

# Apport de la télédétection à la lutte contre le paludisme

Machault V<sup>1,2,3</sup>, Pages F<sup>2</sup>, Rogier C<sup>1</sup>

1. Unité de recherche en biologie et épidémiologie parasitaires, 2. Unité d'entomologie médicale, Equipe 7 «Maladies émergentes et moustiques», Unité de recherche sur les maladies infectieuses et tropicales émergentes, URMITE, UMR6236, Institut de recherche biomédicale des armées, Institut de médecine tropicale du Service de santé des armées, Allée du Médecin colonel Jamot, Parc du Pharo, BP60109, 13262 Marseille cedex 07, France.  
3. Centre national d'études spatiales, applications valorisation, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9.

*Med Trop* 2009; **69** : 151-159

**RÉSUMÉ** • Malgré les efforts nationaux et internationaux, le paludisme reste un problème de santé publique majeur et les avancées dans la lutte contre la maladie se heurtent à de nombreux obstacles. L'importance du paludisme doit pouvoir être évaluée, au niveau spatial et temporel, afin de renseigner les décideurs et de prioriser les interventions, y compris dans les zones où les informations de terrains sont insuffisantes et où les systèmes d'information sanitaire sont défaillants. L'évaluation du risque palustre doit aussi permettre d'anticiper la survenue d'épidémies par des systèmes d'alerte précoce. Des satellites civils d'observation de la terre survolent la planète depuis les années 1960-70 et apportent des informations pour la mesure ou l'évaluation de certains des facteurs géo-climatiques et anthropogéniques dont dépendent la transmission et l'importance du paludisme. De nombreux travaux civils ou militaires, en milieu rural ou urbain, ont permis la mise en place de modèles et de cartes de risques entomologique, parasitologique ou épidémiologique du paludisme à partir de données de télédétection. La cartographie des populations humaines à risque a aussi bénéficié des apports de la télédétection. Les résultats des travaux publiés montrent que la télédétection est un outil adapté pour améliorer la planification, l'efficacité et l'efficience de la lutte antipaludique.

**MOTS-CLÉS** • Lutte antipaludique. Lutte antivectorielle. Télédétection. Satellites. Epidémiologie. Paludisme.

## CONTRIBUTION OF REMOTE SENSING TO MALARIA CONTROL

**ABSTRACT** • Despite national and international efforts, malaria remains a major public health problem and the fight to control the disease is confronted by numerous hurdles. Study of space and time dynamics of malaria is necessary as a basis for making appropriate decision and prioritizing intervention including in areas where field data are rare and sanitary information systems are inadequate. Evaluation of malarial risk should also help anticipate the risk of epidemics as a basis for early warning systems. Since 1960-70 civilian satellites launched for earth observation have been providing information for the measuring or evaluating geo-climatic and anthropogenic factors related to malaria transmission and burden. Remotely sensed data gathered for several civilian or military studies have allowed setup of entomological, parasitological, and epidemiological risk models and maps for rural and urban areas. Mapping of human populations at risk has also benefited from remotely sensing. The results of the published studies show that remote sensing is a suitable tool for optimizing planning, efficacy and efficiency of malaria control.

**KEY WORDS** • Malaria control. Vector control. Remote sensing. Satellites. Epidemiology. Malaria.

Malgré les efforts nationaux et internationaux, le paludisme reste un problème de santé publique majeur et les avancées dans la lutte contre la maladie se heurtent à différents types d'obstacles. Le risque de paludisme doit pouvoir être évalué, au niveau spatial et temporel, afin de renseigner les décideurs et de prioriser les interventions. La variabilité de l'importance du paludisme peut être importante, parfois à des échelles réduites, et il est primordial de pouvoir concentrer et cibler les moyens de lutte vers les zones et les périodes où cette charge est la plus lourde.

Bien que des efforts soient faits pour rassembler les informations entomologiques, parasitologiques et épidémiologiques existantes (1-3), la disponibilité des données de terrain est souvent ponctuelle, parcellaire et reste une entrave à l'évaluation de l'importance du paludisme. Dans certaines régions, les informations épidémiologiques peuvent être insuffisantes, voire inexistantes, lorsque les systèmes de santé et d'information sanitaire sont déficients. Si des recherches ponctuelles sont menées, les méthodes de collecte de données de terrain sont coûteuses en temps et en investissement financier et les résultats donnent une image localisée et généralement instantanée de la situation. Il en est de même pour les données entomologiques de terrain. La lutte antipaludique souffre de l'absence d'informations globales et continues pouvant guider les interventions de lutte antivectorielle.

Par ailleurs, l'anticipation du risque est un enjeu majeur dans la lutte contre le paludisme et particulièrement contre ses épidémies. L'histoire des systèmes d'alerte précoce de paludisme remonte à 1921 en Inde où l'intensité et la distribution d'une épidémie a été prévue par la combinaison de l'absence de paludisme dans les 5 années précédentes, des anomalies de pluie de juillet à août et du prix local du blé qui représentait l'état nutritionnel de la population (4). L'introduction des insecticides dans les années 1950-60 et le lancement du programme mondial d'éradication du paludisme ont laissé croire que la prédiction des épidémies n'était plus nécessaire. Depuis l'apparition des résistances aux insecticides mais aussi aux antipaludiques, l'intérêt pour ces systèmes d'alerte renaît.

En matière de lutte contre le paludisme, il est nécessaire d'améliorer la planification, l'efficacité et l'efficience des méthodes de lutte, de surveillance et de contrôle. Mieux prédire et mieux évaluer l'importance du paludisme passe nécessairement par une meilleure compréhension des déterminants de sa transmission et de son impact.

## Déterminants de la transmission du paludisme

La biodiversité et l'importance du paludisme dépendent des combinaisons et interactions entre des facteurs abiotiques (environnement, climat, facteurs écologiques, météorologiques et anthropogéniques) et des facteurs biotiques (espèces vectrices endémiques, sen-

• Correspondance : vanessamachault@yahoo.com.br

sibilité de la population humaine, résistance des parasites aux antipaludiques, résistance des vecteurs aux insecticides) (5).

Les facteurs géo-climatiques, tels que la saisonnalité du climat, le régime des pluies, la température ambiante, l'humidité, la présence d'eaux de surface et de végétation, conditionnent l'apparition et la persistance des gîtes larvaires d'anophèles, la vitesse de développement des larves, l'abondance des vecteurs, leur taux de survie et leur dispersion, et la durée du cycle extrinsèque du Plasmodium. Des facteurs anthropogéniques, tel que les activités agricoles, l'irrigation, la déforestation, l'urbanisation, les mouvements de population, les changements économiques, sont aussi susceptibles de peser sur les niveaux de transmission et l'épidémiologie des infections plasmodiales (6-8).

La biodiversité du paludisme est importante car, « comme aux échecs, il y a peu de pièces mais la variété des situations est infinie ». Pour saisir le jeu des déterminants et prédire l'importance du paludisme, il est nécessaire de comprendre l'interrelation entre ces facteurs et à quelles échelles ils doivent être pris en compte (6). L'évaluation des facteurs géo-climatiques a bénéficié, au cours des quarante dernières années, de l'apport de la conquête spatiale et des images de la terre obtenues par satellite.

---

### Télédétection : méthodes

---

Des satellites civils d'observation de la terre survolent la planète depuis les années 1960-70 et fournissent depuis des images de télédétection. La télédétection correspond à l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel (9). Le principe de la télédétection repose sur l'enregistrement par les capteurs embarqués à bord des satellites, de l'énergie réfléchie ou émise par la surface de la terre et transportée par un rayonnement électromagnétique. L'énergie radiative enregistrée par le capteur est convertie en un signal électrique mesurable. La détection des différents écosystèmes repose sur les différences de réflexion et d'émission des objets au sol. Les capteurs passifs réceptionnent certaines longueurs d'onde du rayonnement solaire et les capteurs actifs, tels que les radars, enregistrent l'écho terrestre du rayonnement artificiel qu'ils ont eux-mêmes émis. Les capteurs peuvent enregistrer l'énergie radiative dans une ou plusieurs longueurs d'onde (ou bande spectrale). Une image panchromatique est constituée d'une seule bande spectrale et une image multispectrale de plusieurs bandes. Une image satellite est ainsi constituée de pixels, chacun contenant une ou plusieurs valeurs numériques selon le nombre de bandes spectrales enregistrées par le capteur. La mesure des indicateurs environnementaux, climatiques ou météorologiques, utilisables en épidémiologie dépend des bandes spectrales disponibles et donc de capteurs spécifiques.

Les capteurs des satellites sont caractérisés par leurs résolutions spatiale et temporelle, c'est-à-dire respectivement la surface réelle que représentent les pixels de l'image et la fréquence des prises de vue. Pour les capteurs à haute ou très haute résolution spatiale (jusqu'à 0,61 m), tels que ceux embarqués sur les satellites commerciaux SPOT (Satellites Pour l'Observation de la Terre), Ikonos, Quickbird, Landsat ou les radars RADARSAT ou TerraSAR-X, la résolution temporelle est faible et plusieurs semaines peuvent s'écouler entre deux prises de vue. Pour les satellites à faible résolution spatiale (à partir de 1 km), tels que Meteosat ou NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration), la résolution temporelle peut en revanche atteindre plusieurs passages par jour sur la même zone. Ainsi,

les indicateurs environnementaux pour lesquels sont requises des mesures à une précision de quelques mètres, pour la cartographie par exemple, seront dérivés du premier type de capteurs. Les applications associées seront locales ou régionales. Les indicateurs qui doivent faire l'objet d'un suivi temporel, telles que des mesures de végétation ou de pluviométrie, pourront être évalués par le second type de satellites. L'étendue des zones étudiées pourra atteindre un pays ou même un continent (7). Souvent, les images à faible résolution spatiale sont gratuites ou peu onéreuses, à l'inverse des images à haute ou très haute résolution.

Après acquisition, une image satellite doit généralement subir différents types de traitements informatiques pour être exploitée, tels que le filtrage, l'amélioration des contrastes, la classification ou le calcul d'indices (voir encadré « Images »). La classification permet de regrouper des pixels similaires et ainsi de caractériser des écosystèmes. Le calcul d'indices est réalisable pour les images multispectrales. Il consiste à combiner les valeurs de différentes bandes spectrales de chaque pixel dans des formules mathématiques plus ou moins complexes. Les indices les plus communément utilisés pour l'étude de l'épidémiologie du paludisme et des maladies à transmission vectorielle sont des indicateurs de végétation (Normalized Difference Vegetation Index [NDVI, voir encadré « NDVI »]), de pluviométrie (CCD [Cold Cloud Duration]) ou de température à la surface de la terre.

La technologie GPS (Global Positioning System) permet la géolocalisation des données entomologiques ou épidémiologiques recueillies sur le terrain. Il est alors possible, grâce aux Systèmes d'Information Géographique (SIG) d'intégrer les informations spatialisées (appelées couches) issues des images satellites et celles obtenues sur le terrain, pour dresser des cartes de risque. Des couches spatialisées ne provenant pas de la télédétection peuvent aussi être incluses, telles que des cartes topographiques (altitude, types de sol), démographiques, socio-économiques ou sanitaires (implantations des structures de santé).

Des associations statistiques peuvent alors être recherchées par régression entre les variables paludométriques, les indicateurs environnementaux et les autres variables incluses dans les SIG. L'inversion des relations (*i.e.* de la formule du modèle de régression) permet de générer des modèles et des cartes de risque. Alors que l'hypothèse principale conditionnant l'utilisation des statistiques classiques est l'indépendance des données, les observations spatialement proches peuvent être plus semblables que des observations éloignées. Négliger cette autocorrélation spatiale des données dans l'analyse statistique tend à surestimer la signification des effets des associations et peut conduire à conclure à des associations qui n'existent pas (10). Par exemple au Kenya, 87% de la variance de la densité de mouches tsé-tsé étaient expliquées grâce à des données de télédétection mais la prise en compte des autocorrélations spatiales ramenait les résultats à une association non significative (11). Il est donc important d'utiliser des méthodes statistiques adaptées lorsque l'on analyse des données spatialisées. Ces méthodes statistiques sont le plus souvent classiques et conventionnelles. Des méthodes d'analyse et de prédiction non conventionnelles telle que la logique floue («fuzzy logic») ont aussi été utilisées pour dresser des cartes de risque.

---

### Télédétection et lutte antipaludique

---

Les capteurs des satellites ne sont pas spécifiquement dédiés à l'enregistrement de données pour l'épidémiologie. Les données obtenues par télédétection peuvent cependant être utilisées pour

l'étude des déterminants de santé des populations. Les satellites apportent des renseignements utiles pour la mesure ou l'évaluation de certains des facteurs géo-climatiques et anthropogéniques dont dépendent des pathologies humaines et animales. Depuis 1970 (12), des travaux dans le domaine des maladies infectieuses, en particulier à transmission vectorielle, ont utilisé des données obtenues par télédétection pour élaborer des modèles et dresser des cartes de risque de paludisme (6, 13-17). Les résultats montrent que les informations ainsi obtenues peuvent être utiles en matière de lutte antipaludique, que cela soit pour stratifier le risque, évaluer sa variabilité, pallier au manque de données de terrain, cartographier les populations à risque, extrapoler un niveau de risque à des échelles spatiales plus large ou pour anticiper des épidémies.

### Exemples d'application

Les données de télédétection ont été associées à divers indicateurs paludométriques, tels que les densités larvaires, les densités vectorielles, l'agressivité (nombre de piqûres reçues par individu et par unité de temps), le taux d'inoculation entomologique (TIE, nombre de piqûres infectées reçues par individu et par unité de temps), la prévalence parasitaire et l'incidence du paludisme.

### Données de télédétection et gîtes larvaires

A partir du lancement en 1972 du satellite Landsat-1 (résolution spatiale de 30 m), la recherche s'est intéressée à la cartographie spatiale du risque de paludisme par l'identification, la caractérisation et la cartographie des environnements propices à la présence de gîtes larvaires, que cela soit par une classification de l'image satellite ou par le calcul d'indices tel que le NDVI. La détection de ces environnements repose soit sur les connaissances a priori des écosystèmes pouvant contenir des gîtes larvaires soit sur les résultats de modèles statistiques plus ou moins complexes. Ces modèles sont élaborés par la mise en relation de données de terrain issues de prospections entomologiques et des données environnementales extraites de l'image obtenue par télédétection sur des zones limitées. L'extrapolation spatiale permet de définir les niveaux de risque de présence de gîtes larvaires pour des zones plus étendues.

En Thaïlande, il a été montré que les données de télédétection pouvaient apporter une information aussi fiable que celle collectée sur le terrain. La présence de larves de *An. minimus*, *An. maculatus* et *An. barbirostris* dans des habitats a en effet été prédite de façon similaire par les modèles de régression incluant des variables environnementales issues soit d'une image Landsat à 30 m de résolution soit d'investigations de terrain (18). Dans plusieurs pays, des associations ont été recherchées entre la présence de gîtes larvaires sur le terrain et les environnements issus de la classification d'images à différentes résolutions spatiales (de QuickBird à 0,6 m de résolution à Landsat à 30 m de résolution). Les écosystèmes propices aux gîtes larvaires de différentes espèces d'anophèles ont ainsi pu être cartographiés (19-21). La précision de la cartographie est allée jusqu'à distinguer les aires de répartitions des formes moléculaires d'une même espèce d'anophèle. Le caryotype 2Rbc de la forme chromosomique Mopti de *An. gambiae s.s.* est présent en saison sèche dans des zones arides irriguées. Au Mali, la présence de cette forme a pu être corrélée négativement aux quantités de pluie du mois de collecte ou du mois précédent (22). Les mêmes données de terrain

ont aussi été associées au NDVI, avec une présence accrue du caryotype 2Rbc dans les zones de plus faible NDVI (17).

Une méthodologie différente consiste, non plus à cartographier un environnement propice à la présence de gîtes larvaires, mais à détecter directement des collections d'eau sur des images satellites. L'identification des gîtes est alors visuelle et directe, la collection d'eau étant prise en compte en tant qu'objet.

Dans un environnement aussi hétérogène que celui des hautes terres du Kenya, les erreurs de classification des écosystèmes sur une image ont pu être importantes. La photointerprétation a alors été choisie pour détecter les gîtes larvaires. Seules les images Ikonos de résolution 1 m ont permis une identification partiellement satisfaisante des collections d'eau (environ 41% d'entre elles), sans tenir compte de la présence de larves. Les images Landsat 7, dont la résolution de 30 m était supérieure à la taille de la majorité des collections d'eau pouvant servir de gîte larvaire, n'apportaient aucune information. Il était suggéré que la détection d'objets sur une image satellite nécessite qu'ils aient une taille au moins 1,5 fois supérieure à la taille du pixel (23). Le repérage direct des gîtes souffre donc de limitations dues aux résolutions spatiales des images satellites mais aussi au couvert végétal pouvant masquer les gîtes. Dans l'exemple kenyan, la prédiction visuelle a été améliorée par les résultats d'une régression logistique, les variables indépendantes étant issues de l'image classée et d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT, image des courbes de niveaux) (23).

En plus des images satellites optiques, des images radar ont aussi été utilisées pour la détection des gîtes larvaires, mettant à profit leurs capacités à détecter l'eau et l'humidité et à acquérir des images du sol malgré le couvert nuageux. Au Mali, une équipe a mis en évidence l'association entre les données radar et le stade de croissance des rizières, lui-même associé aux densités larvaires d'anophèles (*An. gambiae s.l.*, *An. pharoensis*, *An. rufipes* et *An. funestus*). Neuf images ERS-2 SAR de résolution 12,5 m avaient été acquises, trois d'entre elles étant contemporaines des prospections larvaires sur le terrain. Grâce à la multiplicité des images, des différences de profils temporels des rizières ont été détectées et associées à différents niveaux de densité larvaire (24).

Assez vite, l'aspect temporel de la prévision du risque a aussi fait l'objet de travaux. En Californie, les rizières les plus productives en *An. freeboni* ont été cartographiées 2 mois avant le pic de densité larvaire. Les indicateurs significativement associés aux densités larvaires étaient la présence d'une végétation développée en début de saison, mesurée sur une image Landsat de résolution spatiale 30 m, et la proximité du bétail qui fournit les repas sanguins, dont les pâturages étaient détectés sur des photographies aériennes infrarouges (25).

### Données de télédétection et densités vectorielles

En se reposant sur la corrélation existante entre les densités larvaires et les densités vectorielles, *i.e.* d'adultes, des études exploitant les données de télédétection pour l'évaluation des densités des vecteurs du paludisme ont été initiées en 1992. Au Mexique, la classification d'une image Landsat 30 m a permis d'identifier les écosystèmes favorables aux densités élevées d'*An. albimanus* adultes pendant la saison des pluies autour de 40 villages (26). Dans cet exemple, la modélisation reposait sur la mesure des densités de vecteurs adultes pour déterminer les écosystèmes susceptibles de fournir les gîtes larvaires.

Une approche inverse consiste à utiliser la cartographie des gîtes larvaires connus pour évaluer ou prédire les niveaux de densités de vecteurs. La modélisation repose alors sur les données entomologiques larvaires et les variables de prédiction sont issues des images satellites ou d'autres informations spatialisées, comme la distance aux gîtes larvaires ou la distance de vol connue des anophèles. Les prévisions du modèle peuvent être confirmées a posteriori par des mesures de terrain des densités vectorielles (captures sur appâts humain, pièges, faune matinale résiduelle).

Au Belize, la densité d'*An. albimanus* a pu être prédite en deux classes pour des habitations ou des villages en fonction de leur distance aux principaux gîtes larvaires de la région. Ces gîtes, à savoir les zones frontalières entre des surfaces en eau et de la végétation éparses, étaient cartographiés grâce à la classification d'une image SPOT de résolution 20 m (27). Le même principe a été appliqué, toujours au Belize, pour la prédiction de la présence d'*An. pseudopunctipennis* adultes dans des maisons. Une image SPOT de résolution 20 m et des cartes topographiques ont permis l'extraction des variables indépendantes prédictives : les rivières visibles sur l'image, étant identifiées comme gîtes larvaires principaux, la distance, la différence d'altitude et l'éventuelle présence d'un couvert forestier entre les maisons et ces rivières. Dans cette étude, les images n'étaient pas contemporaines des prospections de terrain mais la persistance de leur validité a été vérifiée sur le terrain (28). Dans les deux études précédentes, l'absence ou les faibles densités d'anophèles ont été prédites avec plus d'exactitude que la présence ou les fortes densités.

En Camargue, une zone marécageuse du sud de la France, les données d'une image Landsat 30 m ont permis de cartographier la présence d'*An. hyrcanus* aux stades larvaires et adultes dans le cadre d'une étude du risque de réémergence du paludisme. La probabilité de présence des larves d'*An. hyrcanus* (appelé indice larvaire) était calculée pour chaque pixel de l'image, selon le biotope, la distance à la rizière la plus proche et l'application éventuelle de traitements larvicides. Un indice d'anophèles adultes était alors calculé comme la moyenne des indices larvaires dans des zones tampons de différentes surfaces. La surface retenue était celle qui permettait d'obtenir la meilleure corrélation entre l'indice d'anophèles adultes et les densités d'adultes capturés sur le terrain. (29).

### Données de télédétection et taux d'inoculation entomologique des Plasmodiums

Selon les mêmes principes de corrélation entre les densités larvaires et adultes, certaines études ont eu pour objectif de rechercher des associations entre les écosystèmes et le taux d'inoculation entomologique (TIE).

Au Kenya, les agressivités et les TIE de *An. gambiae* et *An. funestus* ont été prédits avec plusieurs semaines d'avance par un modèle hydrologique d'humidité du sol basé sur les pluies, le type de sol, l'écoulement de l'eau et l'évapotranspiration. Les prédictions de ce modèle étaient meilleures que celles d'un modèle construit à partir des précipitations et de la température. Le NDVI issu du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) permettait la prédiction de l'agressivité de *An. gambiae* avec une exactitude similaire mais avec le désavantage d'être disponible à une résolution temporelle un peu moins élevée (30). En Gambie, les TIE de *An. gambiae s.l.* ont pu être estimés dans des villages, en tenant compte de la distance aux gîtes larvaires cartographiés sur des images à haute résolution (31). En Gambie

toujours, une étude a permis la cartographie des écosystèmes propices à la présence de gîtes larvaires autour de 10 villages, par la classification d'une image SPOT de résolution 20 m. Dans ces villages, le TIE était connu. La relation entre le TIE d'une part et la présence et la distance aux gîtes larvaires d'autre part a été extrapolée à d'autres villages afin de prédire le risque de recevoir des piqûres infectées. Ce TIE estimé était alors comparé à des données de prévalence parasitaire. La prévalence parasitaire était positivement corrélée avec le TIE prédit jusqu'à un certain niveau, puis la relation s'inversait, probablement à cause de l'immunité antipalustre des populations humaines fortement exposées à la transmission du paludisme (32).

### Données de télédétection, transmission et prévalence parasitaire

Alors que le TIE peut être assez directement associé à la densité de larves et de vecteurs adultes, la relation entre les populations de vecteurs et l'incidence ou la prévalence des infections plasmodiales ou du paludisme maladie est plus complexe. Elle dépend des niveaux de transmission mais aussi de nombreux facteurs comme les moyens de protection antivectorielle, l'immunité acquise, l'accès aux soins et aux traitements antipaludiques (5). Peu de travaux ont eu pour intention de définir les niveaux de prévalence parasitaire à partir de la présence de gîtes larvaires ou des densités vectorielles. En Thaïlande, aucune association n'a pu être trouvée entre le nombre de cas de paludisme dans des maisons et la distance aux écosystèmes favorables aux gîtes larvaires, cartographiés grâce à une image Ikonos de résolution 1 m (33).

La plupart des modèles de prédiction de la prévalence ou de l'incidence du paludisme rapportés dans la littérature ont été construits à partir d'indicateurs climatiques, tels que la pluviométrie, la présence de végétation ou la température, issus d'images à faible résolution spatiale. En Gambie, un modèle de prédiction de la prévalence parasitaire chez des enfants de 65 villages a été construit à partir de variables telles que l'âge, l'utilisation de moustiquaires imprégnées d'insecticides et du NDVI (estimé par la valeur de l'aire sous la courbe d'une série temporelle), qui était utilisé comme une variable de substitution (*i.e.* un « proxy ») de la longueur de la saison de transmission. Cette modélisation permettait de prédire l'effet des changements des niveaux d'utilisation des moustiquaires sur les niveaux de transmission (34).

Assez tôt, la nécessité de dresser des cartes de niveau de transmission du paludisme à l'échelle du continent africain a été soulignée (35). Le projet MARA/ARMA (Mapping Malaria Risk in Africa/Atlas du Risque de Malaria en Afrique) a été un travail collaboratif visant à produire des cartes de risques de paludisme à l'échelle du continent africain. Des données paludométriques de plusieurs milliers d'études de terrain ont été collectées dans la littérature ou auprès d'acteurs du terrain. Elles concernaient la transmission, la prévalence parasitaire et l'incidence de la maladie. Une modélisation des facteurs géo-climatiques associés au paludisme a permis de suppléer cette collecte de données dans les zones où elles n'étaient pas disponibles (35, 2). Les limites d'une transmission stable du paludisme ont ainsi pu être déterminées en définissant les limites d'un climat approprié (36).

Plusieurs travaux ont reposé sur cette base de données. En Afrique de l'Ouest et Centrale, des cartes de prévalence parasitaire de *Plasmodium falciparum* ont été dressées à partir des données empiriques de prévalence parasitaires issues du projet

MARA/ARMA et d'un modèle de saisonnalité basé sur le NDVI, la température et les pluies (37). Au Mali, une carte de risque de prévalence du paludisme a été calculée à partir de la distance à l'eau, la moyenne de NDVI pendant la saison des pluies, la température maximale dans les 3 mois précédant le début de la saison des pluies et le nombre de mois avec une pluviométrie supérieure à 60 mm (38). Au Kenya, en Ouganda et en Tanzanie, les prédictions des niveaux de prévalence parasitaire reposant sur la température, la pluviométrie, l'humidité, le NDVI et l'altitude étaient concordantes avec des cartes historiques de transmission dérivées d'expertises des données paludométriques et climatiques (39). Dans les mêmes pays, d'autres cartes ont été calculées à partir des prédicteurs précédents et de données de densité de population humaine, d'urbanisation, de présence de collections d'eau et de grandes classes écologiques (40).

Plus récemment, le projet MMP (Mapping Malaria Project) a vu le jour dans l'objectif de rassembler les données de prévalence parasitaire disponibles à l'échelle mondiale et de les mettre librement à disposition (41). La création d'un modèle détaillé des limites spatiales et du degré d'endémicité du paludisme à *P. falciparum* et *P. vivax* repose sur ces données, ainsi que sur des connaissances d'experts et sur la température et l'aridité déterminant l'exclusion de la transmission, selon les espèces anophéliennes en cause (42).

---

### Données de télédétection et morbidité

---

Les mêmes types d'indicateurs environnementaux et climatiques ont été exploités pour l'évaluation des niveaux de morbidité palustre.

Au Bangladesh, le réseau national de suivi météorologique n'était pas suffisamment dense pour fournir une information utile en épidémiologie. Des indices de végétation et de température, issus de la télédétection, ont pu être corrélés au nombre de cas admis dans les hôpitaux, principalement pendant la saison des pluies. Les données étaient disponibles pour 12 années de suivi et les indices utilisés étaient calculés à partir du NDVI et d'un indice de température de façon à tenir compte des fluctuations météorologiques, sans tenir compte des effets climatiques à long terme (43). Au Kenya, un NDVI supérieur à 0,35-0,40 pour un mois donné a permis de prédire pour le mois suivant que le taux d'admission hospitalier de cas de paludisme pédiatrique grave dépasserait 5% des admissions annuelles totales (44). En Asie, des cartes de NDVI supérieur à 0,4 pendant au moins 6 mois correspondaient à la distribution de l'incidence des cas paludisme à *P. falciparum* de cartes historiques (45). Au Burundi dans une zone de paludisme instable, un modèle incluant le NDVI calculé à partir d'images AVHRR, la température et la pluviométrie mesurées dans les stations météorologiques, et le nombre de cas de paludisme pour un mois donné permettait de prédire l'incidence du paludisme pour le mois suivant (46).

Dans les zones de paludisme instable, l'émergence d'épidémies dépend des variations à long terme du climat et de variations météorologiques à court terme. L'application de modèles reposant sur l'environnement peut permettre de prévoir le risque d'épidémies (47). A l'échelle du continent africain, un système d'alerte précoce des épidémies de paludisme a été mis en place sous l'égide du programme Roll Back Malaria. Il repose sur l'association entre les épidémies et les anomalies de pluie observées sur dix jours. L'accès à ses prédictions est libre sur Internet (48).

---

### Applications pour des populations de militaires

---

En plus des populations civiles ciblées dans les études décrites précédemment, les militaires peuvent bénéficier des apports de la télédétection et des travaux ont été menés dans cet objectif.

Une étude a récemment montré que le NDVI et des anomalies de NDVI par rapport aux moyennes calculées sur les années précédentes pouvaient être associés à des changements dans des populations de vecteurs près des installations militaires américaines. Ces travaux sont présentés comme préliminaires à l'élaboration d'un système automatisé d'alerte précoce du risque de maladie à transmission vectorielle aux Etats-Unis, reposant sur le climat (49).

Des travaux menés par les militaires américains en République de Corée ont apporté une preuve d'application concrète de la modélisation basée sur la télédétection dans la lutte contre le paludisme. Dans deux camps militaires, un système d'aide à la décision relatif au choix de la méthode de lutte à mettre en place a été testé. Des images de télédétection ont permis de connaître la surface des gîtes larvaires à traiter autour des camps pour évaluer le coût d'une stratégie reposant sur l'utilisation de larvicides. Ce coût a été comparé à celui d'une chimioprophylaxie pour les personnels des camps (50).

Chez les militaires français en mission de courte durée en Afrique intertropicale, le NDVI moyen calculé à partir des données du capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) - Terra pour les environnements auxquels étaient exposées les troupes, était significativement et fortement associé au risque d'accès palustre. Ce facteur expliquait une plus grande part de l'incidence du paludisme que l'observance de la chimioprophylaxie (51).

---

### Notion de risque et de densité de population humaine

---

Le risque de paludisme dépend des populations humaines exposées aux piqûres d'anophèles et du réservoir de parasites. En plus de son apport pour la cartographie des zones propices aux anophèles et l'obtention de données géo-climatiques, la télédétection peut aussi fournir des données relatives aux populations humaines.

Au Kenya, le traitement d'images du capteur radar RADARSAT-1 a permis de cartographier les zones propices à la présence de gîtes larvaires mais aussi les zones peuplées. La zone de risque était définie comme la superposition des aires peuplées et des environnements propices aux gîtes larvaires, augmentés d'un contour de 2 km représentant la distance de vol des anophèles dans cet écosystème (52).

Pour les objectifs de cartographie du risque de paludisme à des échelles plus larges, des bases de données démographiques spatialisées existent, tel que GRUMP (Global Rural-Urban Mapping Project) ou GPW3 (Gridded Population of the World, version 3) (<http://beta.sedac.ciesin.columbia.edu/gpw/index.jsp>, accédé le 11 décembre 2008). Cependant, il a été récemment souligné que ces sources ne sont pas toujours suffisamment précises pour pouvoir les relier au risque de paludisme, en particulier pour les zones de faible densité de population (53).

---

### Paludisme urbain

---

La population urbaine croît rapidement et les estimations prévoient que plus de 70% de la population mondiale et plus de 60%

de la population africaine vivront dans les villes d'ici 2050 (54). En milieu urbain, la population est dense, l'accès aux soins est généralement aisé et l'hétérogénéité des écosystèmes peut être importante. La transmission du paludisme peut y être très focalisée. L'urbanisation a un impact sur l'importance et la répartition de la maladie. Le paludisme urbain devrait donc être étudié de façon spécifique. Dans cette optique, les données de télédétection ont été utilisées pour rechercher les gîtes larvaires et mesurer les densités de populations humaines.

A Malindi et Kisumu, au Kenya, l'identification directe des gîtes larvaires de *An. gambiae s.l.*, *An. funestus* et *An. merus* a été tentée à partir d'images du satellite Multi-spectral Thermal Imager (MTI) d'une résolution spatiale de 5 à 20 m en fonction des bandes spectrales. Les résultats ont montré que, même en incluant des examinateurs ayant une grande expérience de photointerprétation, seuls 6% des gîtes larvaires étaient identifiés et les gîtes les plus grands (zones marécageuses, mares, fossés) n'étaient paradoxalement pas mieux détectés que les plus petits (réservoirs d'eau, canaux, flaques, trous d'arbres...) (55). Ces résultats soulignent de nouveau les difficultés de la détection directe des gîtes, surtout dans les villes où ils sont généralement petits. L'utilisation d'images à très haute résolution peut apporter une aide précieuse. A Dar-Es-Salaam en Tanzanie, l'interprétation visuelle de photographies aériennes a permis d'aider à l'identification des gîtes larvaires d'anophèles. La lutte intégrée mise en œuvre dans la ville a pu reposer en partie sur une lutte larvicide guidée par les résultats obtenus par télédétection (56).

A des échelles moins fines et sans détection directe des gîtes larvaires, la télédétection a aussi permis le calcul de variables environnementales de substitution (« proxys » environnementaux) en milieu urbain. Dans deux villes du Kenya, le NDVI calculé sur des pixels de 270 m x 270 m a été associé à la densité de maisons et donc à la présence de gîtes larvaires d'anophèles. Les fortes valeurs de NDVI indiquaient une densité de maison moindre et donc une plus grande probabilité de présence de gîtes larvaires (57).

Dans le domaine de l'épidémiologie du paludisme urbain, la télédétection a aussi été utilisée pour cartographier et modéliser les populations humaines urbaines (58). Par exemple, des images des lumières de nuit ont pu donner des indications sur les zones habitées et ont été utilisées pour estimer les populations urbaines touchées par le paludisme (59) mais leur interprétation quantitative doit être faite avec précaution à cause de la diffusion de la lumière des villes sur leurs environs (60). Les informations de GRUMP sont en partie obtenues par la technique des lumières de nuit. A l'échelle mondiale, il a été montré que les zones urbaines de GRUMP correspondaient bien aux descriptions plus ou moins détaillées dans les articles traitant du paludisme (53). Pourtant, la difficulté d'obtenir une définition quantitative des environnements urbains a encore récemment été soulignée, pouvant gêner l'estimation de l'importance du paludisme et l'extrapolation des résultats à d'autres villes ou quartiers (61).

---

### Précautions

---

Certaines précautions sont à prendre dans l'utilisation des modèles et cartes de risque calculés à partir de données de télédétection.

L'un des objectifs des modèles est de suppléer les données de terrain indisponibles. Pour cela, ils doivent être construits à par-

tir de jeux de données de qualité et de quantité suffisante pour pouvoir conclure à des associations. Ils doivent aussi être validés sur des jeux de données indépendants et de qualité. L'interprétation des relations statistiques doit être prudente et tenir compte des mécanismes sous jacents à toute corrélation identifiée entre des données de télédétection et des variables paludométriques.

L'extrapolation spatiale est une des propriétés les plus intéressantes des modèles et des cartes mais l'étendue des prédictions ne doit pas dépasser leurs possibilités intrinsèques, en particulier l'étendue des valeurs des données utilisées pour la construction des modèles, les caractéristiques des populations de vecteurs, des populations humaines et des environnements concernés. Ainsi, l'étendue des extrapolations possibles doit être discutée spécifiquement pour chaque situation.

La disponibilité des données de télédétection et des données de terrain est souvent contrainte par des considérations logistiques. Pourtant, les images doivent être choisies de façon spécifique et leur échelle doit être définie en fonction des besoins, en particulier en fonction de l'échelle des mécanismes biologiques étudiés. La cohérence des échelles des différents types de données doit être vérifiée.

La disponibilité d'images contemporaines aux prospections de terrain n'est pas systématique. Les conséquences d'une discordance temporelle entre la prise de l'image et la collection des données doivent être évaluées et discutées. Une étude a montré que la présence de gîtes larvaires d'*An. arabiensis* était associée à des changements écologiques dans le temps dans un village du Kenya (62). Il est donc impératif de prendre en compte ces éventuels changements et de vérifier dans quelle mesure ils peuvent modifier les prédictions des modèles.

---

### Conclusion

---

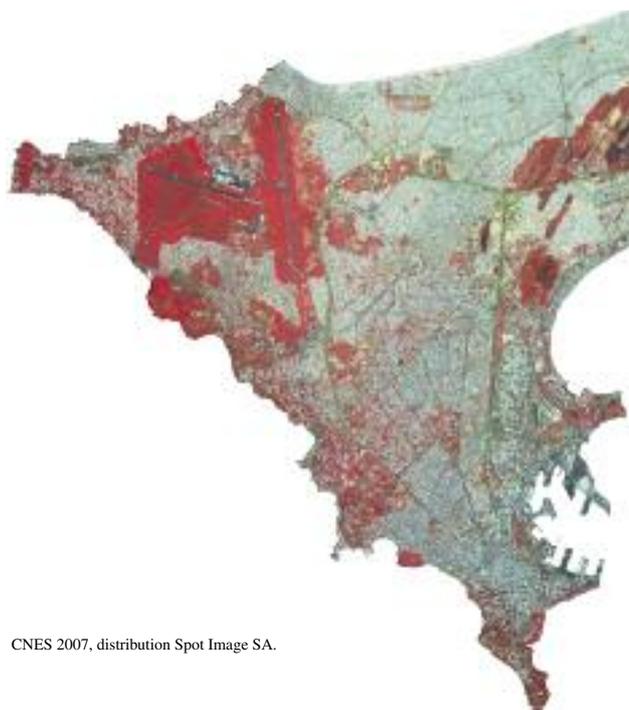
La télédétection peut améliorer la planification, l'efficacité et l'efficience de la lutte antipaludique.

Depuis plusieurs années, les résultats de nombreux travaux montrent que la télédétection peut constituer une source de données importante pour la mise en place de modèles et cartes de risques entomologique, parasitologique et épidémiologique du paludisme. Les images enregistrées par les satellites fournissent des indicateurs d'environnement, de végétation, de climat, de couvert et utilisation du sol, qui peuvent tous jouer un rôle dans l'épidémiologie du paludisme. La disponibilité de ces informations au sol est souvent limitée et les images satellite pallient à ce déficit.

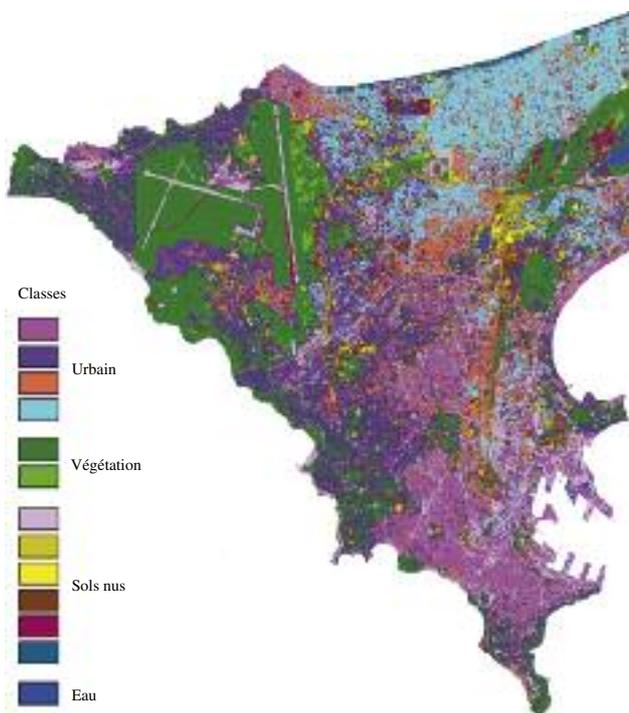
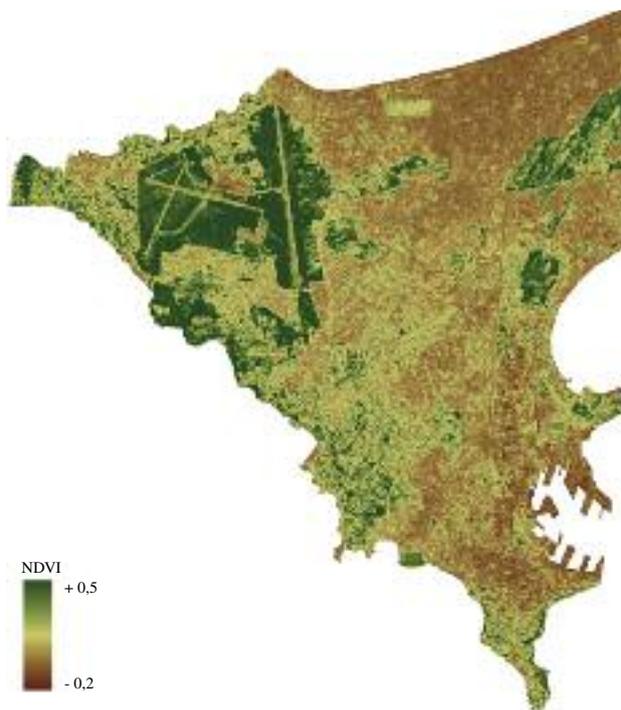
Les données paludométriques ne sont généralement disponibles que de façon ponctuelle, en particulier dans les régions où le système de soin et d'information sanitaire est défaillant. Les cartes et modèles de risque calculés à partir de jeux de données restreints peuvent, dans une certaine mesure qui doit être discutée, être extrapolés dans l'espace et le temps. L'importance du paludisme peut ainsi être évaluée et stratifiée dans des zones et des périodes plus étendues.

Des systèmes d'alerte précoce reposant sur des données géo-climatiques issues de la télédétection permettent de prédire les épidémies de paludisme et de préparer à temps la riposte dans des pays généralement démunis.

Enfin, la connaissance de la répartition et des densités des populations humaines doit être prise en compte pour l'évaluation de l'importance du paludisme. La télédétection permet d'apporter certaines réponses dans ce domaine en contribuant à la cartographie des populations.



CNES 2007, distribution Spot Image SA.



#### NDVI

Le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) a été défini dans les années 1970 (63, 64). Il est encore l'indice de végétation le plus communément utilisé pour les applications en santé humaine. Il capture en un seul indice, des effets combinés des température, humidité, pluviosité, ensoleillement, altitude, type et utilisation des sols.

Le couvert végétal réfléchit d'autant plus le rayonnement proche infrarouge (PIR) et absorbe d'autant plus le rayonnement rouge (R) que son activité chlorophyllienne est élevée. Ainsi le calcul du NDVI repose sur la différence d'absorption par les plantes des lumières rouge et proche infrarouge et il permet la mesure de l'abondance et la caractérisation de la couverture végétale. Sa formule est un rapport normalisé :  $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$  et sa valeur est comprise entre -1 et +1. En pratique, bien que des seuils fixes ne puissent être définis, une valeur de NDVI comprise entre 0 et 0,2 correspond à des sols secs et dégagés et des valeurs de NDVI supérieures à 0,2 correspondent à de la végétation d'autant plus dense et active que ces valeurs augmentent. Une valeur négative ou proche de zéro peut correspondre à des zones aquatiques, à certains types de bâti ou à des zones asphaltées (routes).

Le calcul du NDVI à partir d'une image multispectrale permet la création d'une nouvelle image dont chaque pixel contient une valeur de NDVI.

#### Images : Image SPOT / image du NDVI / image classifiée de la Péninsule du Cap Vert (Dakar et ses environs), Sénégal (voir Figure).

Image SPOT : Image SPOT multispectrale à 2,5 m de résolution spatiale, acquise le 26 septembre 2007. Les bandes spectrales de l'image sont converties en rouge, vert et bleu pour l'affichage d'une composition colorée. La végétation apparaît en rouge.

Image de NDVI : Image issue du calcul du NDVI effectué à partir de l'image SPOT. Chaque pixel de 2,5 m contient une valeur de NDVI. Les couleurs vertes correspondent à de la végétation d'autant plus dense que le vert est foncé. Les couleurs brunes correspondent à des sols nus et du bâti.

Image classifiée : Image issue d'une classification ayant permis de regrouper les pixels similaires en 4 classes d'urbains (selon le type d'urbanisation, ex : centre ville, urbain non planifié, quartiers de maisons avec jardins), 2 classes de végétation (selon la densité et le type de couvert végétal, ex : herbe, arbres), 6 classes de sols nus (ex : sable, asphalté, différents types de terre) et 1 classe d'eau (ex : mare, réservoir d'eau).

La disponibilité d'images de télédétection est croissante, leurs résolutions augmentent et les possibilités techniques de traitement s'améliorent. Ainsi, de nouveaux travaux verront le jour pour construire des modèles et cartes de risque de plus en plus précis, en particulier dans des milieux pour lesquels beaucoup de réponses restent à apporter, tel que les zones urbaines. Les applications de la télédétection à la lutte antipaludique devraient donc se développer dans le futur.

## Financements

V. Machault bénéficie d'une bourse financée par le Ministère de la défense et le Centre National d'Etudes Spatiales. Elle mène ses recherches sur financement de la Direction Générale de l'Armement (Contrat d'Objectif n°07CO402) et du Centre National d'Etudes Spatiales.

*Remerciements • Aux Dr Antonio Güell, Dr Murielle Lafaye, Dr Cécile Vignolles du service Applications Valorisation du CNES. Au Pr Jean-Pierre Lacaux de l'Observatoire Midi-Pyrénées (Université Paul Sabatier). Au programme ISIS du CNES pour l'accès aux images SPOT5.*

## Références

- Coetzee M, Craig M, Le Sueur D. Distribution of African malaria mosquitoes belonging to the *Anopheles gambiae* complex. *Parasitol Today* 2000; 16 : 74-7.
- Towards an Atlas of Malaria Risk in Africa. First technical report of the MARA/ARMA (Mapping Malaria Risk in Africa) collaboration. MARA/ARMA, 771, Umbilo Road, Congella, Durban, South Africa: December 1998.
- Hay SI, Rogers DJ, Toomer JF, Snow RW. Annual *Plasmodium falciparum* entomological inoculation rates (EIR) across Africa: literature survey, Internet access and review. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 2000; 94 : 113-27.
- Gill CA. The prediction of malaria epidemics with special reference to an actual forecast in 1921. *Ind J Med Res* 1923; 10 : 1136-43.
- Rogers DJ, Randolph SE, Snow RW, Hay SI. Satellite imagery in the study and forecast of malaria. *Nature* 2002; 415 : 710-5.
- Ceccato P, Connor SJ, Jeanne I, Thomson MC. Application of Geographical Information Systems and Remote Sensing technologies for assessing and monitoring malaria risk. *Parassitologia* 2005; 47 : 81-96.
- Beck LR, Lobitz BM, Wood BL. Remote sensing and human health: new sensors and new opportunities. *Emerg Infect Dis* 2000; 6 : 217-27.
- Thomson MC, Connor SJ, Milligan PJ, Flasse SP. The ecology of malaria - as seen from Earth-observation satellites. *Ann Trop Med Parasitol* 1996; 90 : 243-64.
- Conseil International de la Langue Française. Terminologie de télédétection et photogrammétrie. Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie français-anglais. 1997 : 455pp.
- Thomson MC, Connor SJ. Environmental information systems for the control of arthropod vectors of disease. *Med Vet Entomol* 2000; 14 : 227-44.
- Kitron U, Otieno LH, Hungerford LL, Odulaja A, Brigham WU, Okello OO *et al.* Spatial analysis of the distribution of tsetse flies in the Lambwe Valley, Kenya, using Landsat TM satellite imagery and GIS. *J Anim Ecol* 1996; 65 : 371-80.
- Cline BL. New eyes for epidemiologists: aerial photography and other remote sensing techniques. *Am J Epidemiol* 1970; 92 : 85-9.
- Kitron U. Risks maps: transmission and burden of vector-borne diseases. *Parasitol Today* 2000; 16 : 324-5.
- Carter R, Mendis KN, Roberts D. Spatial targeting of interventions against malaria. *Bull World Health Organ* 2000; 78 : 1401-11.
- Thomson MC, Connor SJ, Milligan P, Flasse SP. Mapping malaria risk in Africa: What can satellite data contribute? *Parasitol Today* 1997; 13 : 313-8.
- Hay SI, Snow RW, Rogers DJ. From predicting mosquito habitat to malaria seasons using remotely sensed data: practice, problems and perspectives. *Parasitol Today* 1998; 14 : 306-13.
- Randolph SE, Rogers DJ. Données satellites et maladies transmises par vecteurs : la création de cartes de prédiction du risque. *Bull Soc Pathol Exot* 2000; 93 : 207.
- Vanwambeke SO, Somboon P, Harbach RE, Isenstadt M, Lambin EF, Walton C *et al.* Landscape and land cover factors influence the presence of *Aedes* and *Anopheles* larvae. *J Med Entomol* 2007; 44 : 133-44.
- Sithiprasasna R, Lee WJ, Ugsang DM, Linthicum KJ. Identification and characterization of larval and adult anopheline mosquito habitats in the Republic of Korea: potential use of remotely sensed data to estimate mosquito distributions. *Int J Health Geogr* 2005; 4 : 17.
- Stoops CA, Gionar YR, Shinta, Sismadi P, Rachmat A, Elyazar If *et al.* Remotely-sensed land use patterns and the presence of *Anopheles* larvae (Diptera Culicidae) in Sukabumi, West Java, Indonesia. *J Vector Ecol* 2008; 33 : 30-9.
- Rejmankova E, Pope KO, Roberts DR, Lege MG, Andre R, Greico J *et al.* Characterization and detection of *Anopheles vestitipennis* and *Anopheles punctimacula* (Diptera: Culicidae) larval habitats in Belize with field survey and SPOT satellite imagery. *J Vector Ecol* 1998; 23 : 74-88.
- Touré YT, Petrarca V, Traoré SF, Coulibaly A, Maïga HM, Sankaré O *et al.* Ecological genetic studies in the chromosomal form Mopti of *Anopheles gambiae* s.str. in Mali, west Africa. *Genetica* 1994; 94 : 213-23.
- Mushinzimana E, Munga S, Minakawa N, Li L, Feng CC, Bian L *et al.* Landscape determinants and remote sensing of anopheline mosquito larval habitats in the western Kenya highlands. *Malar J* 2006; 5 : 13.
- Diuk-Wasser MA, Dolo G, Bagayoko M, Sogoba N, Toure MB, Mghaddam M *et al.* Patterns of irrigated rice growth and malaria vector breeding in Mali using multi-temporal ERS-2 synthetic aperture radar. *Int J Remote Sens* 2006; 27 : 535-48.
- Wood B, Washino R, Beck L, Hibbard K, Pitcairn M, Robert D *et al.* Distinguishing high and low anopheline-producing rice fields using remote sensing and GIS technologies. *Prev Vet Med* 1991; 11 : 277-88.
- Beck LR, Rodriguez MH, Dister SW, Rodriguez Ad, Rejmankova E, Ulloa A *et al.* Remote sensing as a landscape epidemiologic tool to identify villages at high risk for malaria transmission. *Am J Trop Med Hyg* 1994; 51 : 271-80.
- Rejmankova E, Roberts DR, Pawley A, Manguin S, Polanco J. Predictions of adult *Anopheles albimanus* densities in villages based on distances to remotely sensed larval habitats. *Am J Trop Med Hyg* 1995; 53 : 482-8.
- Roberts DR, Paris JF, Manguin S, Harbach RE, Woodruff R, Rejmankova E *et al.* Predictions of malaria vector distribution in Belize based on multispectral satellite data. *Am J Trop Med Hyg* 1996; 54 : 304-8.
- Tran A, Poncon N, Toty C, Linard C, Guis H, Ferré JB *et al.* Using remote sensing to map larval and adult populations of *Anopheles hyrcanus* (Diptera: Culicidae) a potential malaria vector in Southern France. *Int J Health Geogr* 2008; 7 : 9.
- Patz JA, Strzepak K, Lele S, Hedden M, Greene S, Noden B *et al.* Predicting key malaria transmission factors, biting and entomological inoculation rates, using modelled soil moisture in Kenya. *Trop Med Int Health* 1998; 3 : 818-27.
- Bogh C, Lindsay SW, Clarke SE, Dean A, Jawa M, Pinder M *et al.* High spatial resolution mapping of malaria transmission risk in The Gambia, West Africa, using LANDSAT TM satellite imagery. *Am J Trop Med Hyg* 2007; 76 : 875-81.
- Thomas CJ, Lindsay SW. Local-scale variation in malaria infection amongst rural Gambian children estimated by satellite remote sensing. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 2000; 94 : 159-63.
- Sithiprasasna R, Ugsang DM, Honda K, Jones JW, Singhasivanon P. Ikonos-derived malaria transmission risk in northwestern Thailand. *Southeast Asian J Trop Med Public Health* 2005; 36 : 14-22.
- Thomson MC, Connor SJ, D'Alessandro U, Rowlingson B, Diggle P, Cresswell M *et al.* Predicting malaria infection in Gambian children from satellite data and bed net use surveys: the importance of spatial correlation in the interpretation of results. *Am J Trop Med Hyg* 1999; 61 : 2-8.
- Snow RW, Marsh K, Le Sueur D. The need for maps of transmission intensity to guide malaria control in Africa. *Parasitol Today* 1996; 12 : 455-7.
- Craig MH, Snow RW, Le Sueur D. A climate-based distribution model of malaria transmission in Sub-Saharan Africa. *Parasitol Today* 1999; 15 : 105-11.
- Gemperli A, Sogoba N, Fondjo E, Mabaso M, Bagayoko M, Briët OJ *et al.* Mapping malaria transmission in West and Central Africa. *Trop Med Int Health* 2006; 11 : 1032-46.
- Kleinschmidt I, Bagayoko M, Clarke GP, Craig M, Le Sueur D. A spatial statistical approach to malaria mapping. *Int J Epidemiology* 2000; 29 : 355-61.
- Omumbo JA, Hay SI, Goetz SJ, Snow RW, Rogers DJ. Updating historical maps of transmission intensity in East Africa using remote sensing. *Photogram Eng and Remote Sens* 2002; 68 : 161-6.
- Omumbo JA, Hay SI, Snow RW, Tatem AJ, Rogers DJ. Modelling malaria risk in East Africa at high-spatial resolution. *Trop Med Int Health* 2005; 10 : 557-66.

41. Guerra CA, Hay SI, Luciaparedes LS, Gikandi PW, Tatem AJ, Noor AM *et al.* Assembling a global database of malaria parasite prevalence for the Malaria Atlas Project. *Malar J* 2007; 6 : 17.
42. Guerra CA, Gikandi PW, Tatem AJ, Noor AM, Smith DL, Hay SI *et al.* The limits and intensity of *Plasmodium falciparum* transmission: implications for malaria control and elimination worldwide. *PLoS Med* 2008; 5: e38.
43. Rahman A, Kogan F, Roytman L. Analysis of malaria cases in Bangladesh with remote sensing data. *Am J Trop Med Hyg* 2006; 74 : 17-9.
44. 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.
45. Nihei N, Hashida Y, Kobayashi M, Ishii A. - Analysis of malaria endemic areas on the Indochina Peninsula using remote sensing. *Jpn J Infect Dis* 2002; 55 : 160-6.
46. Gomez-Elipe A, Otero A, van Herp M, Aguirre-Jaime A. - Forecasting malaria incidence based on monthly case reports and environmental factors in Karuzi, 1997-2003. *Malar J* 2007; 6 : 129.
47. Myers MF, Rogers DJ, Cox J, Flahault A, Hay SI. Forecasting disease risk for increased epidemic preparedness in public health. *Adv Parasitol* 2000; 47 : 309-30.
48. Grover-Kopec E, Kawano M, Klaver RW, Blumenthal B, Ceccato P, Connor SJ. , *et Coll.* An online operational rainfall-monitoring resource for epidemic malaria early warning systems in Africa. *Malar J* 2005; 4 : 6.
49. Britch SC, Linthicum KJ, Anyamba A, Tucker CJ, Pak EW, Maloney FA jr *et al.* Satellite vegetation index data as a tool to forecast population dynamics of medically important mosquitoes at military installations in the continental Unites States. *Mil Med* 2008; 173 : 677-83.
50. Claborn DM, Masuoka PM, Klein TA, Hooper T, Lee A, Andre RG. A cost comparison of two malaria control methods in Kyunggi Province, Republic of Korea, using remote sensing and geographic information systems. *Am J Trop Med Hyg* 2002; 66 : 680-5.
51. Machault V, Orlandi-Pradines E, Michel R, Pagès F, Texier G, Pradines B *et al.* Remote sensing and malaria risk for military personnel in Africa. *J Travel Med* 2008; 15 : 216-20.
52. Kaya S, Pultz TJ, Mbogo CM, Beier JC, Mushinzimana E. The use of radar remote sensing for identifying environmental factors associated with malaria risk in coastal Kenya. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '02) 2002.
53. Tatem AJ, Guerra CA, Kabaria CW, Noor AM, Hay SI. Human population, urban settlement patterns and their impact on *Plasmodium falciparum* malaria endemicity. *Malar J* 2008; 7 : 218.
54. UNPD - World Urbanization Prospects: the 2007 Revision Population Database.
55. Jacob BG, Regens JL, Mbogo CM, Githeko AK, Swalm CM, Githure JI *et al.* Capabilities of multispectral thermal data for identification of *Anopheles gambiae* mosquito larval habitats in African urban environments. *Int J Remote Sens* 2005; 26 : 523-34.
56. Caldas de Castro M, Yamagata Y, Mtasiwa D, Tanner m, Utzinger J, Keiser J *et al.* Integrated urban malaria control: a case study in Dar es Salaam, Tanzania. *Am J Trop Med Hyg* 2004; 71 : 103-17.
57. Eisele TP, Keating J, Swalm C, Mbogo CM, Githeko AK, Regens JL *et al.* Linking field-based ecological data with remotely sensed data using a geographic information system in two malaria endemic urban areas of Kenya. *Malar J* 2003; 2 : 44.
58. Tatem AJ, Hay SI. - Measuring urbanization pattern and extent for malaria research: a review of remote sensing approaches. *J Urban Health* 2004; 81 : 363-76.
59. Keiser J, Utzinger J, Caldas de Castro M, Smith TA, Tanner M, Singer BH. Urbanization in sub-saharan Africa and implication for malaria control. *Am J Trop Med Hyg* 2004; 71 : 118-127.
60. Hay SI, Tatem AJ. - Remote sensing of malaria in urban areas: two scales two problems. *Am J Trop Med Hyg* 2005; 72 : 655-7.
61. Siri JG, Lindblade KA, Rosen DH, Onyango B, Vulule J, Slutsker L *et al.* Quantitative urban classification for malaria epidemiology in sub-Saharan Africa. *Malar J* 2008; 7 : 34.
62. Jacob BG, Muturi E, Halbig P, Mwangangi J, Wanjogu RK, Mpanga E *et al.* Environmental abundance of *Anopheles* (Diptera: Culicidae) larval habitats on land cover change sites in Karima village, Mwea rice scheme, Kenya. *Am J Trop Med Hyg* 2007; 76 : 73-80.
63. Tucker CJ. - Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens Environ* 1979; 8 : 127-50.
64. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP 351. 1973 : 309-317.

**IRD**  
INSTITUT RECHERCHE DÉVELOPPEMENT

# Moustiquaires imprégnées et résistance des moustiques aux insecticides

Frédéric Dorlet

ACTEURS

Support imprimé support numérique

Le contrôle du paludisme requiert plusieurs moyens de lutte associés au sein de stratégies adaptées au contexte environnemental et épidémiologique. Les moustiquaires imprégnées de pyréthrinoides constituent l'un des outils présents dans cette lutte : leur utilisation est simple et permet une protection individuelle et collective durable et accessible à tous.

Ensemble, depuis plus de dix ans, Anopheles gambiae, le principal vecteur de malaria en Afrique, est devenu résistant à de nombreux insecticides. Cette résistance pose des questions d'ordre fondamental et opérationnel : la composition et les modalités d'usage des moustiquaires, la durée d'attente d'après l'application d'une moustiquaire imprégnée de pyréthrinoides, les modalités de lavage des moustiquaires imprégnées ?

A travers la synthèse de travaux de recherche réalisés par un consortium que lui a permis cet ouvrage, Frédéric Dorlet propose des recommandations d'usage basées notamment, pendant l'attente, sur une approche indispensable de lutte contre le paludisme.

**Précédé de**  
un chapitre de Frédéric Dorlet sur les moustiquaires imprégnées (M.I.)  
SUSANNE BOUAFIA, ingénieur en recherche, a travaillé de 2004 à 2007 sur le projet de recherche de lutte contre le paludisme en Afrique de l'ouest. Elle a travaillé sur la résistance aux insecticides et la durabilité des moustiquaires imprégnées. Elle est actuellement chercheuse au Centre de Recherche en Santé Publique de l'IRD.

**IRD**  
1713, rue Lavoisier  
91800 Paris Cedex 03  
ed.dorlet@ird.fr  
www.ird.fr

**Diffusion**  
IRD  
12, av. de l'Université  
91144 Evry-Corbeil  
Tel : 01 49 52 71 33  
e.tourange@ird.fr

21 €

9782746406343