

UTILISATION DES SATELLITES DANS LE DOMAINE DE LA SANTE PUBLIQUE EN MILIEU TROPICAL

J-B. MEYNARD, E. ORLANDI, C. ROGIER, K. SBAI IDRISSE, X. DEPARIS, C. PEYREFFITE, E. LIGHTBURN, D. MALOSSE, R. MIGLIANI, A. SPIEGEL, J-P. BOUTIN

• Travail de la Médecine des collectivités (J-B.M., D.M., Assistants du SSA; K.S.I., Docteur en médecine de l'Armée Royale du Maroc; R.M., Spécialiste du SSA; J-P.B., Professeur agrégé, Chef de service), du Laboratoire de Parasitologie (E.O., Engagée volontaire du SSA; C.R., Assistant du SSA), du Laboratoire de virologie (C.P., Assistant du SSA), Institut de Médecine Tropicale du Service de Santé des Armées, Marseille, du Service de Dermatologie (E.L., Assistant du SSA), Hôpital d'Instruction des Armées Laveran, Marseille, France, de l'Institut Pasteur de Guyane (X.D., Spécialiste du SSA), Cayenne et de la Médecine des collectivités (A.S., Professeur agrégé, Chef de service), Hôpital d'Instruction des armées Bégin, Paris • Fax : +33 (0) 4 91 52 26 07 • E-mail: intssa.medco@wanadoo.fr •

Med Trop 2003; **63** : 7-16

L'émergence et la réémergence de maladies transmissibles à fort potentiel épidémique poussent les acteurs de santé publique à développer et à utiliser de nouveaux moyens de lutte. Les satellites font partie de cet arsenal. Leur utilisation, largement répandue dans de nombreux domaines, fait l'objet de controverses dans le monde médical. Les satellites de communication et les systèmes de positionnement sont les plus utilisés, permettant l'aide au diagnostic pour les médecins isolés, le soutien d'équipes chirurgicales à distance et la gestion de situations de médecine de catastrophe. Mais, les autres types de données satellitaires sont encore sous-utilisées. Celles-ci peuvent théoriquement permettre de surveiller et de détecter plus vite des phénomènes épidémiques voire de les prédire, mais aussi d'étudier le rôle joué par les facteurs environnementaux en les intégrant aux facteurs humains, animaux et entomologiques dans les études épidémiologiques. L'intérêt de leur utilisation dans le domaine de la santé publique a suscité des travaux dont les conclusions sont partagées.

L'objectif de cette revue est de faire le point sur les différents types de données satellitaires exploitables et sur les travaux de santé publique menés en milieu tropical qui les ont déjà pris en compte. Nous abordons également les utilisations possibles de ce type de données.

Satellites et données satellitaires

Les satellites sont des instruments de télédétection, science qui permet d'obtenir une information sur un objet, une région ou un phénomène par l'analyse des don-

nées acquises grâce à un dispositif qui n'est pas en contact avec l'objet, la région ou le phénomène étudié (1). Ils présentent des intérêts dans trois domaines : la communication, le positionnement et l'observation de la terre.

Il existe différents types de satellites, placés en orbite à différentes altitudes (Fig. 1). Les satellites géostationnaires sont situés sur une orbite équatoriale à une altitude proche de 36000 km et sont géosynchrones (positionnés au-dessus d'un point fixe). D'autres satellites de haute altitude sont situés à 20000 km de la terre, sur une orbite quasi-circulaire et leur période de révolution est de 12 heures. Les satellites héliosynchrones sont sur une orbite quasi polaire aux alentours de 700 km, ils passent au-dessus d'un même point chaque jour environ à la même heure locale. Les satellites jouent le rôle à la fois de capteur et de vecteur d'énergie, les longueurs d'onde utilisées se situant dans le domaine du visible (longueur d'onde de 0,4 à 0,8 µm), de l'infrarouge (longueur d'onde de 0,8 à 14 µm) et des micro-ondes (longueur d'onde entre 3 mm et 30 cm). Ils sont utilisés en fonction de leurs caractéristiques (1) : la fauchée (taille de la zone au sol enregistrée) et la résolution (taille du plus petit élément discernable). Il existe des satellites à basse résolution spatiale (2,5 à 5,5 km pour Météosat V), à haute et très haute résolution spatiale (2 à 5 m pour SPOT 5, 1 m pour IKONOS). Des satellites militaires permettent des résolutions inférieures à 1 mètre mais leurs données sont confidentielles.

Les satellites de communication se situent sur des orbites géostationnaires, comme le réseau Inmarsat de 9 satellites (quatre satellites actifs et cinq de secours), mais aussi sur des orbites héliosyn-

chrones, comme le réseau Iridium qui assure une couverture planétaire grâce à ses 66 satellites ou le système Globalstar avec ses 48 satellites à orbite basse.

Plusieurs systèmes de positionnement sont couramment utilisés, dans des domaines d'application différents. Le système ARGOS, franco-américain, dispose d'un réseau de satellites de la National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA) et de 8500 balises terrestres. Il permet de suivre en temps réel les migrations d'animaux (oiseaux, mammifères terrestres ou marins) sur plusieurs milliers de kilomètres, tout en fournissant des informations comme la température et le rythme cardiaque de l'animal, la profondeur de ses plongées et les caractéristiques physiques de son environnement. Il est aussi largement utilisé pour le suivi des matières dangereuses. Le système COSPAS-SARSAT, impliquant 33 pays, est constitué d'un réseau de 12 satellites, de 200000 balises constituant un système de secours et de localisation des cas de détresse. Le plus connu des systèmes de positionnement est le système GPS (global positioning system) développé par le département de la Défense américain (US DoD). Il s'agit d'un système de 24 satellites qui transmettent des signaux en un temps précis, fournissant directement des mesures de localisation sur la surface de la terre. La précision de la mesure dépend du type de matériel utilisé et varie de 50 m à quelques cm. Ce système est opérationnel depuis 1994, son accès est libre et gratuit, il peut supporter un nombre illimité d'utilisateurs simultanés, ce qui explique qu'il est utilisé dans de nombreux domaines.

Les satellites d'observation de la terre permettent l'acquisition d'images de la terre. Ce sont des images de réflectance

Avancée

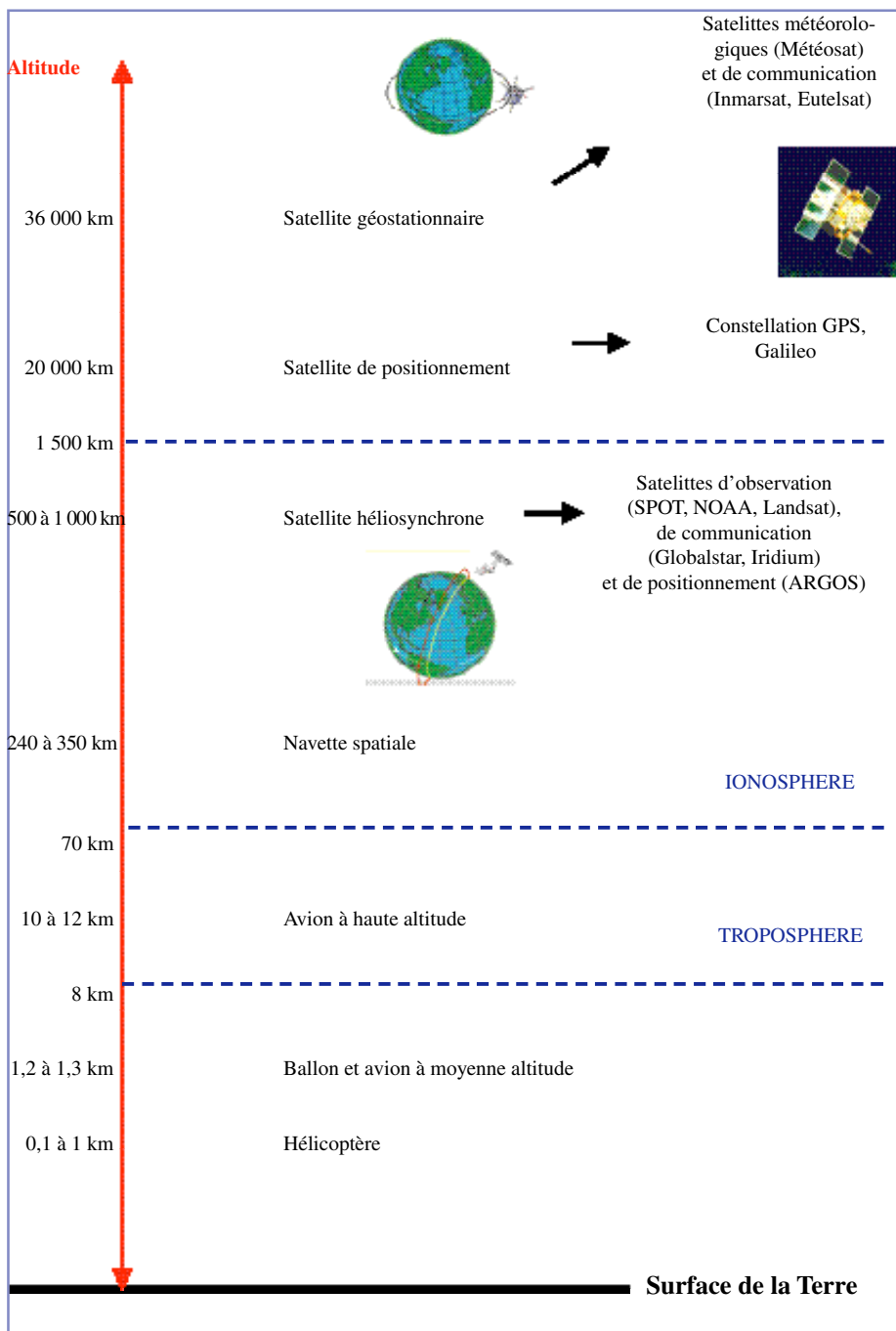


Figure 1 - Altitude des satellites et autres vecteurs de télédétection.

des surfaces naturelles, véritables signatures spectrales qui varient selon les propriétés physiques, biologiques et chimiques. Ainsi la réflectance du sol dépend de sa nature minérale, de ses altérations, de sa texture, de sa structure et de l'humidité. La réflectance de la végétation dépend de l'activité chlorophyllienne des plantes, de leur morphologie et de l'eau contenue dans les feuilles. La plupart des radiations sont absorbées dans l'eau mais la profondeur, la présence d'algues et de minéraux peuvent modifier sa réflectance.

Les images acquises par satellites ne sont pas utilisables directement et nécessitent l'utilisation d'un système de traitement d'images (STI) mettant en œuvre des logiciels de corrections géométriques, d'amélioration des contrastes ainsi que des traitements d'extraction d'informations. Ces extractions permettent, grâce à des systèmes de filtre, de mettre en place des classifications supervisées, de calculer des indices de végétation comme le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Fig. 2). Les images ainsi obtenues

présentent de nombreux intérêts pour les utilisateurs. Elles peuvent donner une vue générale et homogène sur de grands territoires (NOAA : 2 500 km x 2 500 km, Landsat : 183 km x 172 km, SPOT 60 km x 60 km), permettant une continuité spatiale de l'information, une exactitude et une précision uniformes (Fig. 3). La fréquence d'acquisition des données, dépend de la capacité de revisite des satellites (NOAA : 0,5 j, SPOT : 3 à 6 j, Landsat : 16 j). Des séries temporelles d'images sont utilisables pour le suivi de phénomènes (déforestation, érosion, etc.). Il est possible de programmer les acquisitions pour répondre à des besoins urgents (inondations, tremblements de terre, épidémies). La capacité de vision stéréoscopique (grâce aux systèmes de visée oblique) permet la création de modèles numériques de terrain. Les images basse résolution permettent un large champ de vision (2 000 x 2 000 km) avec une capacité de revisite journalière. Elles sont utilisées pour le suivi de la végétation et l'estimation de la production de la biomasse végétale (système de suivi et d'alerte de la sécheresse). Les images de haute et très haute résolution couvrent un champ de vision plus étroit avec une capacité de revisite plus faible (2 à 3 jours). Elles permettent la cartographie et le suivi de l'occupation des sols (forêts, zones urbaines, zones en eau), la cartographie d'événements (feux de forêts, inondations) et de réseaux (routes, voies ferrées).

Ces différentes données correspondent à de l'information géographique (IG). L'IG est la représentation d'un objet ou d'un phénomène réel, localisé dans l'espace à un moment donné et la description des relations spatiales entre les objets (2). 80% de l'information manipulée dans le monde a une composante géographique (2). Pour être efficace, cette information doit être à jour, rapidement disponible, en accord avec les besoins de l'utilisateur en terme de contenu et de précision et facilement exploitable. Le besoin d'outils performants pour collecter, stocker, analyser et restituer cette information est réel. La mise en place de systèmes d'information géographique (SIG) permet de répondre à ce besoin. Les SIG sont des outils de gestion et d'analyse de l'IG



Figure 2 - Animation NDVI en Afrique de l'Ouest, produite par SPOT 4, Données de MEDIAS-France, 2001.

Le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) est une mesure de la quantité et de la densité de la végétation de surface de la terre. Le niveau du NDVI est associé à l'importance de la photosynthèse dans la végétation et au niveau d'humidité.

Le calcul de cet indice nécessite la fabrication de nouveaux canaux par combinaisons de bandes spectrales. La végétation absorbe le rouge (R, visible) et reflète le presque infra-rouge (PIR). Le calcul du NDVI est le suivant :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}}$$

Cet index normalisé varie entre [- 1 ; + 1].

La résolution spatiale (taille du plus petit élément discernable) des données NDVI est de 7,638 km. L'échelle couleur présentée sur l'animation satellite s'étend des zones les plus humides (la mer en bleu) et denses en végétation (dégradé de violet et rouge) jusqu'aux zones les plus sèches et sahéliennes (gris et jaune).

dont la finalité est l'aide à la décision. Plusieurs centaines de SIG existent sur le marché, le choix dépend des objectifs du système et du niveau de formation des utilisateurs.

Les domaines d'utilisation des satellites sont nombreux : la démographie, l'agriculture et la pêche, la gestion des programmes d'alimentation, avec notamment le *Famine Early Warning System* (FEWS) qui vise à détecter les risques de famine et à permettre d'adapter les mesures d'aide précocement. En météorologie, les données satellitaires sont utilisées quotidiennement pour la surveillance mais aussi pour la prédiction.

Utilisation en santé publique en milieu tropical

L'utilisation des données satellitaires apporte une nouvelle dimension à l'épidémiologie traditionnelle et à la santé publique. Ces données sont utilisables à la fois dans le champ de l'épidémiologie descriptive, notamment dans celui de la surveillance, mais aussi dans le champ de l'épidémiologie analytique. Elles peuvent fournir de nouveaux outils de gestion en santé publique.

L'utilisation des satellites de communication et de positionnement permet l'acquisition et la collecte d'informations sanitaires géoréférencées en temps réel ou

en temps presque réel. Les systèmes de surveillance épidémiologique, suffisamment sophistiqués pour intégrer ces nouvelles technologies, permettent une meilleure réactivité, une détection plus précoce des phénomènes épidémiques et sont plus adaptés pour le suivi de populations mobiles. Ils entrent dans le concept de système d'alerte sanitaire précoce HEWS (*Health Early Warning System*).

En épidémiologie analytique, l'intérêt est davantage l'étude d'association entre les maladies transmissibles et les facteurs environnementaux. La connaissance de ces associations peut permettre d'identifier des zones à risque, de modéliser et de prédire la survenue des maladies. Les principaux indicateurs environnementaux utilisés pour ces études sont des indices de végétation et d'humidité, comme le NDVI, la température du sol, la température, la couleur et la profondeur des océans, l'hydrologie et la pluviométrie, l'importance et la direction des vents, l'étendue des surfaces agraires, des zones de déforestation, des espaces urbains, le suivi des flux migratoires humains et animaux. Ces données sont disponibles sur des sites Internet gratuits ou payants (cf. encadré).

Plusieurs travaux ont déjà fait la synthèse de l'utilisation des données satellitaires, dans le domaine des maladies à transmission vectorielle (3) ou dans celui de l'entomologie (4). Nous proposons ici une revue plus large des études déjà menées en santé publique en milieu tropical pour les maladies infectieuses.

Paludisme

L'utilisation des nouvelles technologies intégrant les données satellitaires permet d'étudier le paludisme à différentes échelles : du niveau local au niveau continental. Les relations complexes entre données environnementales, densité vectorielle, paludisme infection et paludisme

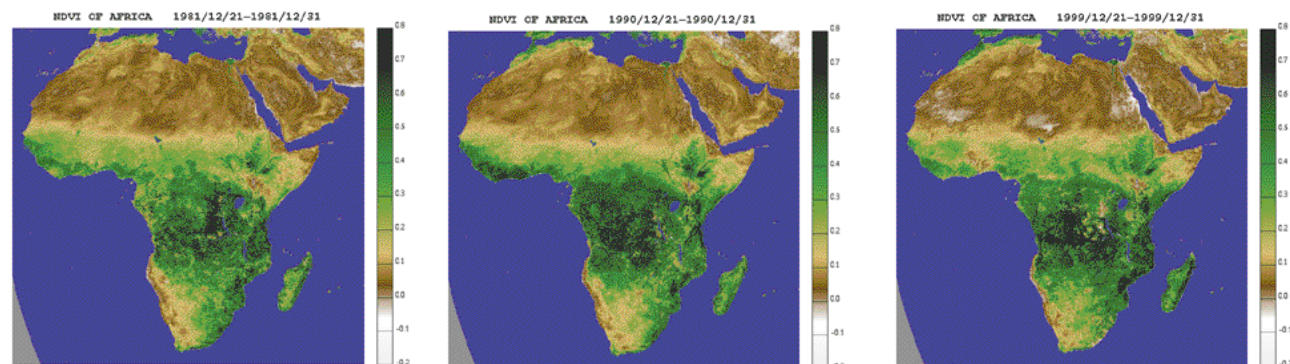


Figure 3 - Evolution des NDVI sur le continent africain de 1981 à 1999 (Imagerie NOAA/NASA 8 km Pathfinder AVHRR Land Data Set).

Avancée en Avancée

maladie peuvent être étudiées. Au début du XX^e siècle, des auteurs indiens notaient que la combinaison entre l'absence de paludisme pendant 5 ans, une pluviométrie anormale entre juillet et août et le prix local du blé (indicateur de l'état nutritionnel moyen) permettait de prédire la survenue et la distribution des cas de paludisme avec une « précision considérable » (5). Les nombreux travaux réalisés depuis ont montré que les niveaux d'infection palustre varient dans le temps en fonction de paramètres extrinsèques, comme le climat, et intrinsèques, comme le niveau d'immunité (6). La balance entre ces paramètres détermine le niveau d'endémicité palustre dans une zone. Les systèmes d'alerte précoce utilisés en surveillance épidémiologique doivent donc inclure ces deux types de paramètres. Les nouvelles technologies mettent à disposition des scientifiques de nombreuses données. Mais une étape de compréhension des rôles respectifs des facteurs intrinsèques et extrinsèques est indispensable avant de pouvoir utiliser correctement ces nouveaux outils pour prédire les épidémies. Dans les régions de faible niveau d'endémicité, les variations spatiales et temporelles du paludisme sont principalement dues aux facteurs extrinsèques. Quand le niveau d'endémicité augmente, elles sont plutôt dues aux facteurs intrinsèques. Au-dessus d'un certain niveau d'endémicité, le lien entre cycle d'infection et données satellitaires n'est pas évident (6).

La connaissance de la répartition géographique des espèces d'anophèles vecteurs du paludisme est essentielle pour diriger les programmes de lutte. Pendant des années, cette connaissance a été accumulée sur tout le continent africain par des équipes d'entomologistes et de spécialistes du paludisme. Une étude a eu pour objectif de réunir ces informations (2 537 enregistrements, à propos de 1 231 localités, provenant de 215 études produites de 1944 à 2000) sur une carte unique (7). Cette étude a permis de mettre en évidence une liaison entre le niveau annuel de pluviométrie et la présence d'*Anopheles gambiae*. Elle a aussi permis la prédiction de la distribution de 5 espèces d'*A. gambiae* en Afrique. La base de données constituée continue à être mise à jour. En Afrique de l'Ouest, une liaison a été mise en évidence entre l'importance des précipitations annuelles et la densité des populations d'*A. gambiae* s.s. et d'*A. arabiensis* (8). Cette relation a permis de prédire la présence et la distribution de ces deux espèces vectrices en Tanzanie. D'autres auteurs ont proposé une prédiction numérique de la

• QUELQUES SITES INTERNET UTILES •

• Institutions

CNES (Centre National d'Etudes Spatiales)

<http://www.cnes.fr>

NASA (National Aeronautics and Space Administration)

<http://www.nasa.gov>

ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasting)

<http://www.ecmf.int/services/seasonal/forecast/index.html>

ADDS (Africa Data Dissemination Service)

<http://edcint.cr.usgs.gov/adds/adds.html>

SADC (South Africa Development Cooperation)

<http://www.zimbabwe.net/sadc-fantr/rsu/rsu.htm>

CHAART (Center for Health Applications of Aerospace Related Technologies)

<http://geo.arc.nasa.gov/sgc/health/chaart.html>

ITC (International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences)

<http://www.itc.nl/home.html>

• Données Géographiques

Carte climatique du monde fournie par la FAO

<http://www.fao.org/waicent/faoinfo/sustdev/eidirect/climate/eisp0002.htm>

Carte des sols du monde fournie par la FAO

<http://www.fao.org/ag/agl/dsmw.htm>

Données météorologiques et de biomasse dans la région du Sahel

<http://www.orstom.fr/hapex>

• Images satellites

Landsat, IRS

<http://www.spaceimaging.com>

Spot image

<http://www.spotimage.fr>

Ikonos

<http://www.spaceimaging.com>

Earth Resources Observation Systems Data Center

<http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/v0dataproducts.htm>

Radarsat

<http://www.rsi.ca>

CORINE land cover

<http://natlan.eea.eu.int/datasets/viewmap1.htm#landcover#5>

• Catalogues de données

Catalogue des données par pays

<http://www.gisdatadepot.com/catalog/>

Catalogue des sources de données en France

<http://www.cnig.fr/catalogue.0.fr.html>

Listes d'adresses

<http://oddens.geog.uu.nl/>

Avancées en médecine avancée

distribution de la transmission du paludisme, reposant sur les contraintes du climat sur le développement du parasite et du vecteur. Ils ont comparé les prédictions à des données de terrain et des cartes historiques, et ont déduit une prédiction de l'impact des changements climatiques (9).

Le taux d'inoculation entomologique (EIR), nombre de piqûres infectées par homme et par unité de temps, a pu être prédit grâce aux données satellitaires en Afrique (10). Les résultats ont été comparés aux données de terrain, avec une bonne concordance ($kappa = 0,771 \pm 0,064$). Il a été possible de définir 5 zones différentes d'EIR. Pour un certain nombre de régions, les données de terrain étaient insuffisantes et le classement dans une zone d'EIR n'a pu être effectué. Les prédictions ne sont donc pas disponibles pour ces régions. Au Kenya et en Ouganda, des auteurs ont montré que la durée de la saison de transmission peut être prédite en fonction du nombre de mois où les NDVI sont supérieurs à certaines valeurs (11). Les cartes de prédiction de saison de transmission ainsi réalisées étaient similaires aux données historiques de saisons de transmission au Kenya.

La prédiction de l'incidence et de la prévalence du paludisme est plus complexe. Les données de terrain sont souvent insuffisantes. Plusieurs études à l'échelon local ont cependant abouti à des résultats significatifs. Ainsi, au Kenya, une corrélation entre le NDVI et le nombre d'admissions hospitalières mensuelles pour paludisme chez les enfants a été mise en évidence dans trois structures hospitalières ($r^2 = 0,71$). Le seuil de 0,4 était utilisé pour le NDVI afin de déterminer la saisonnalité (12). En Gambie, une étude menée chez des enfants âgés de 1 à 4 ans mettait en évidence une corrélation positive entre la présence de parasites dans le sang et l'âge ou les NDVI et une corrélation négative entre la parasitémie et l'utilisation de moustiquaires (13). Les auteurs proposaient d'utiliser leur modèle pour prédire la prévalence d'enfants infectés en fonction des scénarii d'utilisation des moustiquaires. Toujours en Gambie, les données cliniques et entomologiques collectées entre 1988 et 1989 dans une zone de 30x30 km ont permis la réalisation d'une étude rétrospective (14). Les sites de reproduction des anophèles étaient cartographiés en utilisant le système SPOT avec une résolution spatiale de 20 m. Le risque d'exposition était estimé par l'EIR dans 26 villages où des études cliniques avaient été faites auprès des enfants. Les auteurs montraient que la prévalence parasitaire augmentait avec le niveau d'exposition, en accord avec d'autres études déjà menées

en Afrique sub-saharienne (15), mais ils montraient également qu'à des niveaux d'exposition élevés, la prévalence parasitaire diminuait. La prévalence parasitaire était même corrélée négativement avec la densité vectorielle et l'exposition au parasite dans 10 villages. Les variations de l'utilisation des moustiquaires de lit ne pouvaient expliquer ce résultat. Ces résultats montrent que la connaissance des interactions entomologiques, parasitologiques, immunologiques et cliniques du paludisme sont déterminantes.

Malgré leurs limites, les nouvelles technologies sont utilisées pour la gestion du paludisme en milieu tropical. Plusieurs systèmes de cartes ont été mis en place, comme le Mapping Malaria Risk in Africa (MARA). Le développement des cartes de risques permet une gestion plus précise de la lutte contre les grandes endémies (16). L'utilité de ces cartes de risques dépend cependant de la raison pour laquelle elles sont générées : pour tester une hypothèse, pour identifier des lacunes dans les connaissances, pour fournir un axe directionnel de la surveillance et des efforts de contrôle ou pour évaluer l'efficacité d'une intervention. De nombreuses cartes de risques sont apparues dans la littérature, mais leur interprétation et utilisation ne sont pas aisées. Pour le paludisme, la densité de moustiques femelles n'est pas toujours corrélée avec l'intensité de la transmission parasitaire et l'incidence des accès palustres. Le réseau de soutien technique du projet «Roll Back Malaria» (RBM) de l'OMS a mis au point un outil simple pour suivre le risque épidémique dans les zones de transmission marginales (zones semi-arides et en bordure de désert). Cet instrument est basé sur la différence entre les précipitations observées et la moyenne attendue (17). Ces différences sont reportées sur des cartes disponibles sur Internet qui sont réactualisées tous les 10 jours grâce aux données satellitaires. L'objectif est d'alerter en temps voulu les partenaires de RBM travaillant dans les zones à risque épidémique accru. L'intérêt prévisionnel de ces cartes a été démontré au Botswana, en mettant en évidence une association entre l'incidence du paludisme prédite et celle relevée sur le terrain (avec confirmation biologique). L'utilisation de ces cartes est maintenant recommandée par l'OMS. Elles sont accessibles sur le site de RBM : <http://www.rbm.world.int>. Une autre utilité des données satellitaires comme outil de gestion en santé publique a été démontrée par une étude comparant le coût de deux stratégies de prévention du paludisme pour les militaires américains stationnés en

Corée : la lutte antivectorielle, par traitement larvicide à base de granules de méthoprène, et la chimioprophylaxie par chloroquine et primaquine (18). Les images satellitaires intégrées dans un SIG ont permis de connaître rapidement et facilement la taille des zones à traiter (taille et localisation des gîtes larvaires). La réalisation d'un prélèvement mensuel géoréférencé par GPS de larves d'anophèles au niveau de 90 sites à risque autour de 2 camps où stationnent les militaires américains et l'utilisation conjointe d'images Landsat et Ikonos et d'un logiciel de traitement de l'image ont permis de créer une classification supervisée. Cette classification a rendu possible l'évaluation du coût de la stratégie de lutte antivectorielle au niveau de chaque campement et sa comparaison à celui de la chimioprophylaxie ; elle a servi d'élément d'aide à la décision pour le choix d'une stratégie au niveau de chaque site.

Trypanosomose Humaine Africaine (THA)

La relation entre le NDVI et l'abondance des glossines vectrices de la THA, a été étudiée pour plusieurs espèces avec des résultats variables (19, 20). Au Zimbabwe, la répartition de *Glossina morsitans* était corrélée à la température mensuelle moyenne. Au Kenya et en Tanzanie, l'abondance de *G. morsitans* et de *G. pallidipes* était associée aux NDVI. En Côte d'Ivoire et au Burkina Faso, c'est la température de l'air qui était la plus fortement associée avec la répartition des différentes espèces de glossines. Les auteurs proposent d'utiliser les résultats de ces mesures d'association pour la prédiction (21). En Côte d'Ivoire, une méthodologie de détermination de zones à risque de THA par approche spatialisée a été proposée dans une région, après étude de la distribution de la densité de campements et de la répartition de la prévalence de la maladie (22). La cartographie des densités de glossines et de bovins d'une zone agro-pastorale du Sud du Burkina Faso a été effectuée à partir de données de télédétection et à l'aide d'un SIG (23). Les biotopes des glossines ont été replacés dans leur environnement au sein de « paysages » repérés sur image satellite. Les déplacements de troupeaux ont été modélisés pour obtenir une carte de fréquentation de l'espace. Le croisement de ces informations a abouti à une modélisation de « paysages épidémiologiques dangereux », localisés et identifiés dans une perspective de lutte ciblée contre le vecteur et la maladie.

Avancée en Avancée

Leishmanioses

Une étude menée au Moyen Orient (24) a montré une association entre les relevés entomologiques de *Phlebotomus papatasi*, vecteur de *Leishmania major*; les températures recueillies par 114 stations météorologiques de neuf pays et les NDVI mesurés mensuellement pendant 12 ans par image satellite NOAA avec ses satellites AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). La relation entre les températures et les NDVI associés à la présence de *P. papatasi* a pu être modélisée, permettant d'étendre les résultats à des régions où des données n'étaient pas disponibles et d'établir des cartes de répartition probable de *P. papatasi*. Au Soudan, une étude a permis d'identifier les facteurs environnementaux associés à la présence de *P. orientalis*, vecteur de la leishmaniose viscérale (25). Des données concernant le relief, le type de sols, les espèces végétales et la densité des arbres ont été relevées et des captures de phlébotomes effectuées. Elles ont été confrontées aux données obtenues par satellite NOAA, qui ont permis d'évaluer les moyennes annuelles de

température, la pluviométrie, la température du sol et les NDVI. La présence de *P. orientalis* était associée à certains types de sols et à la présence de certains types d'arbres. Les NDVI mesurés au cours de la saison sèche étaient significativement plus faibles dans les sites où *P. orientalis* a été retrouvé. Les auteurs ont ainsi pu mettre en place une carte de la répartition probable de *P. orientalis* au Soudan (26).

Schistosomiasis

Un atlas de la distribution globale des schistosomiasis élaboré en 1987 est toujours largement utilisé dans les travaux et publications internationales (27). Les données satellitaires ont commencé à être utilisées dans les années 1990 pour étudier la distribution des schistosomiasis en Égypte (28, 29). Les températures du sol diurnes et nocturnes et les NDVI ont été mesurés par imagerie NOAA-AVHRR dans le delta du Nil. Une association a été mise en évidence entre le gradient de température jour-nuit et la prévalence des bilharzioses à *S. haematobium* et *S. mansoni*, mais ce résultat était inconstant dans le temps. Le gradient de

température était également associé à la présence de *Biomphalaria alexandrina*, hôte intermédiaire local de *S. mansoni* et avec la profondeur de la nappe phréatique. Aucune association n'a été mise en évidence entre la prévalence des bilharzioses et les NDVI. Les auteurs pensaient pouvoir utiliser ces résultats pour prédire les zones à risque pour les schistosomiasis.

Dengue

Une équipe australienne a étudié la relation entre la présence d'*Aedes aegypti* et un index de condition de logement (PCI2 : *modified premise condition index*) estimé par des données de télédétection (30). Aucune corrélation n'a été mise en évidence et les auteurs disent ne pouvoir utiliser ces outils comme facteurs prédictifs de l'abondance de vecteurs de la dengue.

L'utilisation des nouvelles technologies trouve par contre son utilité dans le projet « S2E Dengue », surveillance spatiale des épidémies de dengue en Guyane. L'objectif général de ce projet est de concevoir un ensemble d'outils numé-

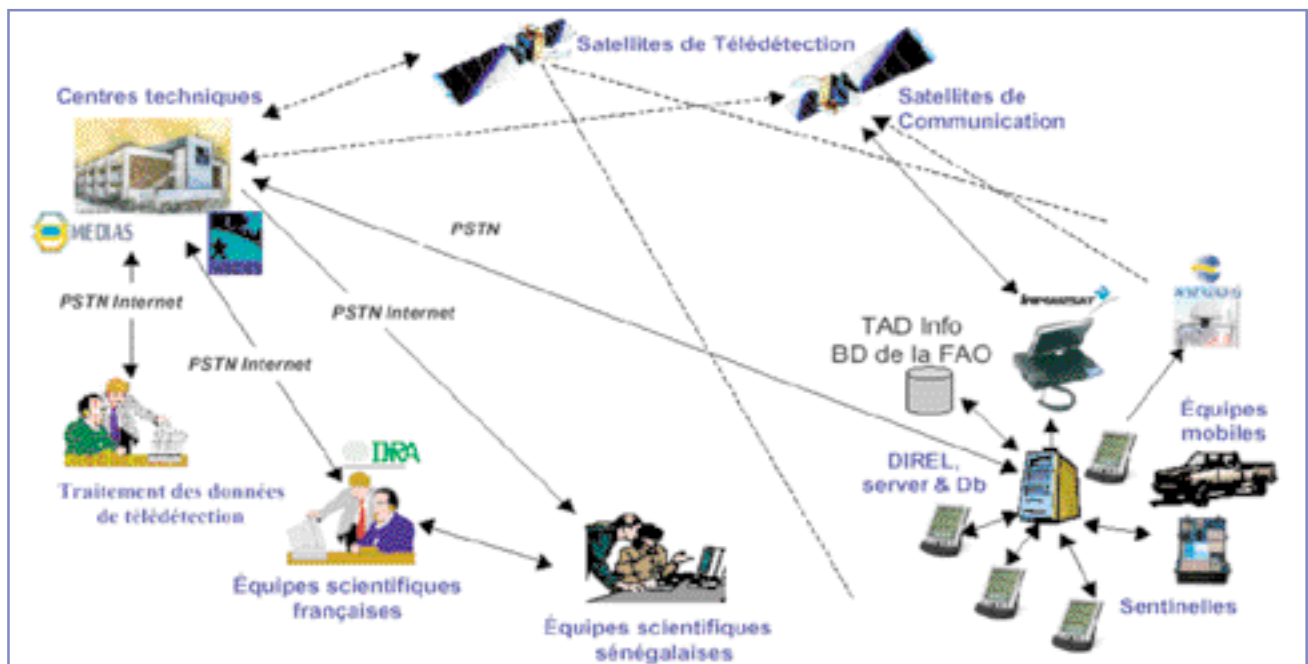


Figure 4 - Architecture du réseau EMERCASE. Schéma du Dr. POIROT, MEDES, Toulouse.

Partenariat français :

INRA-ENV Lyon
CNES Toulouse
CIRAD Montpellier
Medias-France et Météo-France
MEDES Toulouse
CEA, CEN Saclay
UMR CNRS UCB Lyon 1
INRA Centre de Jouy
CRSSA Grenoble

Partenariat sénégalais :

Direction de l'Élevage
Laboratoire National d'Élevage et de Recherches Vétérinaires
Direction de la Météorologie Nationale
Direction de l'Hydraulique
Laboratoire de Physique Atmosphérique
Équipe DIVHA de l'IRD
Institut Pasteur

Avancées en médecine

riques et de méthodes épidémiologiques dont le caractère générique permette d'assurer une surveillance sanitaire dans des populations exposées à des changements sociétaux et/ou écologiques. Ces outils et méthodes sont actuellement déployés sur une plate-forme expérimentale dans le cadre d'un réseau de médecins sentinelles guyanais reliés au centre hospitalo-universitaire et à l'Institut Pasteur de Cayenne.

Fèvre de la vallée du Rift

En 1987, une corrélation a été mise en évidence entre un indicateur intégrant les NDVI mesurés par image satellite NOAA et des paramètres écologiques associés à la présence du virus de la Fièvre de la vallée du Rift (FVR), faisant suggérer par les auteurs que les données satellitaires allaient devenir un outil de prédiction de la FVR au Kenya, mais aussi dans d'autres zones de l'Afrique sub-saharienne (31). La détection avec précision, par imagerie NOAA, des facteurs associés à la présence des vecteurs du virus, comme la moisissure du sol et la pluviométrie, permettrait selon les auteurs de prédire la survenue d'une extension de la FVR et de mettre en œuvre des mesures de lutte spécifique pour éviter une épidémie (32). Les données satellitaires (Landsat) ont également été utilisées pour caractériser et identifier les gîtes de reproduction des vecteurs de la FVR, ainsi que pour évaluer les périodes d'émergence des vecteurs adultes (33). La prise en compte de la pluviométrie, de la température de surface des océans Indien et Pacifique et des NDVI fournis par satellites permettrait selon certains auteurs la prédiction d'épidémies de FVR avec 5 mois d'avance en Afrique de l'Est (34). La validité de ces prédictions reste encore à démontrer. L'importance de l'immunité acquise par une partie des populations exposées et d'autres facteurs déterminant la présence du virus ne semblent pas liés aux données climatiques. En Afrique de l'Ouest, un programme de surveillance spatiale des épidémies a été mis en place depuis mars 2000 : le programme EMER-CASE (Fig. 4). L'objectif de ce programme est de développer un système électronique de surveillance des épidémies, dans des populations à risque, permettant une alerte précoce par la mise en œuvre du système d'information de terrain WIS (*wide information system*) pour le recueil des données épidémiologiques et environnementales, l'analyse spatiale des facteurs d'émergence environnementaux et la modélisation bio-mathématique des processus épidémiques. Initié par un

réseau de vétérinaires français, sénégalais et mauritaniens, ce programme s'étend désormais à la surveillance de la FVR en population humaine.

Maladie de Lyme

Une étude américaine a mis en évidence une corrélation entre la densité de tiques (*Ixodes scapularis*), estimée par des relevés de terrain, et des indices d'humidité (*wetness*) et de végétation (*greenness*), estimés par images Landsat-TM autour de 337 résidences de l'Etat de New York (35). Les zones à risque correspondaient à la présence d'arbres à feuilles caduques. Ces résultats ont été utilisés à l'échelle continentale, utilisant des indices de végétation et de température pour cartographier les zones à risque de maladie de Lyme (36). Des relevés de terrain géoréférencés de tiques (*Ixodes scapularis*) dans 346 sites des Etats Unis d'Amérique et du Canada ont servi de référence aux images NOAA-AVHR, montrant que l'utilisation de ces images satellitaires comme facteur de prédiction avait une sensibilité de 97 % et une spécificité de 89 %. L'utilisation de cartes de prédiction de la densité de tiques permettrait une prévention ciblée sur ces zones (37). Les données satellitaires ont permis de mettre en évidence l'augmentation des zones compatibles avec le développement des tiques entre 1982 et 2000 sur l'ensemble des Etats-Unis, augmentation due selon les auteurs aux variations de température et de pluviométrie (38).

Fièvre Q

Une méthode basée sur les données satellitaires a été utilisée pour cartographier l'incidence de la Fièvre Q à Cayenne en Guyane (39). Un indice de densité de population a été généré par imagerie satellitaire pour déterminer les zones à risque entre 1996 et 2000. Les cartes de risque ainsi réalisées ont été comparées aux données de Fièvre Q en population, montrant une concordance importante entre ces deux incidences.

Onchocercose

Le système de cartographie de l'onchocercose REMO (*Rapid Epidemiological Mapping of Onchocerciasis*) a été expérimenté au début des années 1990 au Cameroun (40, 41) et est utilisé depuis dans le programme de lutte APOC (*African Programme for Onchocerciasis Control*). Il a été employé au Nigeria (42) et en Ouganda (43) et les auteurs ont conclu que cette approche était utile pour l'identification des communautés nécessitant des tra-

tements à l'ivermectine, mais aussi indispensable pour le suivi du programme APOC. L'utilisation massive d'ivermectine dans certaines régions a cependant provoqué des effets indésirables graves, particulièrement dans les régions à haut niveau d'endémicité de loase. L'utilisation des données satellitaires a permis de prédire la localisation géographique de ces zones à haut niveau d'endémicité de loase, zones à risque de survenue d'effets indésirables au traitement par l'ivermectine, et donc de mieux cibler les zones où intensifier la lutte contre l'onchocercose (44).

Filariose lymphatique

L'OMS a décidé de lancer en 1997 un programme d'éradication de la filariose lymphatique. La cartographie de la répartition géographique de cette filariose était donc nécessaire. Un modèle de prévision des zones à risque en fonction de données climatiques a été proposé (45), validé par des données de terrain. Ce modèle était cependant trop général pour être utilisé en gestion de programme (la présence d'eau et de chaleur suffisaient pour que la zone soit classée à risque). Une méthode rapide RAGFIL (*Rapid Geographic Assessment of Bancroftian Filariasis*) a été développée et testée avec succès au Ghana, en Inde et en Tanzanie (46). Une analyse spatiale (47) a été menée dans 4 pays d'Afrique de l'Ouest (Bénin, Burkina Faso, Ghana et Togo). L'objectif était de fournir des éléments permettant de valider des indicateurs prédictifs utilisables dans d'autres zones. Cette étude mettait en évidence que la maladie survient en zone plus sèche que l'on ne l'avait constaté jusque là et que la lutte contre cette endémie nécessitera plus de moyens que ceux prévus initialement.

Méningite

Une étude menée au Bénin sur une période de 28 ans a montré que 14 à 34,5 % des variations d'amplitude de l'incidence de la méningite cérébrospinale était liée à l'harmattan, vent du nord, et à un faible taux d'humidité dans les régions du nord (48). En Nouvelle Zélande, une étude a mis en évidence une association entre l'incidence de la méningite à méningocoque B et la saison et la température ambiante (49). La modélisation en régression de Poisson permettait aux auteurs de prédire l'amplitude et la durée du pic annuel d'incidence de méningite, en fonction des relevés météorologiques fournis notamment par des satellites. L'utilisation de cet outil permettrait une meilleure gestion du phénomène, en utilisant les campagnes médiatiques de prévention au moment le plus opportun.

Choléra

Les images satellitaires ont permis d'étudier les épidémies de choléra au Bangladesh (50). Le réservoir du vibron cholérique y est constitué notamment par le zooplancton. L'abondance du zooplancton est estimée par le capteur de couleur de l'eau SEAWIF. Les cartes comportant les champs de température superficielle et de hauteur des océans ont permis d'établir des cartes de risque d'inondation et, en prenant en compte l'abondance de zooplancton, de prédire les risques d'épidémies de choléra.

PERSPECTIVES

De nombreuses applications sont et seraient possibles dans le domaine de la santé publique en milieu tropical : l'amélioration de la cartographie de certaines zones peu explorées, l'économie de la santé, la gestion des ressources, les déplacements de populations, la gestion des camps de réfugiés. Dans le domaine des maladies infectieuses, un grand nombre d'auteurs estiment qu'il est important d'incorporer les données satellitaires dans les modèles biologiques de transmission. S'il est possible de comprendre les dynamiques de transmission correctement pour modéliser le passé et le présent, on sera vraisemblablement capable de développer des systèmes d'alerte précoce pour l'avenir.

Malgré l'apport considérable que pourraient apporter ces techniques, leur utilisation est encore actuellement peu courante et les obstacles qui freinent les décideurs à développer largement leur emploi restent nombreux. L'utilisation des données satellitaires est souvent perçue comme peu pratique et inappropriée. L'utilisation de SIG demeure techniquement complexe et onéreuse (en termes financier et humain). Ces outils pourraient être facilement utilisés au moins à un échelon central du fait de la répartition des moyens (Ministère de la Santé par exemple). Dans les pays à faible niveau économique, des études coût-efficacité devraient être réalisées avant de s'équiper de ces techniques. Pour développer l'utilisation de ces technologies, les données environnementales doivent être disponibles, dans un format approprié et à un coût acceptable. Des efforts doivent donc être faits pour développer des logiciels et outils utilisables plus rapidement et par un plus grand nombre. L'utilisateur ne doit pas oublier que comme pour les données météorologiques, les prévisions fournies par ce système sont probabilistes et non

déterministes et qu'un certain risque d'erreur existe (51).

La communauté médicale elle-même a été lente à adopter les nouvelles technologies utilisant les données satellitaires. Des auteurs se sont intéressés aux différents obstacles, réels et perçus, qui ont ralenti l'utilisation de ces techniques par le monde médical (52). Leur étude a permis de dégager comme principaux facteurs le manque de prise de conscience des possibilités et avantages à utiliser les données satellitaires, le manque de formations spécifiques adaptées au corps médical, enfin la mauvaise utilisation des données existantes. Ces auteurs proposent un programme de formation et une méthode de sélection des médecins voulant s'impliquer dans le domaine.

Pour développer l'utilisation de ces technologies en santé publique, un consortium pour la surveillance spatiale des épidémies (S2E) a été mis en place par le Centrenational d'études spatiales (CNES) et de nombreux partenaires institutionnels et scientifiques. Le but du consortium S2E est de promouvoir une conception intégrée et transversale de l'étude des grandes maladies épidémiques en étudiant à la fois les facteurs classiques de l'épidémiologie et les facteurs environnementaux. L'objectif est de développer des modèles prédictifs des épidémies et des systèmes d'information. De nombreux pays participent déjà à des programmes de recherche dans le domaine de la santé avec le soutien de ce consortium : l'Inde et la Chine, l'Égypte, le Niger, le Mali, le Burkina Faso, le Sénégal et l'Argentine.

Le développement d'une approche bureautique simplifiée permettant un traitement rapide des données, une gamme plus vaste d'outils SIG disponibles pour un plus grand public non spécialisés est prévisible. Une influence croissante des réseaux (Internet, Intranet) comme source et support de dissémination de l'information est vraisemblable dans les années à venir. Des efforts sont actuellement faits dans la standardisation des formats pour favoriser l'échange des données et l'interopérabilité. Cela permet l'établissement de vastes bases de données continentales ou mondiales (*Corine landcover* en Europe, *Digital chart of the world* aux États-Unis) et le développement d'entrepôts de données sur Internet qui référencent les informations disponibles (<http://www.geographynetwork.com>). Un accroissement du nombre de personnels formés à l'utilisation des SIG, et une plus grande variété de domaines d'utilisation est donc probable.

CONCLUSION

L'utilisation des données satellitaires est complexe et nécessite la mise en place d'équipes pluridisciplinaires spécialisées. Une étape de validation sur jeux de données indépendants est indispensable, mais elle n'a pas toujours été réalisée dans les études présentées. Cette revue montre que l'exploitation des données satellitaires trouve des intérêts dans le domaine de la santé publique en milieu tropical et que des perspectives existent.

Il n'est cependant pas possible d'expliquer toute l'épidémiologie des maladies infectieuses par les seules variations de facteurs évaluablement directement ou indirectement depuis l'espace. Les facteurs liés à l'immunité innée ou acquise, notamment l'immunité de groupe qui empêche la propagation d'une épidémie dans un groupe avant qu'il ne soit complètement immun, ceux qui sont liés aux variations génétiques des agents pathogènes (résistance, variation antigénique) ou encore d'autres facteurs peuvent jouer un rôle éventuellement plus important que les facteurs environnementaux. Le défi actuel est d'intégrer tous ces facteurs dans des modèles prédictifs ■

Remerciements • A Philippe POIROT du MEDES de Toulouse, Antonio GUELL du CNES de Toulouse, Anne Lise TRAN de l'IRD de Guyane, Stéphane DE LA ROCQUE du CIRAD de Montpellier, Coralie MOUTON et Bruno THOLLET du GDTA de Ramonville et Pierre GAZIN de l'IRD de Montpellier.

REFERENCES

- 1 - BONN F, ROCHON G - Précis de télédétection : applications. AUPELF/UREF 1997 Vol.2.
- 2 - DENEGRE J, SALGE F - Les systèmes d'information géographique. Collection Que sais-je ? Presses Universitaires de France ed., Paris, 1996, 127p.
- 3 - BERGQUIST NR - Vector-borne parasitic diseases : new trends in data collection and risk assessment. *Acta Trop* 2001 ; **79** : 13-20
- 4 - MANGUIN S, BOUSSINESQ M - Appart de la télédétection en santé publique : l'exemple du paludisme et autres perspectives. *Med Mal Infect* 1999 ; **29** : 318-324.
- 5 - GILL CA - The prediction of malaria epidemics. *Ind J Med Res* 1926 ; **10** : 1136-1143.
- 6 - ROGERS JR, RANDOLPH SE, SNOW RW, HAY SI - Satellite imagery in the study and forecast of malaria. *Nature* 2002 ; **415** : 710-715.
- 7 - COETZEE M, CRAIG MH, LE SUEUR D - Distribution of African malaria mosquitoes belonging to the *Anopheles gambiae* complex. *Parasitol Today* 2000 ; **16** : 74-77.

Avancée

Résumé •

Le début du millénaire est marqué sur le plan sanitaire par l'émergence et la réémergence de maladies transmissibles à fort potentiel épidémique. La compréhension de cette dynamique se veut maintenant globale, afin de mettre en place des outils et stratégies de lutte plus efficaces pour participer au développement durable. C'est dans ce cadre qu'une nouvelle approche scientifique a été initiée, cherchant à utiliser les données obtenues par des satellites spatiaux pour surveiller et prédire l'extension des maladies. L'utilisation opérationnelle efficace des données satellitaires dans le cadre des programmes d'alimentation et dans de nombreux autres domaines (météorologie, agriculture, pêche) a permis d'aboutir au concept de système d'alerte sanitaire précoce (HEWS, *Health Early Warning System*). Cette démarche nécessite la mobilisation de satellites de communication, d'observation de la terre et de positionnement. Les principales études intégrant des données satellitaires dans le domaine de la santé publique en milieu tropical sont présentées dans cette revue. L'emploi de satellites a permis de développer des réseaux de surveillance épidémiologique plus réactifs et plus adaptés à la mobilité des populations, d'intégrer les paramètres environnementaux (indice de couvert végétal, pluviométrie, couleur de surface des océans) aux paramètres humains, animaux et entomologiques des études épidémiologiques et d'étudier ainsi leur rôle dans le développement ou la réapparition des maladies. Les données satellitaires permettront une meilleure gestion des problèmes de santé publique en milieu tropical.

Mots-clés •

Satellites - Détection à distance - Surveillance épidémiologique - Alerte précoce - Prédiction.

Abstract •

USE OF SATELLITE DATA FOR PUBLIC HEALTH PURPOSES IN TROPICAL AREAS

The epidemiological hallmark of the new millennium has been the emergence or recrudescence of transmissible diseases with high epidemic potential. Disease tracking is becoming an increasingly global task requiring implementation of more and more sophisticated control strategies and facilities for sustainable development. A promising initiative involves the use of satellite technology to monitor and forecast the spread of disease. The Health Early Warning System (HEWS) was designed based on successful application of satellite data in food programs as well as in other areas (e.g. weather, farming and fishing). The HEWS integrates data from communications, remote-sensing and positioning satellites. The purpose of this review is to present the main studies containing satellite data on public health in tropical areas. Satellite data has allowed development of more reactive epidemiological tracking networks better suited to increasing population mobility, correlation of environmental factors (vegetation index, rainfall and ocean surface color) with human, animal and insect factors in epidemiological studies and assessment of the role of such factors in the development or reappearance of disease. Satellite technology holds great promise for more efficient management of public health problems in tropical areas.

Key words •

Satellite technology – Remote sensing – Epidemiological surveillance – Early warning – Forecast.

REFERENCES (SUITE)

- 8 - LINDSAY SW, PARSON L, THOMAS CJ - Mapping the ranges and relative abundance of the two principal African malaria vectors, *Anopheles gambiae sensu stricto* and *An. arabiensis*, using climate data. *Proc Soc Lond B Biol Sci* 1998; **B265** : 847-854.
- 9 - CRAIG MH, SNOW RW, LE SUEUR D. A climate-based distribution model of malaria transmission in sub-Saharan Africa. *Parasitol Today* 1999; **15** : 105-111.
- 10 - 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** : 113-127.
- 11 - 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** : 306-313.
- 12 - 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.
- 13 - THOMSON MC, CONNOR SJ, D'ALESSANDRO U et Coll - 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.
- 14 - 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** : 159-163.
- 15 - HAY SI, OMUMBO J, CRAIG M, SNOW RW - Earth observation, geographic information systems and *Plasmodium falciparum* malaria in sub-Saharan Africa. *Adv Parasitol* 2000; **47** : 173-215.
- 16 - KITRON U - Risk maps : transmission and burden of vector-borne diseases. *Parasitol Today* 2000; **16** : 324-325.
- 17 - WORLD HEALTH ORGANIZATION - Web-based tool for early warning of malaria epidemics in Africa : monitoring current rainfall anomalies in zones at epidemic risk. *Weekly Epidemiological Record* 2002; **32** : 276.
- 18 - CLABORN DM, MASUOKA PM, KLEIN TA et Coll - 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** : 680-685.
- 19 - ROGERS DJ, RANDOLPH SE - Mortality rates and population density of tsetse flies correlated with satellite imagery. *Nature* 1991; **351** : 739-741.

REFERENCES (SUITE)

- 20 - ROGERS DJ, WILLIAMS BG - Monitoring trypanosomiasis in space and time. *Parasitology* 1993; **106** : S77-S92.
- 21 - ROGERS DJ HAY SI PACKER MJ - Predicting the distribution of tsetse flies in West Africa using temporal Fourier processed meteorological satellite data. *Ann Trop Med Parasitol* 1996; **90** : 225-241.
- 22 - LOINTIER M, TRUC P, DRAPEAU L *et Coll* - Méthodologie de détermination de zones à risque de maladie du sommeil en Côte d'Ivoire par approche spatialisée. *Med Trop* 2001; **61** : 390-396.
- 23 - MICHEL V, DE LA ROCQUE S, MICHEL JF *et Coll* - Modélisation de « paysages épidémiologiquement dangereux » par télédétection et SIG. Evaluation du risque trypanosomien pour le bétail dans la zone de Sidéradougou (Burkina Faso). *L'information géographique* 2001; **1** : 73-80.
- 24 - CROSS ER, NEWCOMB WW, TUCKER CJ - Use of weather data and remote sensing to predict the geographic and seasonal distribution of Phlebotomus papatasi in southwest Asia. *Am J Trop Med Hyg* 1996; **54** : 530-536.
- 25 - ELNAIEM DA, CONNOR SJ, THOMSON MC *et Coll* - Environmental determinants of the distribution of Phlebotomus orientalis in Sudan. *Ann Trop Med Parasitol* 1998; **92** : 877-887.
- 26 - THOMSON MC, ELNAIEM DA, ASHFORD RW, CONNOR SJ - Towards a kala azar risk map for Sudan : mapping the potential distribution of Phlebotomus orientalis using digital data of environmental variables. *Trop Med Int Health* 1999; **4** : 105-113.
- 27 - DOUMENGE JP, MOTT KE, CHEUNG C *et Coll* - Atlas of the Global Distribution of Schistosomiasis. Centre de Recherche sur les Espaces Tropicaux. Presses Universitaires de Bordeaux, Université Bordeaux III, Bordeaux, 1987.
- 28 - MALONE JB, HUH OK, FEHLER DP, WILSON PA *et Coll* - Temperature data from satellite imagery and the distribution of schistosomiasis in Egypt. *Am J Trop Med Hyg* 1994; **50** : 714-722.
- 29 - MALONE JB, ABDEL-RAHMAN MS, EL BAHY MM *et Coll* - Geographic information systems and the distribution of Schistosoma mansoni in the Nile Delta. *Parasitol Today* 1997; **13** : 112-119.
- 30 - MOLONEY JM, SKELLY C, WEINSTEIN *et Coll* - Domestic Aedes aegypti breeding site surveillance : limitations of remote sensing as a predictive surveillance tool. *Am J Trop Med Hyg* 1998; **59** : 261-264.
- 31 - LINTHICUM KJ, BAILEY CL, DAVIES FG, TUCKER CJ - Detection of Rift Valley fever viral activity in Kenya by satellite remote sensing imagery. *Science* 1987; **235** : 1656-1659.
- 32 - LINTHICUM KJ, BAILEY CL, TUCKER CJ *et Coll* - Application of polar-orbiting meteorological satellite data to detect flooding of Rift Valley Fever virus vector mosquito habitats in Kenya. *Med Vet Entomol* 1990; **4** : 433-438.
- 33 - POPE KO, SHEFFNER EJ, LINTHICUM KJ *et Coll* - Identification of central Kenyan Rift Valley fever virus vector habitats with Landsat TM and evaluation of their flooding status with airborne imaging radar. *Remote Sensing Environ* 1992; **40** : 185-196.
- 34 - LINTHICUM KJ, ANYAMBA A, TUCKER CJ *et Coll* - Climate and satellite indicators to forecast Rift Valley fever epidemics in Kenya. *Science* 1999; **285** : 397-400.
- 35 - DISTER SW, FISH D, BROS SM *et Coll* - Landscape characterization of peridomestic risk for Lyme disease using satellite imagery. *Am J Trop Med Hyg* 1997; **57** : 687-692.
- 36 - ESTRADA-PENA A - Geostatistics and remote sensing as predictive tools of tick distribution : a cokriging system to estimate Ixodes scapularis (Acari : Ixodidae) habitat suitability in the United States and Canada from advanced very high resolution radiometer satellite imagery. *J Med Entomol* 1998; **35** : 989-995.
- 37 - ESTRADA-PENA A - Forecasting habitat suitability for ticks and prevention of tick-borne diseases. *Vet Parasitol* 2001; **98** : 111-132.
- 38 - ESTRADA-PENA A - Increasing habitat suitability in the United States for the tick that transmits Lyme disease : a remote sensing approach. *Environ Health Perspect* 2002; **110** : 635-640.
- 39 - TRAN A, GARDON J, WEBER S, POLIDORI L - Mapping disease incidence in suburban areas using remotely sensed data. *Am J Epidemiol* 2002; **156**:662-8.
- 40 - NGOUMOU P, WALSH JF, MACE JM. A rapid mapping technique for the prevalence and distribution of onchocerciasis : a Cameroon case-study. *Ann Trop Med Parasitol* 1994; **88** : 463-474.
- 41 - MACE JM, BOUSSINESQ M, NGOUMOU P *et Coll* - Country-wide rapid epidemiological mapping of onchocerciasis (REMO) in Cameroon. *Ann Trop Med Parasitol* 1997; **91** : 379-391.
- 42 - GEMADE EI, JIYA JY, NWOKE BE *et Coll* - Human onchocerciasis : current assessment of the disease burden in Nigeria by rapid epidemiological mapping. *Ann Trop Med Parasitol* 1998; **92** : S79-S83.
- 43 - KATABARWA NM, RICHARDS FO, NDYOMUGYENYI R - In rural Ugandan communities the traditional kinship/clan system is vital to the success and sustainment of the African Programme for Onchocerciasis Control. *Ann Trop Med Parasitol* 2000; **94** : 485-495.
- 44 - THOMSON MC, OBSOMER V, DUNNE M *et Coll* - Satellite mapping of Loa loa prevalence in relation to ivermectin use in west and central Africa. *Lancet* 2000; **356** : 1077-1078.
- 45 - LINDSAY SW, THOMAS CJ - Mapping and estimating the population at risk from lymphatic filariasis in Africa. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 2000; **94** : 37-45.
- 46 - GYAPONG JO, REMME JH - The use of grid sampling methodology for rapid assessment of the distribution of bancroftian filariasis. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 2001; **95** : 681-686.
- 47 - GYAPONG JO, KYELEM D, KLEINSCHMIDT I *et Coll* - The use of spatial analysis in mapping the distribution of bancroftian filariasis in four West African countries. *Ann Trop Med Parasitol* 2002; **96** : 695-705.
- 48 - BESANCENOT JP, BOKO M, OKE PC - Weather conditions and cerebrospinal meningitides in Benin (Gulf of Guinea, West Africa). *Eur J Epidemiol* 1997; **13** : 807-815.
- 49 - LINDSAY AP, HOPE V, MARSHALL RJ, SALINGER J - Meningococcal disease and meteorological conditions in Auckland, New Zealand. *Aust N Z J Public Health* 2002; **26** : 212-218.
- 50 - LOBITZ B, BECK L, HUQ A, WOOD B *et Coll* - Climate and infectious disease : use of remote sensing for detection of Vibrio cholerae by indirect measurement. *Proc Natl Acad Sci USA* 2000; **97** : 1438-1443.
- 51 - THOMSON M, CONNOR S, O'NEILL K, MEERT JP - Environmental information for prediction of epidemics. *Parasitol Today* 2000; **16** : 137-138.
- 52 - WOOD BL, BECK LR, LOBITZ BM, BOBO MR - Education, outreach and the future of remote sensing in human health. *Adv Parasitol* 2000; **47** : 331-344.