences physiques, des sciences naturelles et des sciences de l'information, ayant pour objet les informations portées par les rayonnements électro-magnétiques issus de la surface de la terre (ou d'autres planètes) et captés à distance grâce à des capteurs embarqués sur un support aérien ou spatial à bord d'un satellite. (Pr. Jean Chorowicz - Paris VI)

Système d'information géographique (SIG) : Ensemble de données repérées dans l'espace, structurées de façon à les gérer facilement. La constitution d'un SIG comprend la création d'une base de données, sa gestion et son exploitation. Elle facilite le croisement de données, leur mise à jour, l'extraction d'informations. Ces données peuvent être diverses, leur point commun étant qu'elles soient géoréférencées.

Global positioning system (GPS) : système de positionnement et de navigation à l'échelle mondiale, conçu et mis en service par le département de la défense des Etats-Unis. Le calcul du positionnement d'un emplacement est basé sur la mesure du temps de trajet de signaux radio électriques émis à partir des 24 satellites positionnaires. Ces satellites sont répartis de façon à assurer en tout lieu une visibilité simultanée d'au moins 4 satellites, pour nous donner les 3 paramètres suivants: la longitude, la latitude et l'altitude, jusqu'à une précision de 10 m (récepteurs communs actuels).

Bassins versants : Ensemble de pentes inclinées vers un même cours d'eau et y déversant leurs eaux de ruissellement. Ces bassins sont séparés par des lignes de partage des eaux. (FOUCAULT et RAULT - *Dictionnaire de géologie*. Masson, Paris, 1995, 4^e ed.)

ou Landsat (7). Quant au paludisme, des images de basse résolution spatiale ont été utilisées par HAY (5), THOMSON ET CONNOR (15; 16), notamment dans le cadre du projet MARARMA: Atlas du risque de la malaria en Afrique (14) qui a pour objectif de constituer un système d'information géographique incluant des données épidémiologiques, entomologiques, environnementales et climatiques. Spot XS a été utilisé par ROBERTS (12) au Mexique pour prédire la présence et l'abondance des vecteurs et Landsat TM par BECK (2) au Belize pour dépister les villages avec forte abondance de vecteurs. Le radar a été utilisé en Guyane française en 1996 pour identifier des gîtes larvaires potentiels (données non publiées).

La méthodologie utilisée dans ce travail a été commune pour aborder l'étude de la schistosomose due à *S. mansoni* et du paludisme. Afin de répondre aux objectifs des programmes nationaux de lutte contre ces deux endémies, des zones à risque ont été identifiées ainsi que leurs déterminants. Des outils prédictifs de la prévalence de la schistosomose, en complément d'autres facteurs déjà connus, sont proposés. Il en va de même pour le paludisme, en relation avec les facteurs influençant l'abondance des vecteurs. La description de la mise en œuvre du système d'information géographique et les premiers résultats sont exposés.

Situation des endémies étudiées à Madagascar

Les schistosomoses à Madagascar

Deux schistosomoses sont présentes à Madagascar et se répartissent géographiquement de la façon suivante (4) : la forme à symptomatologie génito-urinaire, due à *Schistosoma haematobium*, intéresse le nord et l'ouest du pays. On estime à 1 500 000 le nombre de personnes exposées et à 750 000 le nombre de sujets parasités. La forme à symptomatologie hépatique et intestinale, due à *Schistosoma mansoni*, s'étend

sur les Hautes Terres Centrales (HTC) et à l'est. On estime à 3 millions le nombre de personnes exposées dont 2 millions de personnes atteintes.

Ces maladies sont actuellement en pleine expansion, favorisées par les mouvements de population, les travaux saisonniers et les aménagements hydroagricoles. Elles ont été reconnues problème de santé publique prioritaire en 1992 et un programme national de lutte a été établi. La division "bilharzioses" de la Direction de la lutte contre les maladies transmissibles (DLMT) du ministère de la santé, l'Institut Pasteur de Madagascar (IPM), le programme Ramse de l'IRD (ex-Orstom) collaborent étroitement à ce niveau. Les principaux objectifs de ce programme, en accord avec les recommandations de l'OMS (11), sont la baisse de la morbidité par l'administration de traitement de masse par le praziquantel dans les villages hyperendémiques et l'amélioration des connaissances sur la transmission (13).

La morbidité est liée à l'intensité de l'infestation et varie d'un secteur géographique à l'autre en fonction du parasite, des hôtes (homme, mollusque), des modalités de contact homme-mollusque et de leur environnement.

Le paludisme à Madagascar

Madagascar est caractérisé par une hétérogénéité de la transmission du paludisme, notamment entre les HTC où cette transmission est faible, et les côtes où elle est plus importante. La problématique actuelle découle historiquement de vastes campagnes de contrôle réalisées dans les années 50 à 70, suivies d'un arrêt progressif de ces actions. A la fin des années 80, des épidémies meurtrières de paludisme ont éclaté sur les HTC, touchant les populations peu ou pas prévenues (9). Une opération de pulvérisation intra-domiciliaire (OPID) de DDT a débuté de manière systématisée en 1993. Elle a duré 5 ans. En 1999, tout en réduisant leur apport, les bailleurs de fonds ont décidé de poursuivre une action visant à prévenir de nouvelles épidémies. Actuellement, le service de lutte espère atteindre cet objectif, d'une part, grâce à un système d'alerte précoce, clinique et parasitologique, à l'aide d'un réseau de sites sentinelles sur toutes les HTC, mis en place par la Coopération italienne et, d'autre part, par des pulvérisations limitées aux marges de la "zone OPID", afin de prévenir une réinvasion des vecteurs. Cette stratégie est complétée par des pulvérisations focalisées au niveau d'éventuels foyers de transmission résiduels.

Il importe donc d'optimiser le choix des zones de pulvérisation et de renforcer le système de surveillance existant (qui tient compte de l'altitude et des températures) par une meilleure connaissance d'autres déterminants environnementaux du risque paludéen à l'échelle loco-régionale.

On connaît déjà l'infestation aux rizières d'*Anopheles funes* (8), vecteur principal du paludisme sur les HTC, et l'importance de l'altitude sur l'écologie des anophèles, comme sur la durée du cycle sporogonique. Les surfaces rizicoles n'ont pas été étudiées depuis de nombreuses années et, seules, quelques zones de périmètres irrigués sont connues.

Matériel et méthodes

Depuis quelques années, des équipes de recherche médicale ont constitué des systèmes d'information géographique (SIG) ou utilisé ces nouvelles techniques en

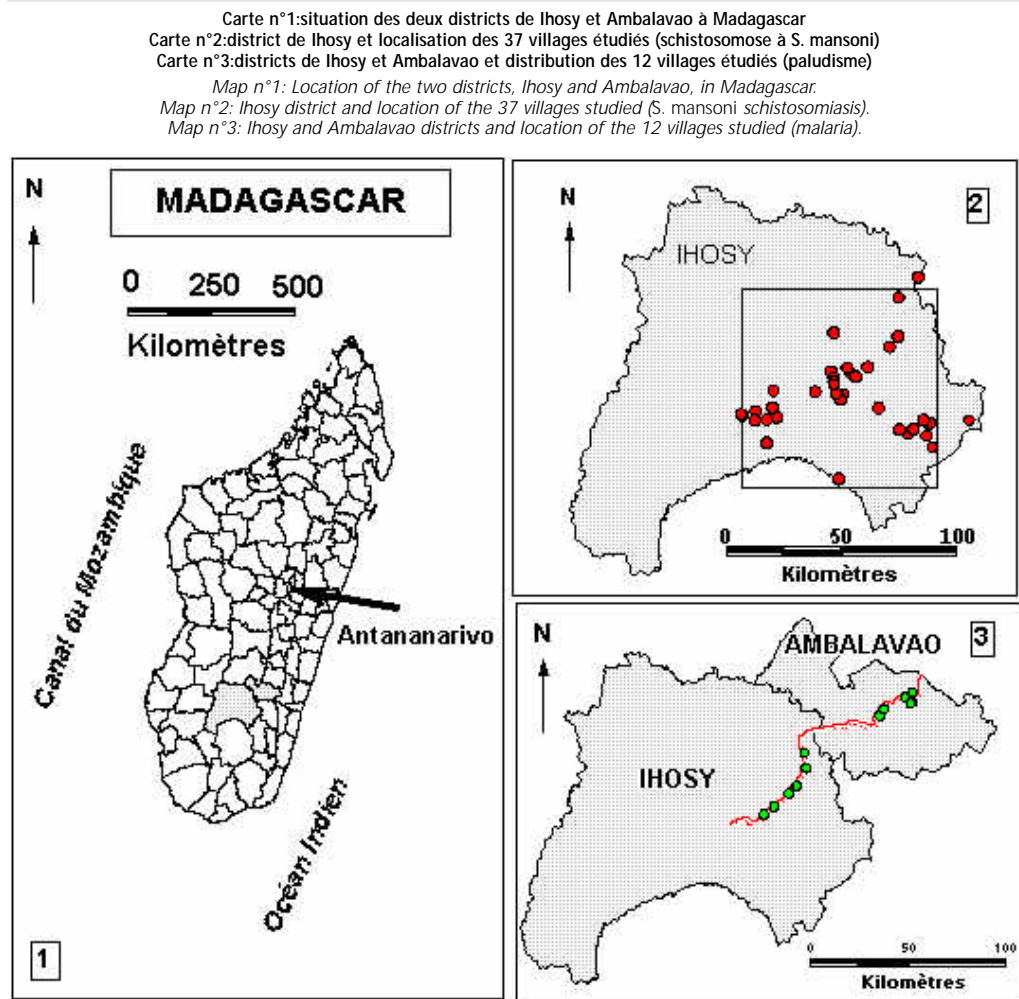
épidémiologie et en entomologie (17). Les principales caractéristiques techniques des satellites les plus utilisés sont résumées dans le tableau I. D'une part, les satellites de basse résolution spatiale comme NOAA/AVHRR ont l'avantage d'une grande résolution temporelle (tous les 10 jours pour NOAA par exemple) et d'un accès gratuit sur Internet dans le cas d'utilisation non commerciale. On obtient grâce à eux des données concernant la végétation et la température. D'autre part, les satellites haute-résolution sont de plus en plus utilisés, comme Landsat TM, Spot XS et Spot P. Ils ont l'avantage de permettre de travailler à l'échelle loco-régionale (par exemple, Spot P, avec une résolution spatiale de 10 mètres, peut donner des cartographies jusqu'au 1/24 000è) et ils permettent d'obtenir des cartes d'occupation du sol, des données de végétation, d'humidité, de pédologie, de géologie. Les images radar, de traitement plus difficile, sont encore peu utilisées mais offrent d'autres informations comme les pentes, le relief, l'humidité et ce, en toutes saisons, car les ondes radar ont l'avantage de traverser les couverts nuageux et l'épaisseur des forêts tropicales.

Zones d'étude

Les deux zones d'étude de la schistosomose et du paludisme sont situées dans la province de Fianarantsoa, dans le district de Ihosy et celui d'Ambalavao (figure 1). La zone d'Ihosy est traversée par le fleuve Ihosy du sud au nord, avec une légère inclinaison sud-est, nord-ouest. À l'ouest de l'Ihosy, se trouve le plateau de l'Horombe, entre 900 et 1100 mètres d'altitude. À l'est, on trouve, parallèlement à l'Ihosy, des montagnes puis des plaines traversées au nord de reliefs rocheux allongés, toujours parallèlement à l'Ihosy. Le bassin d'Ambalavao est une véritable zone de transition entre les pénélaines de l'ouest et le relief tourmenté des Hautes Terres à l'est. C'est une plaine parsemée de reliefs résiduels et faiblement modelés par des vallons convexes. Le district de Ihosy compte 13 cantons, 132 communes et 71 126 habitants ; la population de ce district a été recensée en 1993. La densité moyenne est de 3 habitants au km² et varie de 1,5 à 9,6 habitants au km² pour 11 cantons. Elle est de 17,1 h/km² pour le canton de Ankily et de 40 h/km² pour celui de Ihosy. Cette région est peuplée majoritairement par des populations Bara. Les autres populations qui la composent sont

Betsileo et Antaisaka. Des populations de la côte est de Madagascar viennent y séjourner de façon saisonnière pour la récolte du riz. Les villages vivent essentiellement de l'élevage des zébus et de la culture du riz, parfois complétée par celle du manioc. Le district d'Ambalavao comporte 15 cantons et 152 communes avec 137352 habitants recensés en 1989. La densité de la population y est plus élevée qu'à Ihosy, en moyenne de 27h/km². Cette région fait partie du pays Betsileo mais, dans la ville de Ambalavao, les Merina représentent 20 à 40 % de la population urbaine. Ils détiennent la plus grande partie des postes importants de l'administration et, avec les étrangers (Indiens et Chinois), la quasi-totalité des commerces et des entreprises. Les Bara, métissés avec les Betsileo, peuplent les zones rurales périphériques et se consacrent traditionnellement à l'élevage, mais la recrudescence des vols de bétail les pousse à s'intéresser davantage aux activités agricoles. La région de Ihosy a été choisie pour l'étude de la schistosomose pour plusieurs raisons : c'est une zone connue pour avoir beaucoup de villages hyperendémiques ; il existe d'importantes données épidémiologiques déjà recueillies par l'IPM et la DLMT ; *S. mansoni* est la seule espèce présente ; le Ministère de la santé a décidé de débiter le programme dans ce district. La zone que nous avons étudiée comporte 37 villages pour lesquels nous disposons de données épidémiologiques (figure 1, carte 2). Pour l'étude sur le paludisme, un transect entre la plaine d'Ambalavao et Ihosy a été choisi, intéressant 12 villages se répartissant également entre zone OPID et zone non-OPID (figure 1, carte 3).

Figure 1.



Données disponibles

Données épidémiologiques

Les données de prévalence de la schistosomose à *S. mansoni* pour 2437 enfants de 5 à 15 ans de 37 villages, ainsi que de la charge parasitaire de 958 d'entre eux dans 15 de ces 37 villages, ont été obtenues par des enquêtes exhaustives en milieu scolaire, réalisées en avril 1998 (Léon RABARJOANA, communication personnelle).

Données entomologiques

Des missions en saison sèche et froide et en saison des pluies, où la température est plus élevée, ont permis de récolter trois espèces principales d'anophèles : *Anopheles funestus*, principal vecteur du paludisme, endophage, très endophile et très inféodé aux rizières; *Anopheles arabiensis*, membre du complexe *Anopheles gambiae*, vecteur secondaire, exophage et exophile et *Anopheles mascarensis*. Ce dernier n'est pas considéré jusqu'à présent comme vecteur sur les HTC. Il partage les mêmes caractéristiques comportementales au stade adulte que *Anopheles arabiensis* et, comme lui, est peu sensible aux pulvérisations intra-domiciliaires. Trois méthodes de récoltes ont été utilisées : la faune résiduelle, c'est-à-dire la récolte matinale par pyrèthrage des anophèles au repos dans les maisons, la capture sur homme à l'intérieur et à l'extérieur des maisons selon la méthodologie standard OMS.

Données socio-démographiques

Le recueil de ce type de données a été difficile : le recensement de 1993 ne nous fournit que des renseignements à l'échelle des cantons et, dans le rapport final de l'étude socio-économique régionale de 1991, 13 des villages concernés par l'étude sur la schistosomose ne sont pas recensés.

Des enquêtes par entretien avec des personnalités des villages ont donc été effectuées, lors des missions de terrain, permettant d'obtenir le nombre d'habitants par hameau, le nombre de hameaux par village, le nombre et le type de structures sanitaires et scolaires, les principales activités du village et les lieux principaux des activités liées à l'eau. Dans le cas où les structures scolaires ou sanitaires, ainsi que les marchés, ne se trouvent pas dans le village, le trajet et la distance horaire nécessaires pour y accéder ont été précisés ou évalués.

Données cartographiques

Des cartes topographiques, géologiques et forestières au 1/100 000e couvrant les zones d'étude ont été acquises.

Données de positionnement

Un appareil portable GPS Garmin 12 a été utilisé pour le positionnement des sites d'étude.

Données satellitaires

Ont pu être acquises les scènes Spot panchromatique du 11 septembre 1989, KJ 168/395 et du 8 septembre 1997, KJ 168/394 ainsi que des extraits des scènes Landsat Thematic Mapper 159/75 et 159/76 du 25 septembre 1994.

Logiciels

Les logiciels suivants ont servi à la constitution du système d'information géographique et aux traitements d'image : Mapinfo Professionnel 4.1, Idrisi 1997 - version 2, Adobe Photoshop 5.0, Surfer 5.0.

Méthodes statistiques

Les tests de SPEARMAN, ² et KRUSKAL-WALLIS ont été utilisés. Le seuil de signification a été fixé à 0,05.

Traitement des données cartographiques

Un système d'information géographique concernant la schistosomose a été constitué dans le but de décrire spatialement les résultats déjà recueillis, de rechercher les zones à risque et d'en étudier les déterminants éventuels afin d'établir un modèle prédictif de prévalence.

Ne pouvant exclure la pérennisation d'un site de transmission en aval par un autre site en amont, une hiérarchisation amont/aval des villages hyperendémiques se situant le long d'une même portion de réseau hydrographique a été effectuée pour rationaliser la mise en œuvre du traitement dans les villages hyperendémiques prioritaires (c'est-à-dire les villages où au moins 50% de la population générale est atteinte ou au moins 60 % quand le dépistage se fait en milieu scolaire). Une étude épidémiologique réalisée à Madagascar a confirmé la variation significative de la prévalence et de la charge parasitaire d'un village à l'autre (3). Cette étude a été réalisée en 1993, de façon exhaustive, auprès de toute la population de trois villages proches et similaires du point de vue des modes et niveaux de vie. Dès l'observation de la carte au 1/500 000e, on a pu constater que ces trois villages étaient répartis en deux bassins versants bien distincts (cf. définition annexe). L'appartenance aux bassins versants principaux de la zone d'étude a donc été retenue comme pouvant être un des facteurs déterminant dans la transmission.

Pour le paludisme, les moyens d'identifier les rizières ont été recherchés. Une fois celles-ci identifiées, une analyse conjointe des surfaces des rizières et de leur altitude avec les données entomologiques a été faite dans la perspective d'une modélisation du risque palustre.

Dans le cadre d'applications futures, l'échelle loco-régionale (1/100 000e et 1/50 000e) a été choisie, ainsi que l'utilisation de la complémentarité des images Landsat TM et Spot panchromatique.

Traitement des données satellitaires

Les routes, les pistes, les sentiers, les villes, villages et hameaux ont été numérisés à partir des cartes au 1/100 000e. Mais les cartes sont toutes très anciennes. La dernière mise à jour date de vingt et le plus souvent de trente ans. Durant cette période, des villages ou des hameaux ont été déplacés ou ont disparu, tandis que d'autres apparaissaient ou prenaient de l'importance. Dans cette zone où l'érosion est intense, essentiellement sur le plateau de l'Horombe, plaine de pente faible située dans la partie ouest de la zone d'étude, il n'est pas exclu qu'il ait pu se produire des phénomènes de capture d'une portion du réseau hydrographique par une autre portion. Nous nous sommes également rendu compte que des villages de la zone d'étude n'étaient pas répertoriés et que d'autres n'étaient pas différenciés de leurs homonymes, même par des personnes y ayant déjà effectué des missions. Les rizières ont été également numérisées. On ne dispose d'aucune précision sur l'évolution de la riziculture depuis ces trente dernières années. Quant au réseau hydrographique des cartographies, bien que très détaillé, il est parfois illisible car recouvert par d'autres informations.

L'éventail des sept canaux de Landsat TM et les différents traitements d'images nous offrent de nombreuses possibilités d'extraction d'informations pour une surface d'environ 32 400 km² par scène. Dans un premier temps, c'est une meilleure lisibilité du réseau hydrographique et des rizières qui était recherchée. La composition colorée RVB (rouge - vert - bleu) des canaux 7, 5 et 4 a donc été retenue, car elle est optimale pour

Tableau I.

Principales caractéristiques des satellites évoqués dans cet article. <i>Main characteristics of the satellites cited in this article.</i>							
satellite	opérateur	lancement	canaux	résolution spectrale	résolution spatiale	couverture terrain	répétitivité
Spot P	CNES/SPOT	1986/90/93	1	0,51-0,73 μm	10 m	60 km	1-4 jours
Spot XS	CNES/SPOT	1986/90/93	1	0,50-0,59 μm	20 m	60 km	1-4 jours
			2	0,61-0,68 μm			
			3	0,79-0,89 μm			
Landsat TM	Space imaging NASA/Eosat	1984	1	0,45-0,52 μm	30 m	185 km	16 jours
			2	0,52-0,60 μm	30 m		
			3	0,63-0,69 μm	30 m		
			4	0,76-0,90 μm	30 m		
			5	1,55-1,75 μm	30 m		
			6	10,4-12,5 μm	120 m		
			7	2,08-2,35 μm	30 m		
ERS 1/2	agence spatiale européenne	1991/95	SAR	5,66 cm	25-50	100-500 km	3-35 jours
JERS 1	Japon	1992	SAR	23,5 cm	18	75 km	n'existe plus
AVHRR	NOAA	1994	1	0,58-0,68 μm	1 100 m	2 700 km	10 jours
			2	0,72-1,10 μm			
			3	3,55-3,93 μm			
			4	10,5-11,5 μm			
			5	11,5-12,5 μm			

SPOT = système pour l'observation de la terre - P = panchromatique - XS = multispectral - TM = thematic mapper ; ERS = European remote sensing satellite ; JERS = Japan earth resources satellite ; AVHRR = advanced very high resolution radiometer ; NOAA = national oceanographic and aeronautic administration

les régions humides. La distinction entre les différents types de végétation est remarquable. On différencie assez bien les sols nus. On distingue les routes nationales, mais seuls les villes et les villages assez importants sont visibles.

Spot panchromatique, grâce à sa résolution géométrique de 10 mètres, permet de détailler les éléments intéressants. Le spectre des images Spot panchromatique complète très bien celui de la composition Landsat (tableaux I et II). Les sentiers visibles sur les images Spot panchromatiques sont beaucoup plus nombreux que ceux qui sont notés sur les cartes. Le réseau hydrographique y est bien visible. Les habitations, dans cette région très rurale, ne sont pas radiométriquement différentes du milieu naturel, car elles sont le plus souvent petites et construites de murs de terre et de toit de chaume. L'identification des petits hameaux peut malgré tout se faire indirectement par détection de sentiers structurés en étoile autour d'une zone de sol nu. Les rizières sont très nettement délimitées.

Seules les voies de communication et les zones habitées numérisées à partir de la cartographie ont été conservées. Des modifications ont été apportées au fur et à mesure des changements identifiés sur les images satellites Landsat ou Spot, ou les relevés GPS.

Le réseau hydrographique principal a ensuite été numérisé. Le réseau secondaire a été détaillé aux abords des villages étudiés, à partir de la composition RVB 7-5-4 des scènes Landsat. Les bassins versants et sous-bassins versants principaux ont été numérisés à partir de la même composition colorée.

La caractérisation automatique par classification supervisée des rizières est complexe, car celles-ci ne sont pas seulement caractérisées par des indices radiométriques mais aussi par une texture et une structure particulières. Ainsi, c'est par photo-interprétation de l'image satellite Landsat avec l'aide des images Spot panchromatique qu'une carte thématique de distribution des rizières a pu être réalisée, permettant le calcul automatique des superficies de rizières selon des rayons de 500 m, 1 km et 2 km autour des villages. Mais, comme nous ne disposons pas d'images Spot panchromatique pour toute la zone d'étude, ce sont les cartes d'occupation du sol qui ont été utilisées (figure 2).

L'altitude dans les villages a été relevée à partir des courbes de niveau des cartes topographiques, équidistantes de 25 mètres, après actualisation et localisation précises des villages.

Tableau II.

Principales fenêtres atmosphériques (parties du spectre électromagnétique où l'atmosphère est transparente au rayonnement). <i>Main atmospheric windows (parts of the electromagnetic spectrum).</i>	
spectre	fenêtres du spectre
ultraviolet et visible	0,35 à 0,75 μm
proche infrarouge	0,77 à 0,91 μm 1,0 à 1,12 μm 1,19 à 1,34 μm
infrarouge moyen	1,55 à 1,75 μm 2,05 à 2,4 μm
infrarouge thermique	3,35 à 4,16 μm 4,5 à 5,0 μm 8,0 à 9,2 μm 10,2 à 12,4 μm 17,0 à 22,0 μm
hyperfréquences	2,06 à 2,22 μm 3,0 à 3,75 μm 7,5 à 11,5 μm 20,0 et au delà

d'après le Précis de Télédétection, vol 1, p125, 1992, Québec, AUPELF.

Résultats

Un système d'information géographique a été constitué par intégration des données épidémiologiques, entomologiques, socio-démographiques, cartographiques, de positionnement par GPS, et des informations issues des images satellitaires après traitement.

Analyses spatiales

Mise en évidence des facteurs majeurs de répartition de la schistosomose

La géolocalisation des données épidémiologiques de prévalence et de charge par village montre d'emblée des regroupements de villages d'endémicité apparemment proche. On constate que la plupart des villages hyperendémiques sont situés à proximité de la route nationale 7 et de la piste des zébus qui la longe (figure 3). Cependant, le choix des 37 villages n'a pas été fait par tirage au sort mais guidé par des critères d'accessibilité. Toutefois, l'exode rural est très important dans cette région et le recensement des écoles nous permet de penser qu'une grande proportion de la population totale de ces zones d'étude se trouve dans les villages enquêtés.

Une interpolation spatiale selon la méthode de KRIGING (10), technique géostatistique basée ici sur le calcul de

Figure 2.

Exemple de tampons de rayon de 500 mètres, 1 et 2 kilomètres autour du village de Iarintsena, permettant le calcul des superficies rizicoles.

Example of tampons of respectively 500 metres, 1 and 2 kilometres in diameter around the village of Iarintsena, in order to calculate the area covered by rice fields.

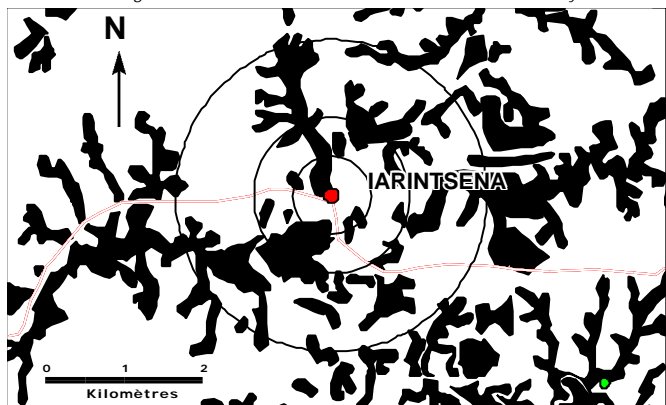


Figure 3.

Délimitation des bassins versants et réseau hydrographique principal passant par les villages étudiés, obtenus par numérisation à partir de la composition RVB des canaux 7, 5 et 4 de Landsat TM, prévalence de la schistosomose à *S. mansoni* et RN 7.
 Delimitation of the watersheds and main hydrographic network passing through the villages under study, obtained by numerisation with the RVB composition of canals 7, 5 and 4 of Landsat TM, prevalence of *S. mansoni* schistosomiasis and RN7.

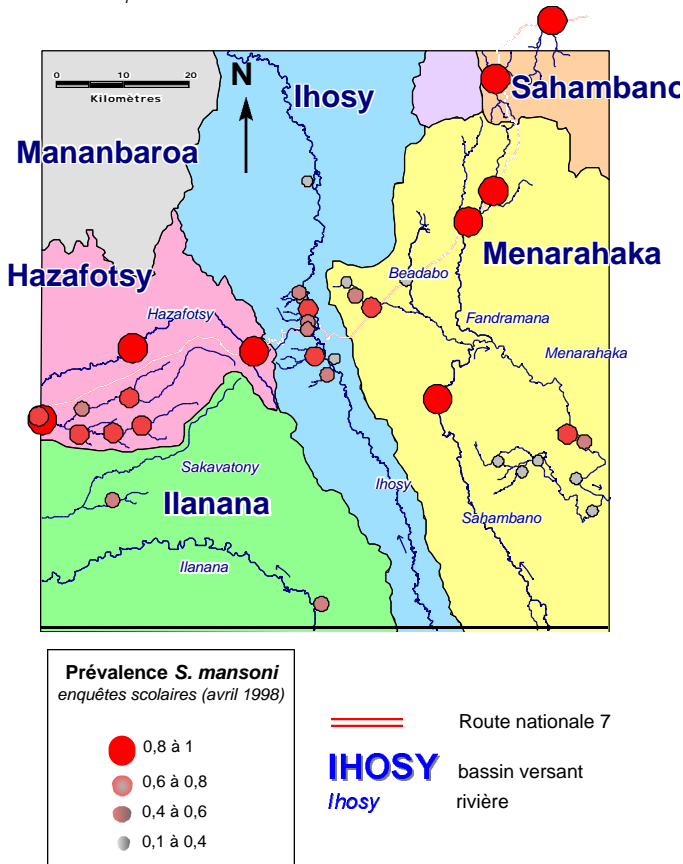


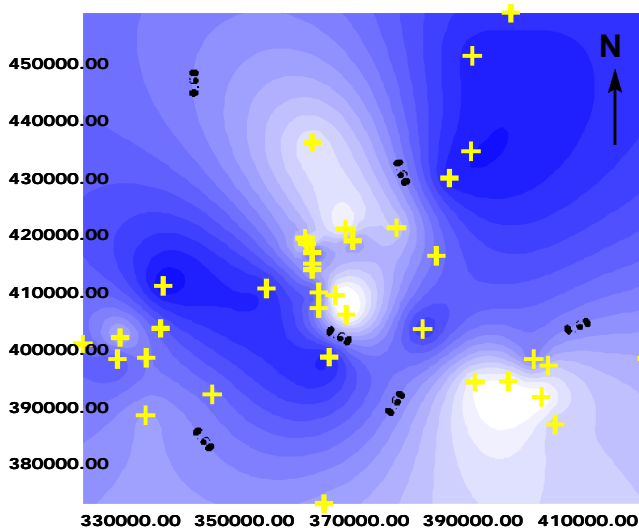
Figure 4.

Interpolation spatiale selon la méthode de semivariances de KRIGING à partir des 37 données de prévalence de la schistosomose à *S. mansoni* dans la région de Ihoisy.

En abscisse et ordonnées se trouvent les coordonnées XY en mètres selon LABORDE. En indicateur coloré la prévalence. Chaque croix représente un des 37 villages étudiés.

Spatial interpolation according to the method of Kriging semivariances from the 37 series of prevalence data for *S. Mansoni* schistosomiasis in the Ihoisy region. The XY coordinates in metres according to Laborde are on the x and y axis. The prevalence is indicated by coloured areas. Each cross represents one of the 37 villages under study.

Mahasoa (Zazafotsy)



semivariances, nous a permis d'exprimer les tendances de regroupement des données concernant la schistosomose (figure 4) et de distinguer alors deux zones principales de villages hyperendémiques et deux zones de villages non hyperendémiques. Les deux zones hyperendémiques sont traversées par la route nationale 7 et se situent dans le bassin versant de l'Hazafotsy et la portion au nord et à l'ouest du bassin versant de la Menarahaka. Les deux zones non hyperendémiques se situent dans le bassin versant de l'Ihoisy et dans la partie est et sud du bassin de la Menarahaka.

Les facteurs de risque potentiels identifiés liés au niveau de prévalence sont donc la proximité de l'axe RN7-piste des zébus, l'appartenance au bassin versant et la présence de villages hyperendémiques en amont. La distance à la RN7-piste des zébus a été calculée pour chacun des 37 villages. On constate une liaison négative significative entre cette distance et le niveau de prévalence ($p = 0,001$). L'appartenance aux bassins versants est elle aussi significativement liée au niveau de prévalence ($p = 0,0167$). De même, la position amont absolue est significativement liée à une non hyperendémicité ($p = 0,0275$).

On ne retrouve aucune liaison avec le niveau de charge parasitaire des 15 villages pour lesquels nous disposons de ces données.

Mise en évidence des facteurs majeurs de répartition du paludisme

Les douze villages concernés par le transect ne diffèrent pas significativement par le nombre d'habitants, de familles, de maisons et de parcs à zébus, mais diffèrent en ce qui concerne l'altitude et la superficie des rizières, ce qui était attendu puisque la définition de la zone OPID est basée sur l'altitude et que les rizières sont plus importantes sur les HTC.

En zone OPID, toutes les données entomologiques obtenues par capture sur appât humain dans les maisons et les faunes résiduelles (sauf pour *An. mascarensis*) sont significativement moins abondantes qu'en zone non-OPID.

L'abondance d'*An. mascarensis* augmente significativement en fonction du nombre d'habitants et de parcs à zébus, quelle que soit la zone. Nous avons donc cherché, pour *An. funestus* et *An. gambiae*, les relations éventuelles avec l'altitude et les superficies des rizières de chaque village de la zone non-OPID. On constate une abondance de ces vecteurs significativement plus importante quand la superficie de rizières est plus grande dans un rayon de 1 km pour *An. funestus* ($p < 0,001$), pour les captures réalisées à l'intérieur des maisons et la faune résiduelle, et de 1km ($p = 0,014$) et 2km ($p = 0,041$) pour *An. gambiae*. Il en est de même pour l'altitude, mais on connaissait déjà le lien entre la superficie des rizières et l'altitude.

Perspectives

Pour la schistosomose due à *S. mansoni*, grâce aux données acquises sur le terrain en 1998, l'identification des villages hyperendémiques à traiter en priorité était d'emblée effective. Nous avons pu, par contre, grâce aux relevés GPS et aux images satellitaires, actualiser la cartographie et ébaucher un modèle prédictif de prévalence qui reste à affiner et à valider par des enquêtes dans les villages de la zone qui n'ont pas encore été prospectés. Une étude en

profondeur des conditions de la transmission, en collaboration avec l'unité "schistosomoses" de l'IRD de Madagascar, est également nécessaire. Une telle collaboration permettra d'intégrer au système d'information géographique d'autres données issues des traitements satellitaires, comme les types de sols nus et de végétation, des données malacologiques, rodentologiques, hydrogéologiques et comportementales. Ces travaux seront par la suite étendus à l'ensemble du district de Ihosy.

Quant au paludisme, le modèle prédictif de l'abondance d'*Anopheles funestus* n'a pas été présenté ici, car nous n'avons pas pu disposer d'images Spot panchromatique intéressant l'ensemble de la zone que nous proposons d'étudier. Ce sont les superficies des rizières déterminées il y a vingt ou trente ans qui nous ont servi de données de base. La précision des mesures que nous avons effectuées est donc inconnue puisque nous ne connaissons pas l'évolution des terres rizicoles durant ces trente dernières années. Néanmoins, les corrélations mises en évidence se sont révélées en accord avec la biologie des vecteurs et l'historique des pulvérisations intradomiciliaires sur les HTC.

Spot a été utilisé en complément de Landsat sur une petite partie de la zone étudiée. Sa résolution géométrique de 10 mètres s'est révélée tout à fait complémentaire de l'étendue du spectre radiométrique de Landsat TM. Le travail préliminaire que nous avons effectué fait partie d'un vaste projet concernant l'ensemble des Hautes Terres Centrales avec, pour principal objectif, la détection des foyers à risque afin de prévenir l'apparition de nouvelles épidémies de paludisme. Il inclut la Coopération italienne, le Ministère de la santé malgache et le groupe de recherche sur le paludisme de l'Institut Pasteur de Madagascar qui comprend le laboratoire du paludisme, l'unité d'entomologie et le service d'épidémiologie.

Conclusion

Au-delà de la simple visualisation de données et de l'actualisation cartographique, les nouvelles possibilités d'acquisition, de gestion et de traitement d'informations sur le milieu, grâce aux satellites de télédétection, offrent un intérêt certain dans le domaine des pathologies liées à l'environnement. Ce travail nous a permis de montrer que de tels outils étaient utilisables dans le cadre de la lutte contre le paludisme et la schistosomose due à *S. mansoni* à Madagascar, et capables de permettre l'élaboration de modèles prédictifs de prévalence pour ces deux maladies.

Remerciements

À Spot-Image, au CFSIGE, au FTM, à la direction des eaux et forêt du ministère de l'environnement de Madagascar ;
au Réseau international des Instituts Pasteur et Instituts associés, à l'Institut Pasteur de Madagascar, au programme Ramse de l'IRD, à la Coopération française ;
au Dr J. B. DUCHEMIN, responsable du laboratoire d'entomologie de l'Institut Pasteur de Madagascar ;
au Pr J. P. RUDANT, de l'Institut francilien des géosciences, au Pr J. ROUX et au Dr P. MAUCLÈRE, directeurs de l'IPM ;
au Dr R. MIGLIANI, chef du service d'épidémiologie de l'IPM ;

au Dr P. BOISIER, ancien chef du service d'épidémiologie, aux Drs L. RABARIJAONA, C. E. RAMAROKOTO du service d'épidémiologie de l'IPM et à V. E. RAVOALIMALALA, P. RAVONIARIMBININA du service bilharzioses du Ministère de la santé, pour avoir fourni les données épidémiologiques ;

aux Drs R. JAMBOU et F. ARIEY, responsables du laboratoire du paludisme de l'IPM, à P. BREMOND, JM DUPLANTIER et B. SELLIN de l'IRD.

Références bibliographiques

1. BARRETO ML - The dot map as an epidemiological tool: a case study of *Schistosoma mansoni* infection in an urban setting. *Int J Epidemiol*, 1993, **22**, 731-741.
2. BECK LR, RODRIGUEZ MH, DISTER SW *et al.* - Assessment of a remote sensing-based model for predicting malaria transmission risk in villages of Chiapas, Mexico. *Am J Trop Med Hyg*, 1997, **56**, 99-106.
3. BOISIER P, RAMAROKOTO CE, RAVONIARIMBININA P, RABARIJAONA LP & RAVOALIMALALA VE - *Caractéristiques de la transmission et différences géographiques dans la morbidité à Schistosoma mansoni*. Communication affichée, colloque scientifique du centenaire de l'Institut Pasteur de Madagascar, veille microbiologique et santé publique, 3-4 novembre 1998.
4. DOUMENGE *et al.* - *Atlas de répartition mondiale des schistosomoses*. Ed. Presses universitaires de Bordeaux, Centre d'études de Géographie tropicale (CNRS), OMS, 1987, ISBN 2-86781-060-4.
5. HAY SI, SNOW RW & ROGERS DJ - Predicting malaria seasons in Kenya using multitemporal meteorological satellite sensor data. *Trans R Soc Trop Med Hyg*, 1998, **92**, 12-20.
6. MALONE JB, ABDEL-RAHMAN MS, EL BAHY MM, SHAFIK M & BAVIA M - Geographic information systems and the distribution of *Schistosoma mansoni* in the Nile Delta. *Parasitol today*, 1997, **13**, 112-119.
7. MALONE JB, HUH OK, FEHLER DP, WILSON PA, WILENSKY DE *et al.* - Temperature data from satellite imagery and the distribution of schistosomiasis in Egypt. *Am J Trop Med Hyg*, 1994, **50**, 714-722.
8. MARRAMA L, RAJAONARIVELO E, LAVENTURE S *et al.* - *Anopheles funestus* et la riziculture sur les plateaux de Madagascar. *Cahiers Santé*, 1995, **5**, 415-419.
9. MOUCHET J, LAVENTURE S, BLANCHY S *et al.* - La reconquête des Hautes Terres de Madagascar par le paludisme. *Bull Soc. Pathol Exot*, 1997, **90**, 162-168.
10. NICHOLSON MC & MATHER TM - Methods for evaluating Lyme disease risks using geographic information systems and geospatial analysis. *J Med Entomol*, 1996, **33**, 711-720.
11. OMS - *Lutte contre les schistosomoses, deuxième rapport du comité OMS d'experts*. Ed. OMS, Genève, 1993, ISBN 92-4-220-830-832.
12. ROBERTS DR, PARIS JF, MANGUIN S *et al.* - Predictions of malaria vector distribution in Belize based on multispectral satellite data. *Am J Trop Med Hyg*, 1996, **54**, 304-308.
13. ROUX JF, RAVOALIMALALA VA, RAKOTO L, BOISIER P, ANDRIAMAHEFAZAFY B *et al.* - *Bases de réflexions et grandes lignes du Programme national de lutte contre les bilharzioses à Madagascar*. Archives de l'Institut Pasteur, 1996.
14. SNOW RW, MARSH K & LE SUEUR D - The need for maps of transmission intensity to guide malaria control in Africa. *Parasitol today*, 1996, **12**, 455-456.
15. THOMSON MC, CONNOR SJ, MILLIGAN PJM & FLASSE SP - The ecology of malaria - as seen from earth observation satellites. *Ann Trop Med Parasitol*, 1996, **90**, 243-264.
16. THOMSON MC, CONNOR SJ, D'ALLESSANDRO U *et al.* - Predicting malaria infection and bed net use surveys: the importance of spatial correlation in the interpretation of results. *Am J Trop Med Hyg*, 1999, **61**, 2-8.
17. WASHINO RK & WOOD BL, 1994: "Application of remote sensing to arthropod vector surveillance and control. *Am J Trop Med Hyg*, 1994, **50**, 134-144.