



HAL
open science

Apports de la combinaison d'images satellites optique et RADAR dans l'étude des maladies à transmission vectorielle : cas du paludisme à la frontière Guyane française – Brésil

Thibault Catry, Auréa Pottier, Renaud Marti, Zhichao Li, Emmanuel Roux,
Vincent Herbreteau, Morgan Mangeas, Laurent Demagistri, Helen Gurgel,
Nadine Dessay

► To cite this version:

Thibault Catry, Auréa Pottier, Renaud Marti, Zhichao Li, Emmanuel Roux, et al.. Apports de la combinaison d'images satellites optique et RADAR dans l'étude des maladies à transmission vectorielle : cas du paludisme à la frontière Guyane française – Brésil. *Confins - Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia*, 2018, 37, art. no 15027 [32 p. en ligne]. 10.4000/confins.15027 . hal-01959525

HAL Id: hal-01959525

<https://hal.science/hal-01959525>

Submitted on 2 Jun 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Apports de la combinaison d'images satellites optique et RADAR dans l'étude des maladies à transmission vectorielle : cas du paludisme à la frontière Guyane française – Brésil

Contributions of the combination of optical and RADAR satellite images in the study of vector-borne diseases: the case of malaria at the border between French Guiana and Brazil

Contribuições da combinação de imagens ópticas e de RADAR no estudo de doenças transmitidas por vetores: o caso da malária na fronteira entre a Guiana Francesa e o Brasil

Thibault Catry, Auréa Pottier, Renaud Marti, Zhichao Li, Emmanuel Roux, Vincent Herbreteau, Morgan Mangeas, Laurent Demagistri, Helen Gurgel e Nadine Dessay

Introduction

1 Le paludisme est considéré comme l'une des trois premières maladies les plus coûteuses en vie humaine (Bourzac, 2014). En dépit des politiques sanitaires menées aux niveaux nationaux et internationaux, cette maladie reste un problème de santé publique majeur avec 445 000 décès en 2016 répartis dans 91 pays, principalement dans les régions tropicales (OMS, 2017, figure 1). En 2016, on recense un total de 216 millions de cas déclarés à l'échelle globale, soit une augmentation de 5 millions par rapport à 2015 (OMS, 2017).

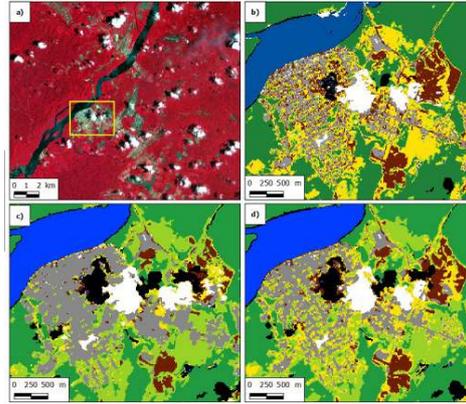
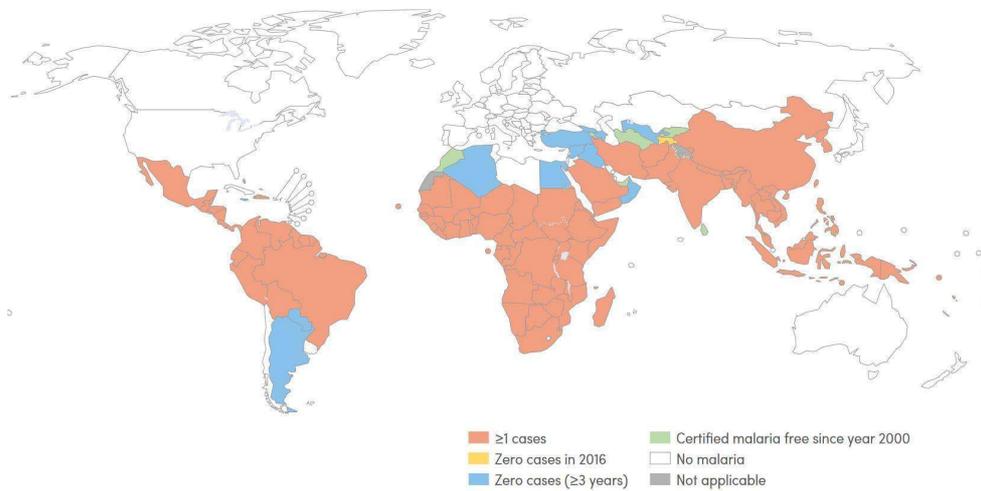


Figure 1 : Evolution de la répartition mondiale de cas indigènes de paludisme entre 2000 et 2016



Fonte : OMS, 2017.

- 2 Cette maladie infectieuse est endémique de la zone intertropicale avec 80% des cas de paludisme recensés en Afrique. L'Amérique latine et le bassin amazonien sont également exposés. Les territoires associés aux frontières de l'amazonie brésilienne présentent des situations critiques et cumulent des problèmes sanitaires (inégalités d'accès aux soins, logements précaires), socio-démographiques (intensification des mouvements migratoires et immigration clandestine, isolation de certaines populations, accroissement démographique), environnementales (déforestation, orpaillage, urbanisation) et politiques (difficulté de mettre en place une stratégie commune entre les deux pays) (Peiter, 2007). La frontière entre la Guyane française et l'état d'Amapa est représentative de ces situations et constitue un cas d'étude particulièrement pertinent.
- 3 Si les variables météorologiques occupent une place importante dans la distribution spatio-temporelle du vecteur, la répartition des types d'occupation du sol – dimension peu étudiée – joue également un rôle majeur dans la distribution et la densité vectorielle. Certains types d'occupation du sol en particulier influent sur la distribution et la densité des anophèles, en lien avec le risque de transmission du paludisme (Vittor et al., 2006; Vittor et al., 2009; Stefani et al., 2013). Les facteurs d'exposition aux vecteurs du

paludisme sont très largement liés aux changements d'environnements associés. Dans ce type de contexte, il a été montré que les facteurs de risques de nature environnementale (distance des habitations par rapport à la rivière et à la forêt et défrichement de la végétation) sont primordiaux (Stefani et al., 2011a et b). Néanmoins, ces relations restent encore mal comprises, principalement à cause du manque de données à des échelles et des résolutions spatiales et temporelles adaptées. D'autre part, l'intensification des mouvements migratoires et l'extension des activités humaines augmentent le risque d'exposition au paludisme, en favorisant les contacts entre le vecteur et les êtres humains (migration pendulaire) et en réduisant la distance à parcourir entre le lieu d'habitation des êtres humains et le lieu de repos des vecteurs. La télédétection satellite permet d'acquérir de manière régulière ou programmable, et à des coûts accessibles pour la communauté scientifique et les acteurs institutionnels nationaux, des données d'imagerie en lien avec l'occupation du sol. Elle apparaît comme un outil particulièrement adapté pour des zones étendues, où les déplacements terrestres sont rendus difficiles par la végétation et le manque de routes. Une limite majeure de la télédétection optique en milieu tropical reste cependant l'enneigement très fréquent. Les données issues de capteurs de type RADAR à synthèse d'ouverture présentent l'avantage d'être peu perturbés par les conditions atmosphériques. De nombreux RSO sont actuellement en orbite et opérationnels : Sentinel 1A et 1B, Terrasar-X, Cosmo-Skymed, ALOS-2, et Radarsat-2. D'autres missions sont planifiées dans les années à venir. Cette diversité des capteurs permet l'acquisition de données de différentes résolutions spatiales, longueurs d'onde, temps de revisite, et polarisations. Avant l'apparition des capteurs évoqués, le coût d'acquisition des images RADAR était un réel frein à leur utilisation dans le cadre de projets de recherche. Désormais, les données Sentinel 1 sont mises à disposition librement par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) pour tous les utilisateurs. La plupart des données d'archives sont également disponibles librement (ERS-1 et 2, ALOS-1, etc.). Cette politique d'ouverture et de mise à disposition des données répondent à des directives à l'échelle européenne afin de faciliter le recours à la télédétection pour traiter diverses problématiques, notamment dans le domaine de la santé publique.

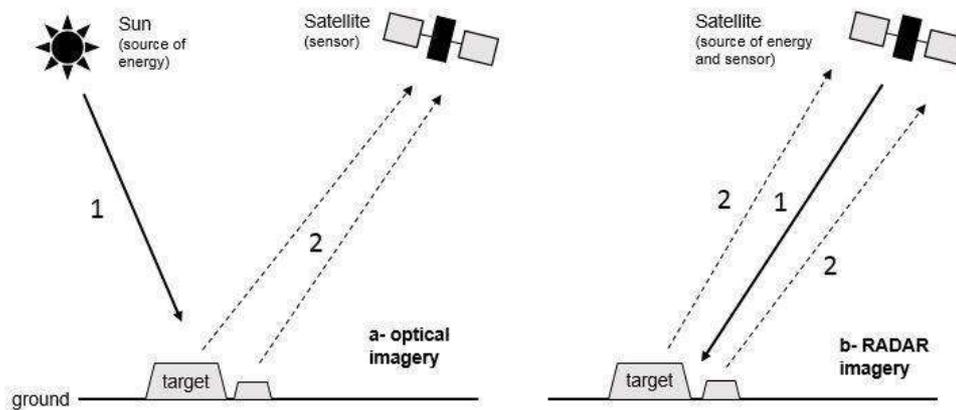
- 4 La première partie de cet article propose un rappel en télédétection satellite en présentant les spécificités respectives des capteurs optiques et RADAR. Les liens entre les grandeurs mesurables par télédétection et les facteurs d'exposition au vecteur du paludisme sont exposés dans la deuxième partie. Enfin, un cas d'étude est proposé en troisième partie pour illustrer l'intérêt de combiner les approches optiques et RADAR dans la cartographie de l'occupation du sol d'une zone difficile d'accès, à la frontière Guyane française-Brésil. La région amazonienne, du fait de la rencontre des difficultés d'identification des espaces de production du risque vectoriel, de transmission du paludisme d'une part et des contraintes liées à l'utilisation d'imagerie satellitale d'autre part, représente un exemple particulièrement didactique et d'intérêt majeur pour expliquer la méthode et montrer la plus-value que l'on peut espérer de son application (Machault et al., 2011; Ferguson et al., 2010).

Le suivi par images de télédétection : apport de l'imagerie RADAR

- 5 L'exploitation des images optiques est principalement conditionnée par l'étendue de la couverture nuageuse. L'utilisation des données issues de l'imagerie RADAR permet de

s'affranchir de ce problème, avec la possibilité d'acquérir des données nuit et jour, sans que l'amplitude du signal soit significativement perturbée par les conditions atmosphériques. Un RADAR à Synthèse d'Ouverture (RSO ou SAR en anglais) est un capteur actif (aéroporté ou satellite) à visée oblique, qui émet un signal électromagnétique en continu dans une longueur d'onde spécifique (gamme des micro-ondes). Contrairement aux capteurs optiques, les RSO génèrent leur propre source d'énergie et le capteur reçoit l'énergie rétrodiffusée (transmise) depuis la cible au sol (Figure 2). La mesure du signal réfléchi permet d'évaluer différentes propriétés géométriques et physiques caractéristiques des surfaces imagées, en lien avec la rugosité, le type de matériau et la teneur en humidité. Les caractéristiques de la surface imagée déterminent le coefficient de rétrodiffusion de l'onde, et donc le niveau d'énergie reçu en retour par le capteur RADAR. Cette énergie étant évaluée pour une longueur d'onde électromagnétique spécifique, les images RADAR sont en niveaux de gris. Les forêts apparaissent généralement dans une teinte claire, avec des niveaux de gris plutôt élevés et homogènes. Les prairies, qui sont des surfaces lisses, apparaissent plus sombres, de même qu'un plan d'eau peu agité.

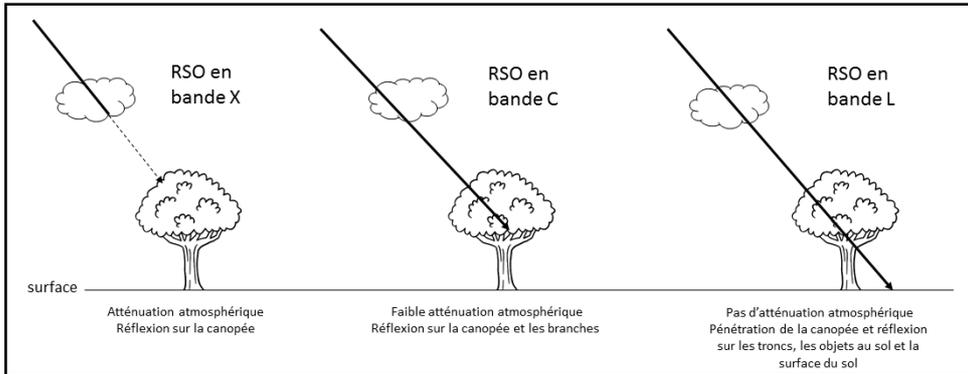
Figure 2 : Principe de fonctionnement des satellites passifs (optiques) et actifs (RSO/SAR).



1 = ondes transmises, 2 = ondes reçues (Catry et al., 2018).

- 6 Les capteurs RSO sont définis par les caractéristiques suivantes : résolution spatiale, temps de revisite, bande d'acquisition, et polarisations. D'une manière générale, plus la longueur d'onde du signal est grande, moins l'atmosphère aura d'influence sur le signal enregistré par le capteur RSO : la bande L est insensible à l'atmosphère, la bande C peu sensible, tandis que la bande X peut être fortement atténuée. Les différentes longueurs d'onde des capteurs RSO permettent ainsi d'accéder à différents niveaux d'information :
- en bande X, l'onde est atténuée par l'atmosphère, la pénétration est faible permettant uniquement la caractérisation de la canopée ;
 - en bande C, l'atténuation atmosphérique est faible, et la pénétration augmentant, il est possible d'obtenir des informations sur la structure de la canopée (feuilles, branches, etc.) ;
 - en bande L, il n'y a pas d'atténuation atmosphérique et il est possible d'obtenir des images des couches situées sous la canopée, et donc de détecter la présence d'eau sous forêt, ce qui est impossible en optique (figure 3).

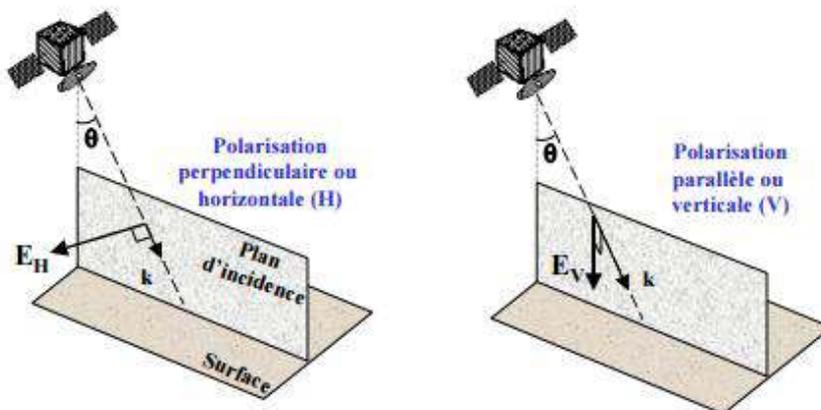
Figure 3 : Atténuation atmosphérique et pénétration du signal RADAR sur les zones humides végétalisées en fonction de la bande de fréquence (X, L, C).



7 La polarisation de l'onde est un aspect important dans la compréhension des capteurs RSO. La polarisation représente l'orientation du champ électromagnétique (E) de l'onde par rapport au plan d'incidence, c'est-à-dire le plan perpendiculaire à la surface (Figure 4). La majorité des RSO transmettent des micro-ondes polarisées horizontalement (H) ou verticalement (V). Lorsque la polarisation est dite horizontale, le champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence, alors qu'il lui est parallèle si la polarisation est verticale. Une onde transmise dans l'une de ces polarisations peut générer une onde rétrodiffusée dans diverses polarisations (horizontale, verticale, circulaire). Dans le cas d'une transmission et réception d'ondes polarisées linéairement, on distingue 4 combinaisons de polarisations possibles :

- HH—polarisation transmise et reçue horizontalement
- VV— polarisation transmise et reçue verticalement
- HV— polarisation transmise horizontalement et reçue verticalement
- VH— polarisation transmise verticalement et reçue horizontalement

Figure 4 : Principe de la polarisation radar : polarisation horizontale (H) et verticale (V) (Proisy C., 1999)

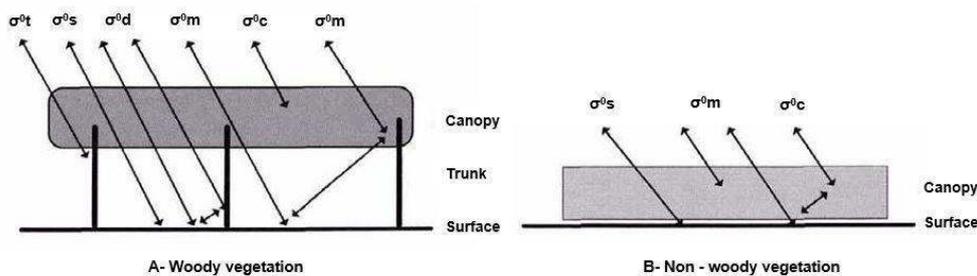


8 Tout comme la longueur d'onde, la polarisation de l'onde radar va avoir une influence sur les interactions entre le rayonnement et la cible. Les ondes en polarisation horizontale pénètrent mieux dans le couvert végétal que celles en polarisation verticale. En revanche, celles en polarisation verticale sont plus sensibles à la rugosité du sol. Ainsi, l'utilisation

de données acquises dans différentes polarisations peut permettre d'obtenir des informations complémentaires sur les cibles étudiées.

- 9 La détection et la caractérisation des zones humides végétalisées peut s'avérer délicates en télédétection optique, avec des confusions possibles avec d'autres classes d'occupation du sol. Les images RADAR à synthèse d'ouverture (RSO) sont pour leur part très adaptées à l'étude de ces zones humides, puisque l'intensité du signal rétrodiffusé dépend fortement de la constante diélectrique de la cible (qui décrit la capacité d'un objet à interagir avec l'onde électromagnétique), une grandeur physique qui prend des valeurs caractéristiques très élevées pour les surfaces en eau (Hostache, 2017). En résumé, les caractéristiques du signal rétrodiffusé vers le RSO par une zone humide dépendent :
 - a. de la longueur d'onde, de la polarisation et de l'angle d'incidence de l'onde transmise ;
 - b. de la rugosité du sol ;
 - c. de la biomasse de la végétation ;
 - d. des propriétés diélectriques du sol et de la végétation ;
 - e. de la présence ou absence d'eau libre au sol (inondation).
- 10 Le choix du type de capteur RSO, et des propriétés de polarisation associées, est primordial afin de :
 - distinguer les zones humides des autres classes d'occupation du sol ;
 - discriminer les différents types de zones humides au sein d'un même écosystème.
- 11 La figure 5 résume les interactions entre micro-ondes et zones humides couvertes par différents types de végétation.

Figure 5 : Sources de rétrodiffusion pour une zone humide végétalisée



dans le cas de (A) une végétation arborée et (B) une végétation herbacée. On distingue les coefficients suivants : $\sigma^{\circ c}$ = rétrodiffusion de la canopée, $\sigma^{\circ d}$ = rétrodiffusion sol-tronc, $\sigma^{\circ m}$ = rétrodiffusion sol-canopée, $\sigma^{\circ s}$ = rétrodiffusion du sol, and $\sigma^{\circ t}$ = rétrodiffusion du tronc (d'après Wang et al., 1995).

- 12 Généralement, la présence d'eau sous la canopée a tendance à :
 - augmenter la rétrodiffusion totale à cause d'un effet double-rebond sur les structures verticales d'une végétation arborée, notamment pour les RSO en bande L où l'eau sous forêt va apparaître en blanc sur les images ;
 - diminuer la rétrodiffusion totale pour les zones humides herbacées.
- 13 Catry et al. (2018) ont proposé des recommandations pour l'utilisation des propriétés et techniques de la télédétection RADAR afin de caractériser les différents types de zones humides, potentiels gîtes larvaires à Anopheles (tableau 1).

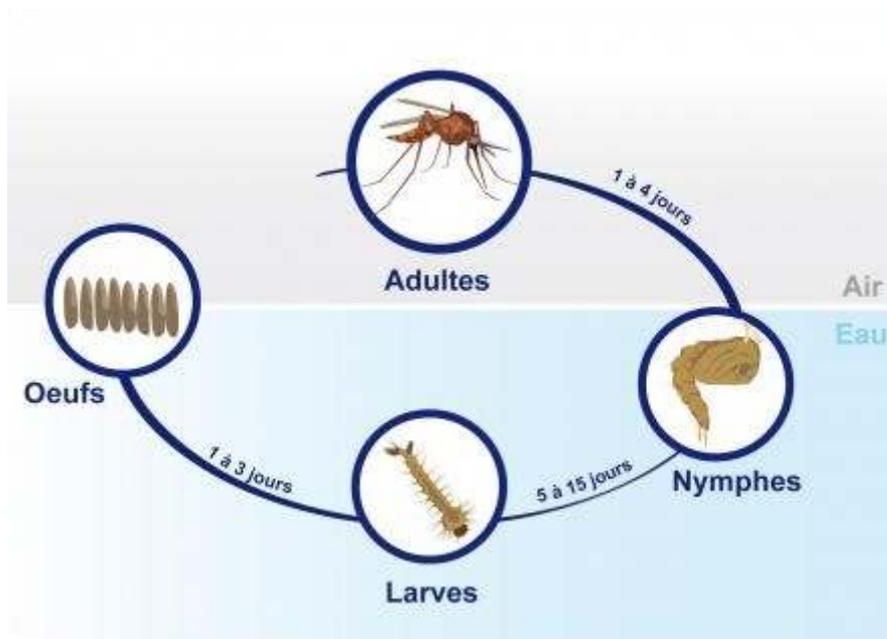
Tableau 1 : Recommandations pour l'utilisation des RSO pour la caractérisation des différents types de zones humides en contexte amazonien (Catry et al., 2018).

RSO : grandeurs physiques	Eau libre	Zones herbacées et humides	Zones humide et forestière	Herbacées vs. Zones humides et forestières	Hauteur d'eau
Longueur d'onde					
Polarisation	X	C	L ou C + L	C + L	
Angle d'incidence					
	VV	HH	VV ou HH	VH ou HV ou combinaison	HH, VH ou HV
RSO : Techniques de mesures					
Intensité rétrodiffusée	Seuil, texture, et segmentation	Approche multi-temporelle	Approche multi-temporelle et multi-incidence	Approche saisonnière	
InSAR					Forte répétitivité temporelle
Altimétrie					Données directes ou combinaison avec InSAR ou rétrodiffusion
Polarimétrie				HH + HH/HV décompositions Freeman-Dourden et Claude Poitier	Approche multi-temporelle ou angle alpha
Capteurs recommandés (données libres)					
	Sentinel 1	Sentinel 1	Sentinel 1, ALOS-PALSAR	Sentinel 1, ALOS-PALSAR	Sentinel 1, ALOS-PALSAR

Le suivi par télédétection : un outil d'observation de facteurs déterminants du paludisme

- 14 Le paludisme est causé par un parasite du genre Plasmodium, transmis par la piqûre des moustiques femelles du genre Anopheles. Parmi les 140 espèces de Plasmodium recensées, seules cinq espèces sont susceptibles d'affecter l'homme. Quatre espèces majeures infectent l'homme : *P. falciparum*, *P. vivax*, *P. ovale*, *P. malariae*, et une cinquième, *P. knowlesi*, intervient très localement chez l'homme en Asie du Sud-Est (WHO 2015). La distribution des anophèles, leur capacité vectorielle, les caractéristiques biologiques des différentes espèces de Plasmodium et les facteurs humains (l'accessibilité aux soins, les systèmes de soins, les mesures de prévention et les types d'habitats), tant au niveau individuel que populationnel, influent sur la distribution géographique et la dynamique spatio-temporelle du paludisme.
- 15 Les larves d'anophèles se développent dans des collections d'eau naturelles ou d'origine anthropique de tailles variables. Le cycle de vie des anophèles comporte quatre stades successifs : l'œuf, la larve, la nymphe et l'adulte (figure 6). Les trois premiers stades se déroulent au-dessous de la surface de l'eau, et le dernier stade est aérien.

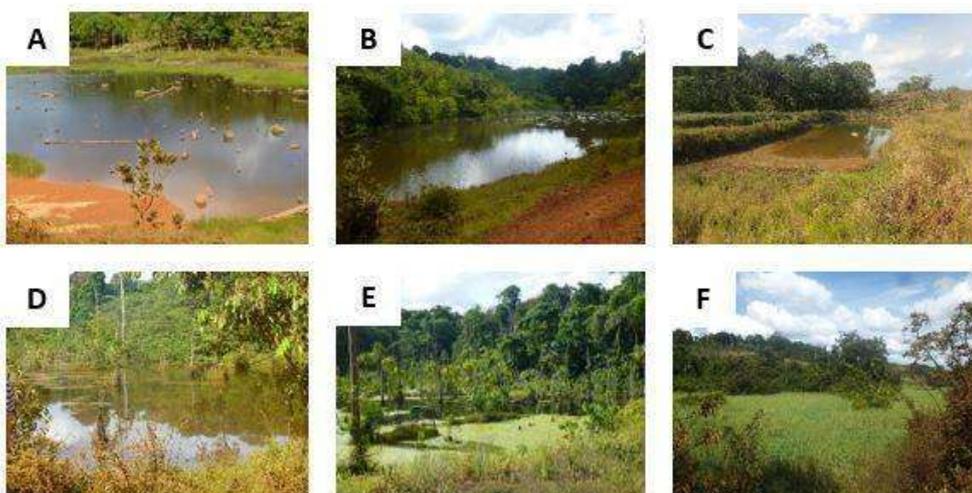
Figure 6 : Quatre stades du cycle de l'anophèle.



Source : <http://www.my-microsite.com/tpe-paludisme/Processus-de-transmission/>

- 16 En se basant sur une revue de la littérature incluant des données d'observation spatiales de la Terre, Sinka et al. (2010) ont classé les gîtes larvaires d'Anopheles en fonction de leur taille, de leur origine naturelle ou anthropique, et de leur nature : étangs, marais, lacs, canaux d'irrigation, puits, fosses, etc. (figure 7 et 8). Des paramètres clés ont été identifiés pour chaque type de gîte : intensité lumineuse, salinité, turbidité, mouvement et végétation (tableau 2).

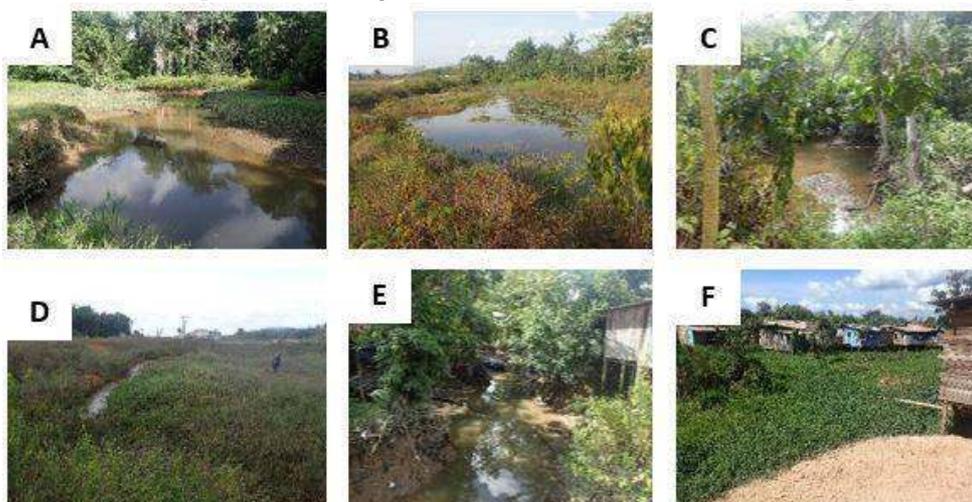
Figure 7 : Différents types de zones humides végétalisées pouvant constituer des gîtes larvaires à Anopheles, en région Amazonienne, dans une zone forestière rurale.



(A,B) = étangs faiblement végétalisés; (C) = réservoir d'eau anthropique en lisière de forêt; et (D-F) = marais plus ou moins végétalisés avec présence de végétation arborée et herbacée

Catry et al., 2018.

Figure 8 : Différents types de zones humides végétalisées pouvant constituer des gîtes larvaires à anophèles, en région Amazonienne, dans une zone péri-urbaine.



(A) lit de rivière aux bordures végétalisées (B) végétation hétérogène à la surface d'un étang (C) fossé boueux en bordure de route (D) fossé rempli d'eau stagnante en bordure de route (E) lit de rivière avec mélange d'eaux claires et d'eaux usées (F) marais recouvert de végétation herbacée, parsemé de maisons sur pilotis

Catry et al., 2018.

Tableau 2 : Caractéristiques principales des gîtes larvaires des vecteurs primaires et secondaires du paludisme en Amazonie

Vecteur	Intensité lumineuse	Salinité	Turbidité	Mouvement de l'eau	Végétation	Statut du vecteur	Distribution
<i>An. darlingi</i>	faible	faible	eau claire	variable	oui	primaire	Amazonie
<i>An. nuneztovari</i>	variable	faible	eau claire	variable	oui	secondaire	Amazonie brésilienne, Venezuela
<i>An. marajoara</i>	variable	faible	eau claire	variable	oui	secondaire	Amazonie brésilienne, Venezuela
<i>An. albitalarsis</i>	haute	faible	variable	immobile ou stagnante	oui	secondaire	Amazonie brésilienne, Venezuela
<i>An. brasiliensis</i>	faible	faible	eau claire	variable	oui	secondaire	Amazonie brésilienne
<i>An. oswaldoi</i>	faible	faible	eau claire	variable	oui	secondaire	Amazonie brésilienne, Venezuela, Colombie, Pérou
<i>An. trianulatus</i>	faible	faible	eau claire	variable	oui	secondaire	Amazonie brésilienne, Amérique centrale et du Sud

Sinka et al., 2010 ; Catry et al., 2018.

- 17 Parmi les 41 espèces d'Anopheles décrites par Sinka et al. (2010), seules 9 sont présentes sur le continent américain. Le vecteur principal du paludisme humain en Amazonie est *Anopheles darlingi* (Sinka et al., 2010 ; Girod et al., 2011) et les vecteurs secondaires incluent des espèces telles que *Anopheles marajoara* (Galvão and Damasceno, 1942), *brasiliensis* (Chagas, 1907), *oswaldoi* (Peryassu, 1922), *nuneztovari* (Galbadón, 1940) or *trianulatus* (Neiva and Pinto, 1922) (Mouchet, 2004; Hiwat and Breitas, 2011; Stefani et al., 2013).

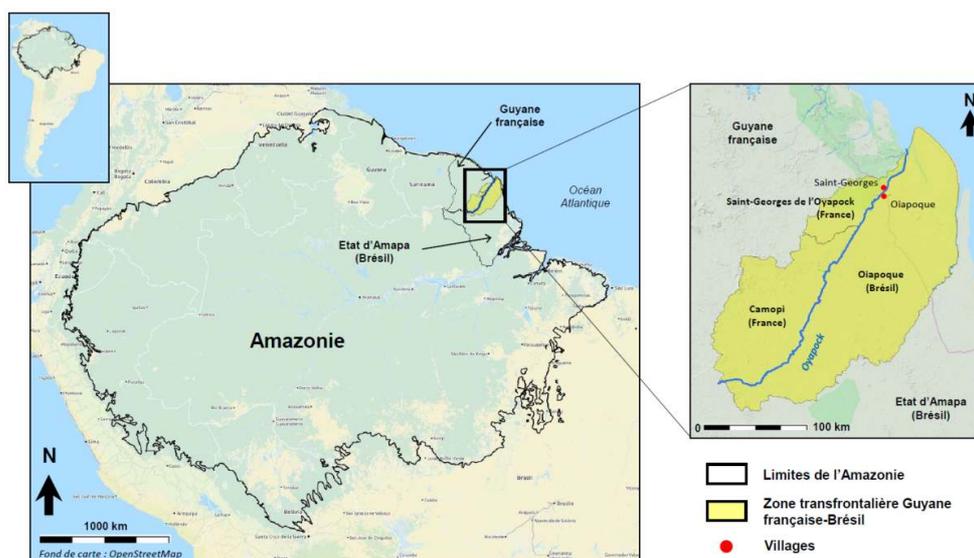
- 18 La forêt est un environnement abritant des sites de repos privilégiés pour les anophèles adultes après un repas sanguin (Tadei et al., 1998). C'est un habitat favorable à la présence des vecteurs de transmission du paludisme (Rosa-Freitas et al., 2007).
- 19 Parmi les nombreux facteurs déterminant la transmission du paludisme, certains sont quantifiables par des approches de télédétection. On distingue notamment :
- les facteurs météorologiques et climatiques : variation des précipitations et de la température ;
 - les facteurs démographiques : répartition et densité de la population (à partir de l'identification des formes de bâti);
 - les facteurs environnementaux : mode d'occupation du sol, déforestation, distribution des eaux de surface, urbanisation, pratiques culturelles et élevage, etc.

Un Cas d'étude : le paludisme à la frontière Guyane française – Brésil

Zone d'étude

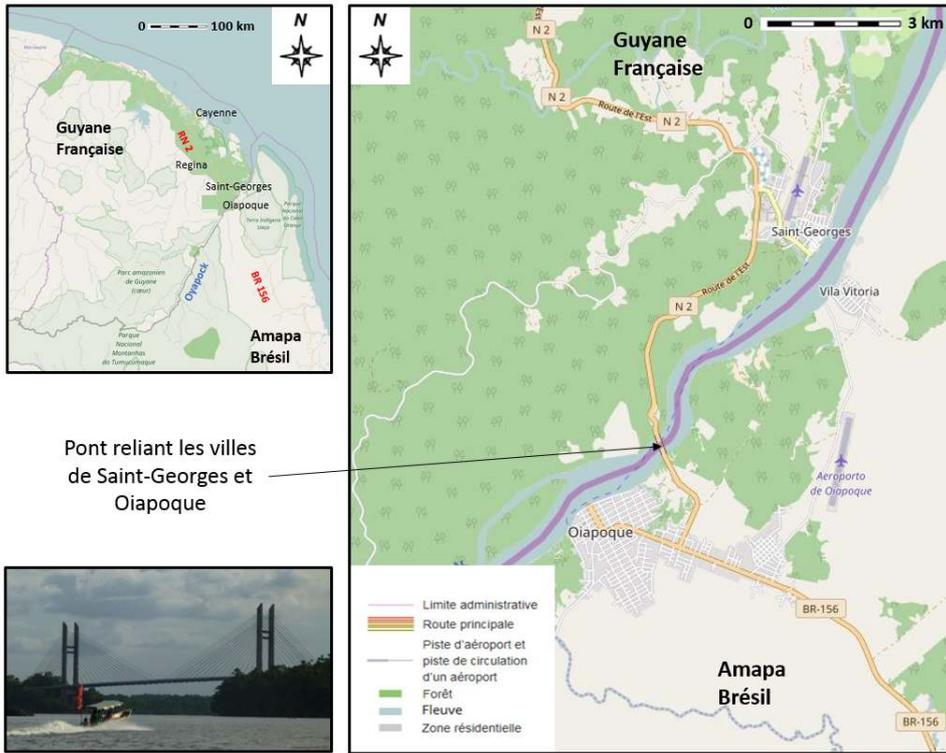
- 20 La zone d'étude se situe dans le bassin amazonien et s'inscrit dans le contexte frontalier Guyane française–Brésil, délimitée par le fleuve Oyapock (figure 9).

Figure 9 : La zone d'étude, située à la frontière entre la Guyane française et le Brésil (état d'Amapa), en contexte amazonien.



- 21 Ce territoire est composé de deux villes principales : Saint-Georges, côté français, et Oiapoque, côté brésilien (figure 10). Ces deux villes sont situées de part et d'autre du fleuve Oyapock, frontière naturelle entre les deux pays.

Figure 10 : Situation géographique de la zone transfrontalière entre la Guyane française et le Brésil, avec les villes de Saint-Georges de l'Oyapock et Oiapoque, de part et d'autre du fleuve Oyapock



fond Openstreetmap, Photo: T.Catry.

- 22 Le climat de la zone d'étude est de type tropical-humide, alternant entre une saison des pluies d'avril à juin, une saison sèche de juillet à novembre, une saison des pluies (dite "petite" saison des pluies) de décembre à février et une courte saison sèche aux alentours du mois de mars (dite "petit été de mars"). On mesure un taux moyen d'humidité supérieur à 80%, et une température moyenne annuelle de 26°C. Les précipitations moyennes annuelles sont de 3 400 mm.

Données de télédétection

- 23 Ce cas d'étude exploite des données d'imagerie optique et RADAR issues de différents capteurs. Leurs caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques techniques des images optique et RADAR issues des capteurs Sentinel 1, Sentinel 2, ALOS et Pléiades utilisées dans cette étude.

Satellite	Niveau de produit	Type	Fauchée	Bande spectrale / Polarisation ^{1*}	Résolution spatiale	Résolution temporelle
Sentinel-1	GRD	Radar C	250 km	VV+VH	10 m	6 à 12 jours
Sentinel-2	Level-1C	Optique	290 km	13 bandes	10 à 60 m	5 à 10 jours
ALOS	RTC	Radar L	70 km	HH+HV	10 à 20 m	46 jours
Pléiades	Niveau 0	Optique	20 km	B-V-R-PIR-P	P : 0.5 m MS : 2 m	1 à 7 jours

GRD = Ground Range Detected, RTC = Radiometrically Terrain Corrected, P = Panchromatique (noir et blanc), MS = Multi-spectral (plusieurs bandes en couleur), B = bleu, V = vert, R = rouge, PIR = Proche Infra Rouge, VV = Verticale-Verticale, VH = Verticale-Horizontale, HH = Horizontale-Horizontale et HV = Horizontale-Verticale.

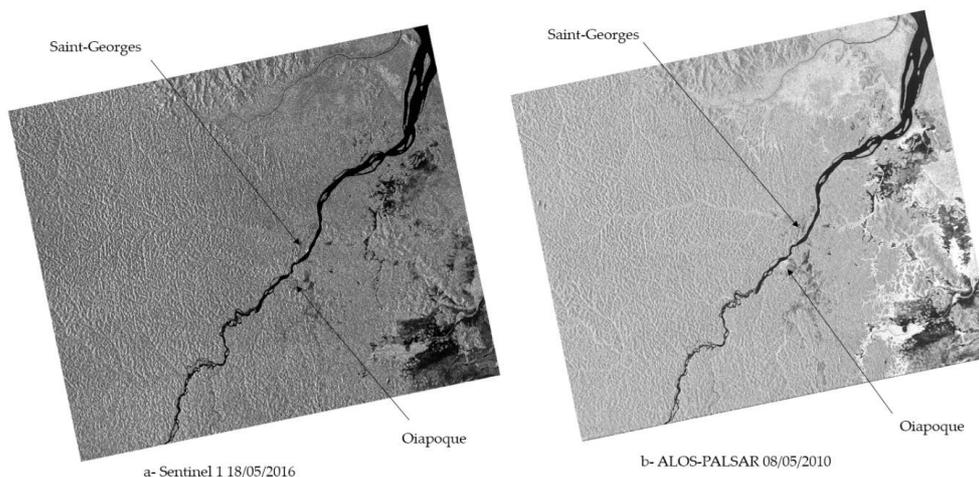
Données RADAR

- 24 Une série temporelle d'images Sentinel-1 de 31 dates couvrant l'année 2016 a été téléchargée depuis la plateforme d'exploitation des produits Sentinel (PEPS) développée par le Centre National d'Études Spatiales (CNES). Sentinel-1 héberge un capteur RADAR à synthèse d'ouverture (RSO, voir partie 1) en bande C, dont la longueur d'onde est d'environ 6 cm. Les images ont été téléchargées en niveau GRD (Ground Range Detected), et acquises dans le mode d'acquisition IW (Interferometric Wide Swath) en double polarisation VH (Verticale-Horizontale) et VV (Verticale-verticale) pour une résolution spatiale de 10 mètres, et un angle d'incidence de 38 degrés. Les GRD sont des données dites de niveau 1 qui ont été en partie traitées en réduisant le chatoiement (speckle) des images. Cet effet se manifeste comme une texture poivre et sel sur les images. Le chatoiement est produit par l'interférence aléatoire, constructive et destructive, provenant de la diffusion multiple qui se produit dans chaque cellule de résolution. La présence de chatoiement dégrade la qualité visuelle de l'image, la rendant plus difficile à interpréter qu'une image optique. Le procédé utilisé repose sur une multi-visée (multi-look), qui consiste à effectuer une moyenne de l'image en utilisant plusieurs images de la même scène en projetant l'image au sol avec des pixels dont la géométrie est proche du carré. L'image a ensuite été corrigée radiométriquement et géométriquement en utilisant le logiciel libre SNAP (Sentinel Application Platform). L'IW est le principal mode d'acquisition qui possède une fauchée de 250 kilomètres (figure 11a).
- 25 En plus des données précédentes, nous avons utilisé des données RADAR PALSAR-1 en bande L (longueur d'onde ~ 30 cm) du satellite ALOS-1 (figure 11b). Seules des données d'archive sont aujourd'hui disponibles, le satellite ayant été actif de 2006 à 2011. Les données ALOS/PALSAR sont actuellement les seules données en bande L disponibles gratuitement. Dans le cadre de notre étude, il a été décidé de tester leur apport pour la thématique environnement-santé afin d'évaluer leur intérêt. Les données ont été téléchargées sur le site de l'ASF (Alaska Satellite Facility) en niveau RTC (Radiometrically terrain-corrected). Ces données sont calibrées radiométriquement et corrigées géométriquement. Les images ont été acquises dans le mode d'acquisition FBD (Fine Beam

Dual polarization). Ce mode offre des données en double polarisation HH et HV avec une fauchée de 70 km, et une résolution spatiale de 12,5 mètres. Afin de suivre l'évolution des zones humides, nous avons choisi deux dates : l'une en saison des pluies (8 mai 2010), l'autre en saison sèche (8 août 2010).

- 26 En dépit d'un écart de 6 années entre les jeux de données issus des deux capteurs (Sentinel-1 et ALOS/PALSAR), nous estimons que les zones humides ont peu changé durant cet intervalle dans la région à l'Est d'Oiapoque. Ce territoire est en effet peu impacté par des activités anthropiques.

Figure 11 : Imagerie RADAR



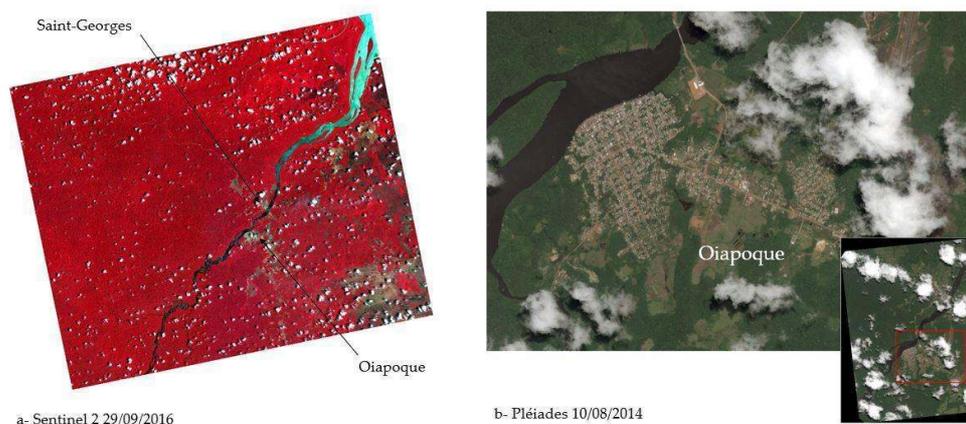
Sentinel-1(a) du 18/05/2016 et ALOS-PALSAR (b) du 08/05/2010 utilisées dans cette étude.

Données optiques

- 27 Nous avons utilisé des données optiques du satellite Sentinel-2 à haute résolution spatiale (HR). Ce type d'image possède 13 bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge pour une résolution allant de 10 à 60 mètres. En raison d'un fort ennuagement, nous n'avons pu obtenir qu'une seule image exploitable d'une surface de 290 km² (29/09/2016, figure 12a). L'ensemble des 31 autres images a donc été jugé inexploitable. Les données ont été téléchargées depuis la plateforme d'exploitation des produits Sentinel (voir section précédente) au niveau de production 1C. Ce niveau correspond à celui d'images en réflectance au sommet de l'atmosphère (TOA, Top-of-Atmosphere), après corrections géométriques et radiométriques. La correction des effets atmosphériques s'est effectuée via le module Sen2Cor fourni par l'ESA.
- 28 En complément des données HR Sentinel, nous avons effectué une demande d'images Pléiades à très haute résolution spatiale (THRS) via le programme GEOSUD. En mode panchromatique, ou après une fusion de type Pan-sharpened (processus qui permet d'améliorer la résolution spatiale des images multispectrales (2 m) en utilisant une image panchromatique (50 cm)), ce type d'image présente une résolution spatiale de l'ordre de 0,5 m. L'emprise d'une scène Pléiades couvre une surface de 400 km², soit 20 x 20 km (figure 12b). Ces images de programmation ont été acquises sur une échelle pluri-annuelle : 3 en 2012, 1 en 2014, et 1 et 2015. Ces programmations ont été motivées par l'obtention d'une couverture sans nuages des quartiers de Saint-Georges et d'Oiapoque.

Ce type d'images THRS permet de réaliser des classifications très précises à l'échelle du quartier et des îlots urbains.

Figure 12 : Imagerie optique Sentinel-2



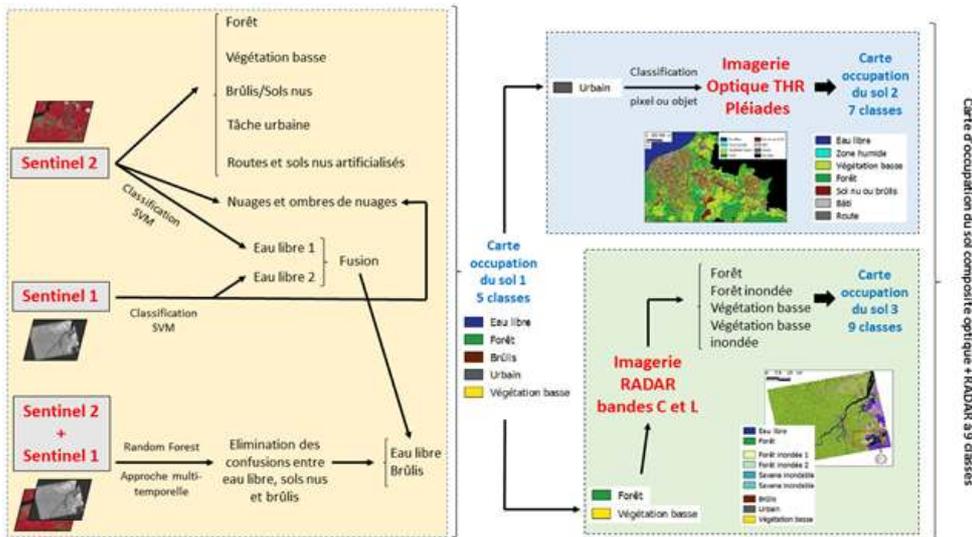
(a) du 29/09/2016 et Pléiades (b) du 10/08/2014 utilisées dans cette étude.

Méthodologie

29 Le cadre méthodologique de cette étude repose sur trois axes principaux :

- la génération de classifications des types d'occupation du sol à partir des différentes données d'imagerie RADAR et optique disponibles ;
- la combinaison des classifications issues de l'étape (A) pour profiter de la complémentarité d'observation des capteurs (figure 13) : (i) combinaison RADAR--optique pour le traitement des nuages (Sentinel-1 & 2) (ii) combinaison HR et THRS pour enrichir la classe urbaine (Sentinel-2 & Pléiades) (iii) combinaison RADAR des bandes C et L (Sentinel 1 & PALSAR) pour caractériser les zones humides.
- l'application à l'évaluation du risque d'exposition vectorielle, en lien avec la transmission du paludisme.

Figure 13 : On présente ici les trois types de combinaisons des données de classifications issues des différents capteurs de télédétection de notre étude :

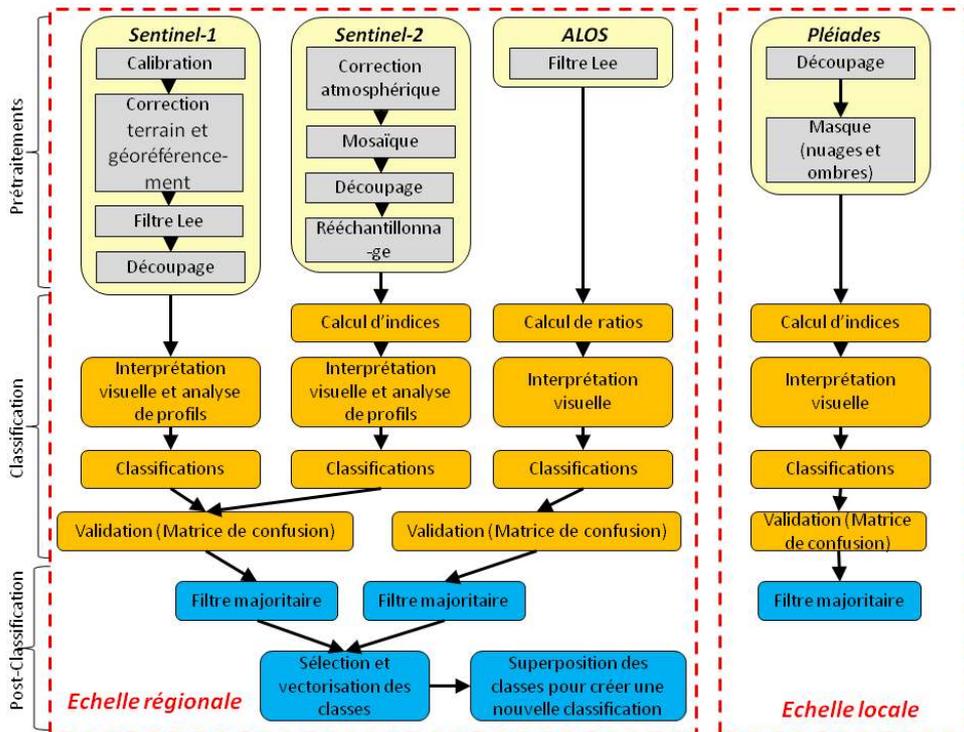


Sentinel-1 & 2 pour s'affranchir des nuages, Sentinel-2 & Pléiades pour enrichir la classe « Urbain » en classes « Bâti » et « Route », RADAR en bandes L & C pour traiter le cas des zones humides végétalisées.

Étapes de classifications (A)

- 30 Les méthodes de classifications des types d'occupation du sol suivent des étapes communes aux différents capteurs (figure 14) :
- prétraitement (corrections atmosphériques, filtres) ;
 - analyse par compositions colorées et calculs d'indices pour identifier les différentes classes;
 - évaluation et comparaison des différentes classifications ;
 - validation des classifications générées par des matrices de confusion (outil qui permet de mesurer la qualité des classifications) ;
 - post-traitement : application d'un filtre majoritaire sur les classifications pour éliminer les pixels isolés.

Figure 14 : Schéma général des étapes de classification selon les différentes données d'imagerie



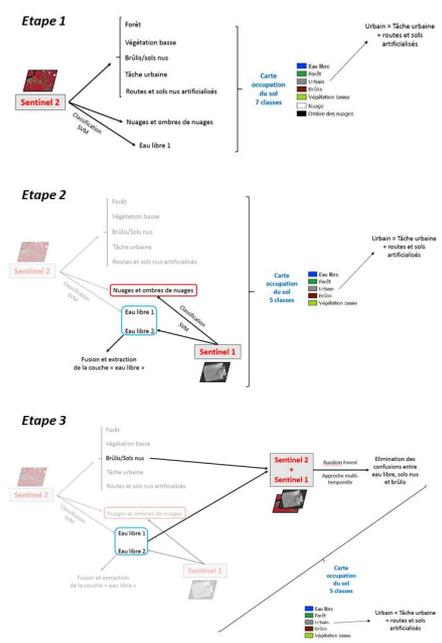
prétraitements (jaune et gris), classification orientée pixel (orange), et post-classification (bleu).

- 31 Trois méthodes de classification ont été évaluées. Ces méthodes se basent toutes sur la valeur radiométrique des pixels : classification non-supervisée k-moyenne (k-means), classification supervisée par arbre de décision, et classifications supervisées Support Vector Machine (SVM) et Random Forest (RF).

Combinaisons des approches RADAR et optiques (B)

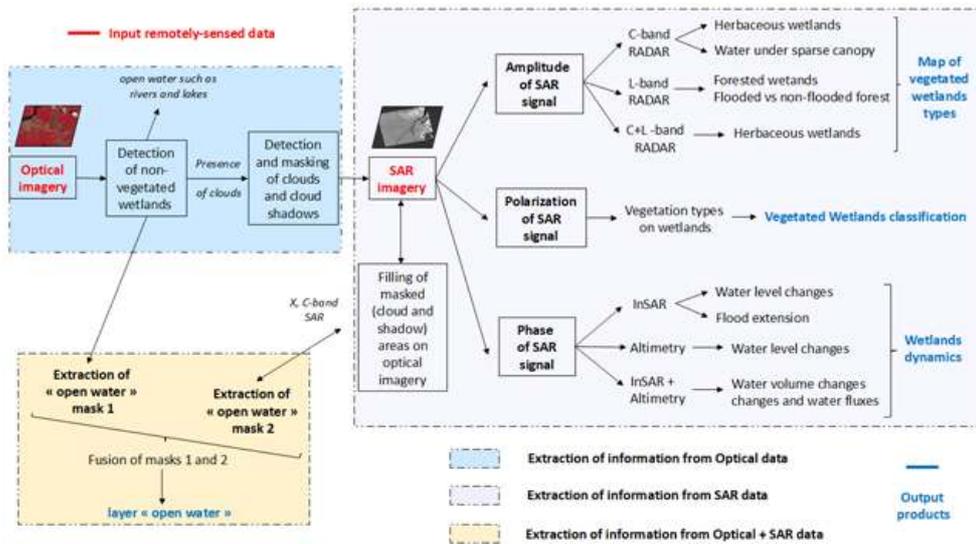
- 32 Après analyses des classifications issues du premier axe de traitements (A), chaque capteur a permis d'extraire différentes classes d'occupation du sol. Dans ce second axe de traitements (B), nous combinons les différentes données de classifications pour créer de nouvelles classifications composites.
- 33 Une première approche consiste à compléter les données optiques manquantes par les données des classes RADAR en suivant trois étapes (figure 15):
- une classification obtenue sur l'image optique Sentinel-2 incluant une classe « nuages » et une classe « ombres de nuages » pour lesquels il n'y a pas d'information sur l'occupation du sol. A ce stade, la carte contient 7 classes d'occupation du sol ;
 - une réaffectation de pixels. L'information manquante due aux nuages et aux ombres de nuages est remplacée par de l'information d'occupation du sol extraite d'une pile d'images RADAR Sentinel-1 (une image moyenne par saison). Chaque pixel est alors réaffecté à une classe existante pour produire une carte d'occupation du sol à 5 classes;
 - une comparaison via une approche multi-temporelle des classifications issues des données Sentinel-1 et Sentinel-2 permet d'éliminer les confusions entre les classes : « eau libre », « brûlis », et « sols nus ». A ce stade, la classification contient 5 classes : eau libre, forêt, urbain (tâche urbaine + routes et sols artificialisés), brûlis, et végétation basse.

Figure 15 : combinaison de données Sentinel-1 et Sentinel-2 pour la production de carte d'occupation du sol composite en contexte amazonien.



- 34 Une deuxième approche consiste à exploiter les différentes résolutions spatiales des capteurs optiques HR et THRS pour extraire la « tâche urbaine ». Une nouvelle classification est menée à partir d'une image Pléiades en utilisant un algorithme de type arbre de décision afin de classer le bâti, les routes, la végétation intra-urbaine et les zones en eau dans la ville. Une classification à 7 classes est générée, incluant les classes « zones humides » dans la ville et la classe urbaine décomposée en « bâti » et « routes ».
- 35 Une troisième et dernière approche consiste à combiner les bandes C et L des deux types de capteurs RADAR Sentinel-1 et PALSAR pour caractériser les classes « forêt » et « végétation basse » en différentes zones humides (Catry et al., 2018, figure 16). Une classification finale à 9 classes est ainsi générée.

Figure 16 : Utilisation des bandes C et L des deux capteurs Sentinel 1 et PALSAR pour caractériser les classes « forêt » et « végétation basse » en différentes zones humides en contexte amazonien



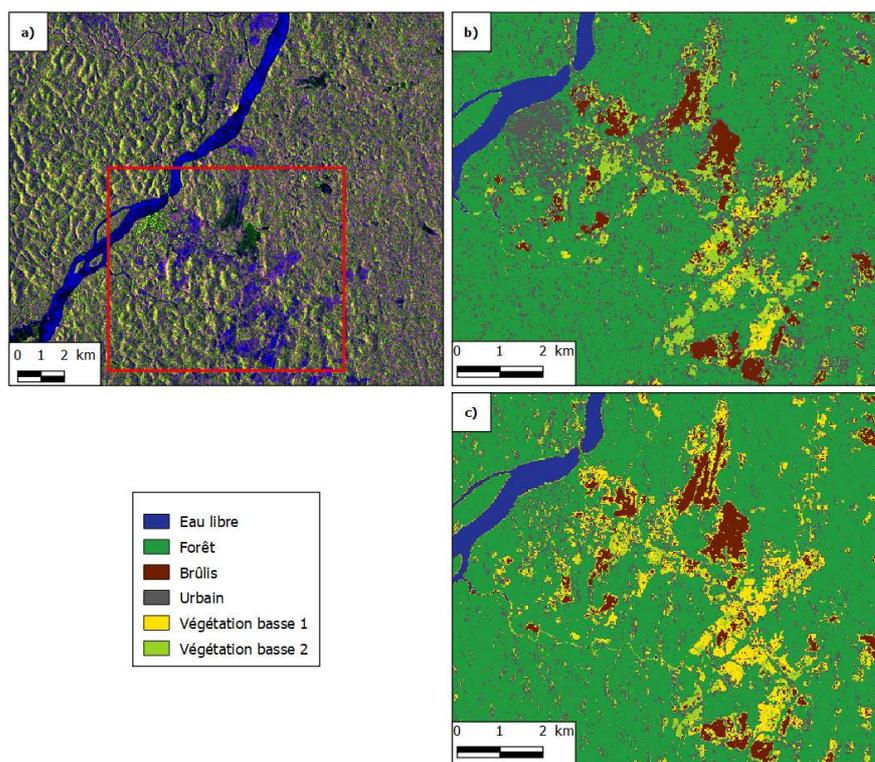
Catry et al., 2018.

Résultats

Classification issue des données radar HR (Sentinel-1)

- 36 Nous avons comparé les résultats des classifications *SVM* et *RF* obtenues pour l'année 2016 sur la région d'Oiapoque (figure 17). Les deux algorithmes produisent des résultats similaires pour les classes « Forêts », « Eau » et « Brûlis ». En revanche, on note des différences notables pour les autres classes, notamment pour la classe « Urbain ». Cette classe est mieux identifiée avec le classifieur *SVM* (figure 17).

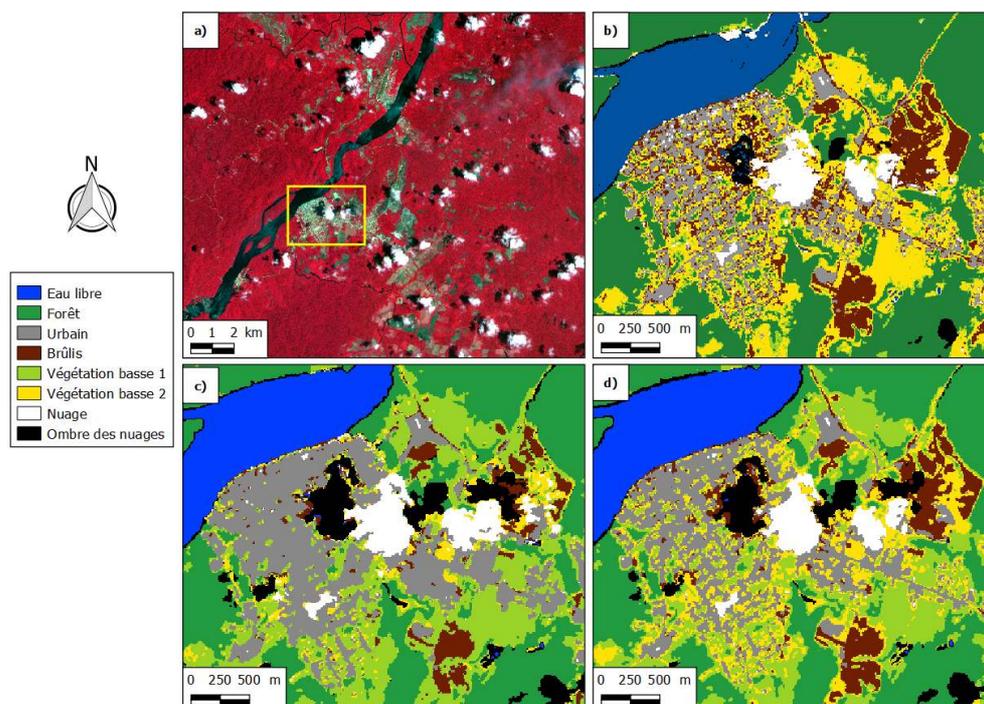
Figure 17 : a) Composition colorée Sentinel-1 (VH, VV et VH sur VV) et classifications b) SVM et c) RF des données Sentinel-1 de l'année 2016 en polarisation VV et VH.



Classification issue des données optiques HR (Sentinel-2)

- 37 L'algorithme RF (Random Forest) réalise de meilleures performances avec les données Sentinel-2. On obtient une meilleure discrimination des classes « Urbain » et « Brûlis » en comparaison de la classification RF à partir des données Sentinel-1. La détection des nuages et de leurs ombres est plus efficace avec l'algorithme RF, alors qu'elle est sous-estimée via un algorithme de type arbre de décision (figure 18).

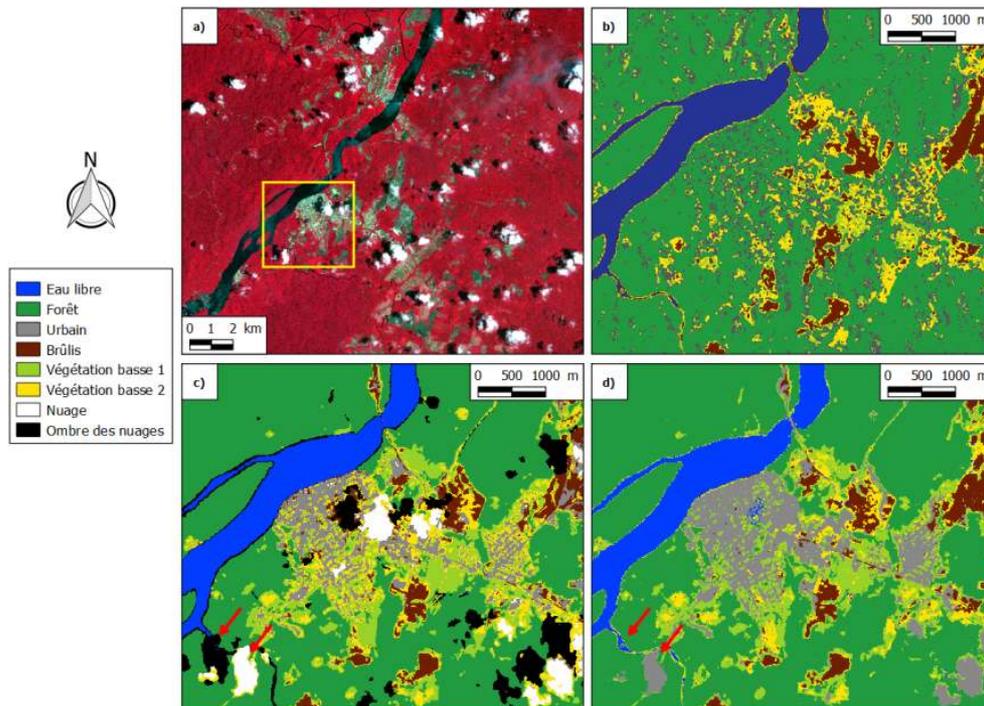
Figure 18 : a) Composition colorée (PIR-R-V) Sentinel-2 du 29/09/2016. Classifications b) par arbre de décision c) SVM d) RF.



Combinaison des classifications HR : Sentinel 1 & 2

- 38 Nous avons comparé les résultats des classifications issues des données (i) Sentinel 1 seules (ii) Sentinel-2 seules (iii) Sentinel 1 & 2 combinées (figure 19). Dans le cas de cette dernière classification, combinant les deux types de données S1-S2, les données masquées par les nuages et les ombres sont remplacées par de l'information extraite de Sentinel-1 correspondant à la classe des pixels voisins, provoquant des confusions et un manque de précision dans la classification au niveau de ces zones.

Figure 19 : a) Composition colorée (PIR-R-V) Sentinel-2 du 29/09/2016. Classifications b) RF des données Sentinel-1 c) RF des données Sentinel-2 d) RF des données Sentinel-1 & S2 combinées.



Classifications PALSAR

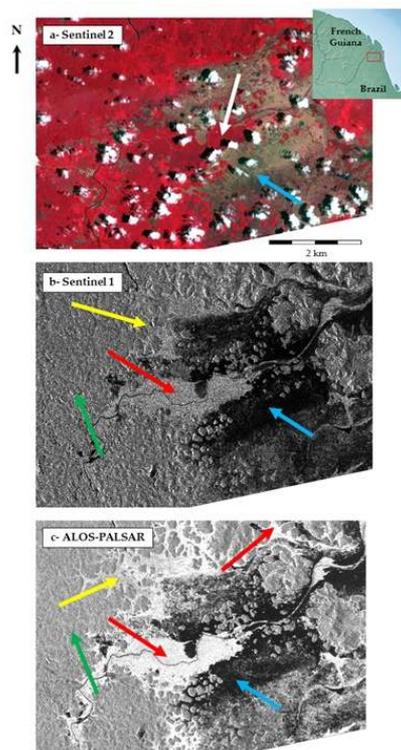
39 La figure 20 présente une comparaison des signaux (réflectance optique et rétrodiffusion RADAR) de la même zone humide végétalisée à la frontière Guyane française - Brésil. Sur les données optiques Sentinel-2 à 10 m de résolution en composition colorée (PIR, R, V) (figure 20a), on observe deux signaux caractéristiques : végétation (flèche blanche), savanes sèches (flèche bleue, présence de végétation herbacée éparses). Sur la même zone, on identifie avec les données RADAR Sentinel-1 (bande C, 10 m de résolution, polarisation VH) (figure 20b):

- la présence d'eau libre (zone de couleur noire à cause de la réflexion spéculaire – la surface étant considérée comme lisse par l'onde, celle-ci agit comme un miroir qui va renvoyer le signal dans la direction opposée au capteur – , indiquée par une flèche bleue sur la figure 20) recouvrant entièrement les zones de savane sèche.
- la présence de zones humides recouvertes de forêt (forêt inondée, flèche rouge).

40 Ces zones humides ne se différencient pas de manière évidente de la forêt non-inondée (flèche verte) ni des zones humides herbacées (flèches jaunes, pour lesquelles le niveau d'eau est plus faible que dans les savanes sèches inondées ou la végétation herbacée plus dense). Dans ce contexte, l'apport de la bande L PALSAR (12,5 m de résolution spatiale, polarisation HH) (figure 20 c) permet de discriminer :

- l'eau libre (flèche bleue)
- la forêt non-inondée (flèche verte)
- les zones humides herbacées (flèche jaune)
- la forêt inondée (flèche rouge), avec une valeur de rétrodiffusion très élevée (en blanc) due à l'effet double-rebond (réflexion de l'onde sur la surface en eau et sur les troncs sous la canopée, qui va être renvoyée en direction du capteur).

Figure 20 : Comparaison des réflectances et rétrodiffusions sur une partie de notre zone d'étude, à la frontière Guyane française - Brésil.



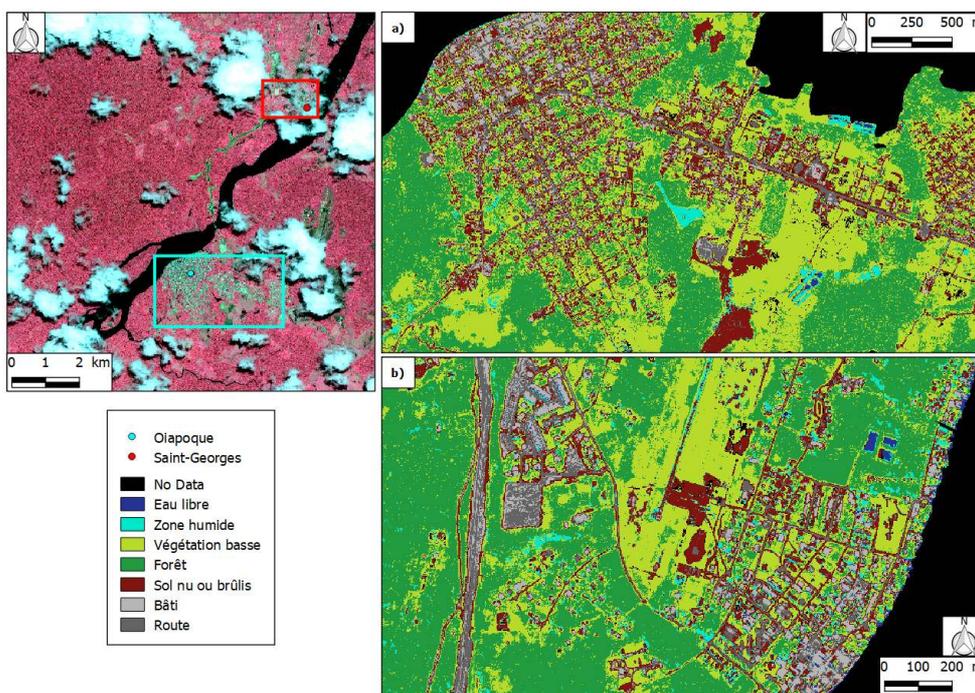
Les données sont issues des capteurs suivants : (a) Sentinel 2, septembre 2016, European Space Agency (ESA, 2016) (b) Sentinel 1 en polarisation VH, mai 2016, ESA (c) ALOS PALSAR en polarisation HH, mai 2010, © JAXA, METI

Catry et al., 2018.

Classification issue des données THR (Pléiades)

- 41 Pour la classification sur les villes d'Oiapoque et Saint-Georges, les meilleurs résultats ont été obtenus pour les classes « Zone humide », « Forêt », « Végétation basse » et « Route ». On note des confusions entre les classes « Eau » et « Zones humides ». Ces confusions peuvent s'expliquer par la présence de végétation. On note également des confusions importantes entre « Bâti » et « Sol nu » (figure 21).

Figure 21 : Composition colorée Pléiades (NIR-R-V) du 26/08/2014.

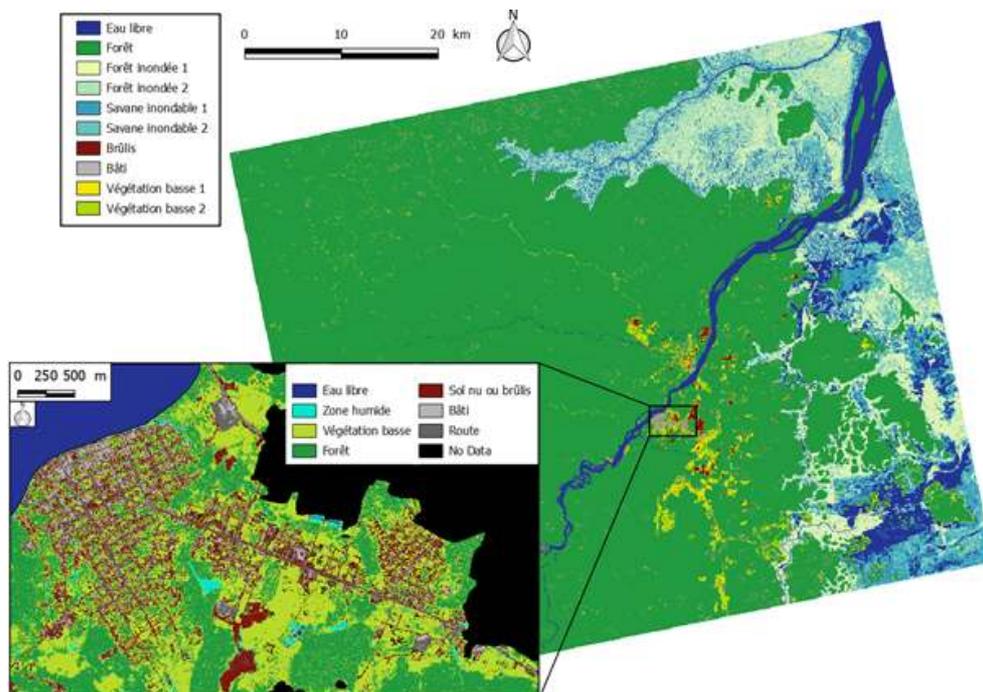


a) Classification du 26/08/2014 sur OIapoque b) Classification du 23/06/2012 sur Saint-Georges.

Classification composite par combinaison d'informations spatialisées

- 42 Pour Sentinel-2, nous avons gardé les classes « Forêt », « Végétation basse 1 », « Végétation basse 2 » et « Urbain ». Ces classes sont issues de la classification SVM.
- 43 Pour ALOS/PALSAR, nous avons gardé l'ensemble des classes comprises dans le masque créé pour délimiter les zones humides.
- 44 La classe « Brûlis » est issue de la classification RF appliquée à la combinaison des données Sentinel 1 et Sentinel 2. L'indice de précision de classification est meilleur pour les données uniquement issues de Sentinel-2. Nous avons cependant utilisé les résultats de la classification effectuée à partir des données combinées S1-S2 afin de profiter de la multi-temporalité des données Sentinel-1 (les brûlis n'étant réalisés qu'en saison sèche).
- 45 Pour Sentinel-1, nous avons utilisé la classification SVM comme donnée initiale afin de combler la perte d'information sur l'imagerie optique liée aux nuages et à leurs ombres.
- 46 L'ensemble des traitements évoqués dans cette étude permet de créer une cartographie inédite des différentes classes d'occupation du sol. Cette cartographie composite est le résultat de notre méthodologie, combinant une approche multi-capteurs RADAR & optique et une approche multi-résolution haute et très haute résolution spatiale (HR & THRS) (figure 22).

Figure 22 : Cartes d'occupation du sol composites combinant les approches multi-capteurs RADAR et optique, et multi-résolutions haute-résolution (HR) et très haute résolution spatiale (THRS) en saison humide sur la région d'Oiapoque.



Discussion: de l'occupation du sol à des applications en santé publique

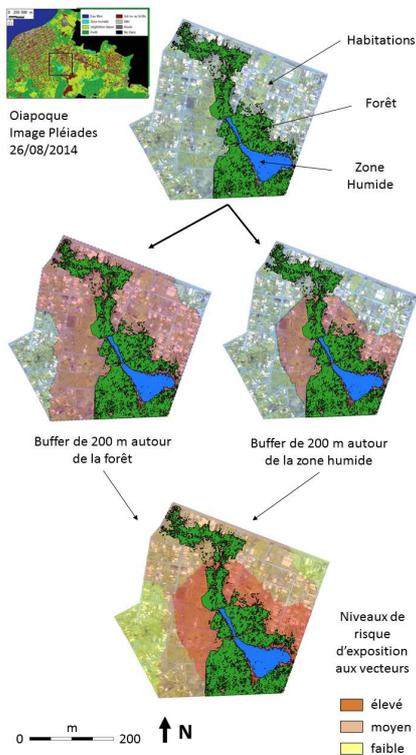
Application à l'évaluation du risque d'exposition vectorielle, en lien avec la transmission du paludisme

- 47 Nous proposons deux cas d'illustration exploitant une partie de la donnée de classification produite dans les parties (A) et (B). En l'absence de données in situ entomologique, il est difficile de proposer une estimation réaliste de la production des gîtes larvaires associée aux zones en eau.
- 48 La première application présentée ci-dessous s'intéresse à la production de carte de risque d'exposition aux vecteurs du paludisme par une approche par zones tampons centrées sur les lisières forestières (la forêt constituant des zones de repos pour les anophèles adultes), et les zones humides (gîtes larvaires potentiels). Une telle approche est appliquée à la ville d'Oiapoque, située dans l'état brésilien d'Amapá, à la frontière avec la Guyane française (fig. 23). En absence d'informations précises sur la population (densité, nombre d'habitants), il a été choisi d'utiliser la présence d'habitations comme proxy de la présence de population. Des approches basées sur des zones tampons ont déjà été testées précédemment (Stefani et al., 2011b), dans lesquelles des zones tampons (ou "buffers") de 200 et 400 m, correspondant à des distances classiques de déplacements des principales espèces d'anophèles, ont montré les résultats les plus probants pour la caractérisation environnementale de l'incidence du paludisme dans le village de Camopi en Guyane Française. Camopi est distant d'une centaine de kilomètres de Saint Georges d'Oiapoque en amont du fleuve, ce qui justifie ici l'exploitation des résultats de cette étude. Dans notre étude, des buffers de 200 m autour d'une zone humide et d'un patch de forêt ont été sélectionnés. Ce choix est justifié par la proximité d'un milieu urbain (classe

«zones d'habitations», figure 23), et par la recherche d'un compromis entre la distance de vol potentielle des Anophèles et la distance suffisante à parcourir pour que le moustique rencontre un hôte humain dans la zone sélectionnée. Sur la figure 23, l'échelle de couleur indique le niveau de risque d'exposition aux vecteurs. La zone en rouge représente un niveau de risque élevé, zone pour laquelle des habitations sont situées à la fois dans le buffer forêt et le buffer zone humide (risque de présence d'adultes au repos et de larves d'anophèles). La zone orange représente un niveau de risque moyen, étant située uniquement dans le buffer de la forêt, avec présence possible de vecteurs adultes. Enfin en jaune, le risque est faible, les habitations n'étant situées dans aucun des buffers définis plus haut.

- 49 Cette approche, très préliminaire, se veut principalement une illustration de l'utilisation des cartes d'occupation du sol composites produites via la méthodologie décrite dans cette étude. Des travaux en cours se concentrent sur le développement d'un modèle statistique d'interaction homme-vecteur basé sur des métriques paysagères.

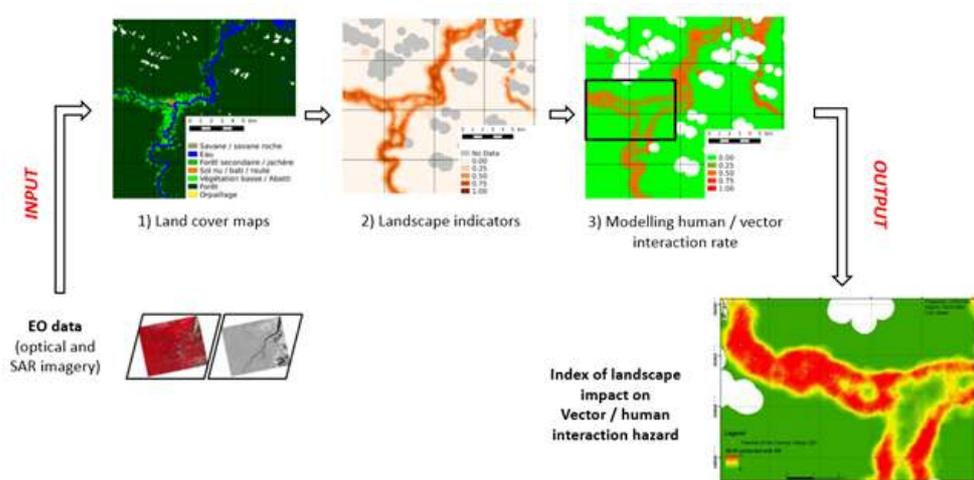
Figure 23 : Illustration de l'utilisation des cartes d'occupation du sol produites dans cette étude comme donnée d'entrée pour la production de cartes de risque d'exposition.



- 50 L'approche retenue est fondée sur l'utilisation de zones tampons caractérisant des zones potentielles de présence de vecteurs en fonction de la nature des conditions environnementales et définissant un niveau de risque d'exposition aux vecteurs.
- 51 Le deuxième cas d'application ci-dessous présente les résultats d'un modèle d'interactions Hommes-Vecteurs construit sur la base des travaux de Li et al. (2016). Li et al. (2016) ont proposé, à partir d'un modèle de connaissance des interactions hommes-anophèles (*An. darlingi* en particulier) en Amazonie, un indice de « dangerosité » du paysage appelé NLHI (pour Normalized Landscape-based Hazard Index). Cet indice traduit le fait que dans un espace donné, à densité vectorielle et à densité humaine égales, la

proportion de l'espace occupé par la forêt et la configuration spatiale du milieu forestier – plus spécifiquement le « taux de contact » entre les milieux forestier et non-forestier – influent significativement sur le risque d'exposition de l'homme aux piqûres d'anophèles. Li et al. (2016) définissent donc leur indice comme la combinaison de deux métriques paysagères, forest-ED (forest Edge Density : longueur totale des lisières de forêts) et forest-P (surface relative occupée par la forêt), calculées à partir d'une carte d'occupation du sol (figure 24) dans une fenêtre discoïdale glissante de 400 m de côté (d'après Stefani et al. 2011a). Li et al. (2016) ont évalué quantitativement cet indice en le comparant aux incidences du paludisme à *Plasmodium falciparum* observées à l'échelle des hameaux composants le village de Camopi (en faisant l'hypothèse d'une transmission domiciliaire et/ou péri-domiciliaire, permettant de corréliser les taux d'incidence aux habitations et l'environnement alentour).

Figure 24 : Schéma de production de la carte d'aléa caractérisant les interactions homme - vecteurs en lien avec la configuration du paysage, à la frontière Guyane française - Brésil



d'après Li et al., 2016. Cette carte d'aléa exploite une carte d'occupation du sol produite à partir de données SPOT-5.

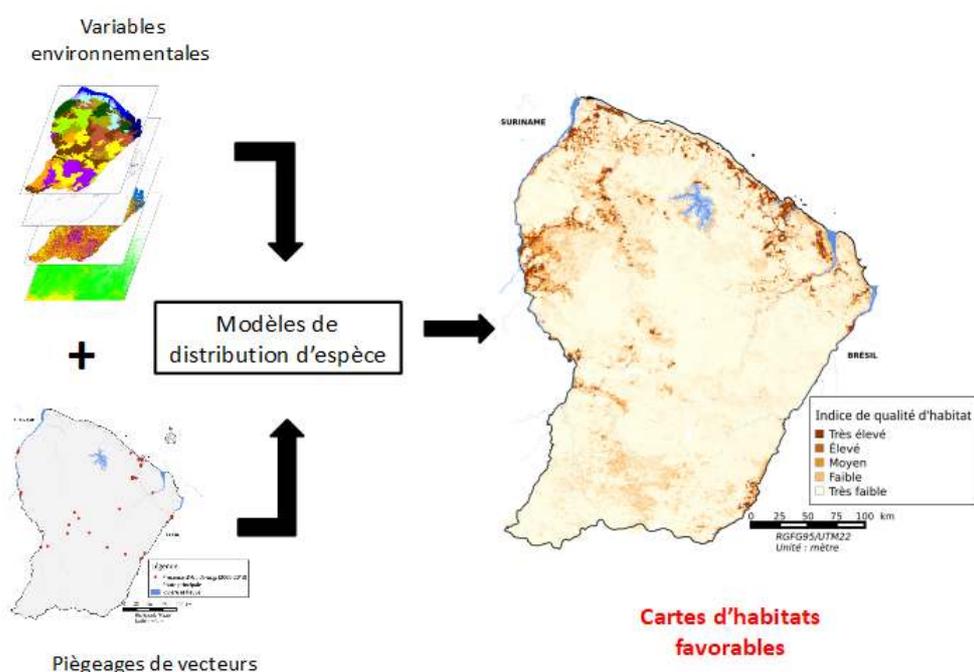
- 52 Les travaux à venir ont pour objectif d'implémenter ce modèle sur l'emprise de la zone cartographiée dans cette étude, en intégrant à la fois le rôle de la forêt et des zones humides en tant que lieux de production des vecteurs. Dans cette approche, les données SPOT 5 utilisées par Li et al. (2016) seront remplacées par des données récentes de type Sentinel 1 (RADAR en bande C) et 2 (optique multi-spectral). D'une résolution spatiale comparable aux données SPOT 5 (10-20 m), ces images permettront d'implémenter directement le modèle de Li et al. (2016), et d'établir une comparaison avec les résultats produits pour l'année 2012. Les missions Sentinel 1 et 2 présentent une haute répétitivité temporelle avec un mode d'acquisition systématique (5 à 12 jours selon la zone cartographiée). Cette fréquence d'acquisition inédite à cette résolution doit permettre de mieux appréhender la dynamique d'évolution du risque d'exposition vectorielle sur quelques années pour aider à la mise en place de stratégies de lutte. Un travail de prospection entomologique sera nécessaire afin de valider l'apport des données optique et RADAR pour des applications opérationnelles.
- 53 De plus, l'intégration de données caractérisant la population dans la zone d'étude reste à envisager. Enfin, face à l'importance des différentes échelles spatiales dans les processus

de transmission des maladies vectorielles, la production de cartes de risque d'exposition stratifiées intégrant ces différentes échelles devra être considérée.

Production de cartes d'habitats favorables aux vecteurs

- 54 Les cartes d'occupation du sol du type de celles produites dans cette étude peuvent également servir de données d'entrée pour la production de cartes d'habitats favorables aux vecteurs. Moua et al. (2016) a par exemple développé un modèle de distribution d'espèces permettant de cartographier les habitats favorables au principal vecteur du paludisme en Guyane française (An. darlingi) à partir de données environnementales incluant une carte d'occupation du sol (figure 25).

Figure 25 : Modélisation de distribution d'espèces et production de cartes d'habitats favorables à An. Darlingi du paludisme en Guyane française à partir de variables environnementales extraites de la télédétection, incluant des cartes d'occupation du sol.



Conclusion et perspectives

- 55 L'approche méthodologique développée dans cette étude s'appuie sur la combinaison de données d'observation de la Terre issues de différents capteurs. Cette approche s'est montrée particulièrement efficace dans la cartographie d'occupation du sol. La combinaison de couches d'occupation du sol extraites de données optiques, RADAR, et vectorielles à différentes résolutions spatiales a permis de déterminer des classes d'occupation du sol considérées dans la littérature comme des milieux potentiellement favorables au développement de vecteurs de transmission du paludisme : forêts, zones végétalisées, zones de déforestation, zones humides, gradient d'urbanisation (Sinka et al., 2010; Stefani et al., 2013).
- 56 L'occupation du sol sert de données d'entrée dans de nombreuses études dont l'objectif est la caractérisation ou la modélisation de l'écologie des vecteurs.

- 57 Ces études se fondent cependant sur des cartes d'occupation du sol ponctuelles (mono-date ou moyennes annuelles), et sur des données optiques fortement ennuagées. L'intérêt de nos travaux repose sur l'élaboration d'une méthode de classification qui s'affranchit des nuages, et qui permet la production de cartes d'occupation du sol incluant la caractérisation des zones végétalisées inondées ou inondables. Une mise à jour saisonnière ou mensuelle est rendue possible par les capacités de revisite des satellites. La qualité des données en sortie de modèles, comme ceux développés par Moua (2016), Li (2016) et Adde et al. (2016), pourrait être améliorée en prenant en entrée les cartes d'occupation du sol produites dans cette étude.
- 58 Le type d'approche retenu ici présente un intérêt important pour contribuer à la définition de stratégies de lutte anti-vectorielle, en s'appuyant sur une meilleure connaissance des zones d'interactions hommes-vecteurs, sources de transmission. En ce sens, la télédétection représente un outil important pour les applications futures dans le domaine de la santé publique.
- 59 Cette étude a été menée dans le cadre des projets TéléPAL (TOSCA CNES 2015--2017) et GAPAM Sentinela (Programme Guyamazon), avec le support de la JEAJ GITES et du LMI Sentinela (IRD)

BIBLIOGRAFIA

- Adde, A., Roux, E., Mangeas, M., Dessay, N., Nacher, M., Dusfour, I., Girod, R., Briolant, S. Dynamical Mapping of *Anopheles darlingi* Densities in a Residual Malaria Transmission Area of French Guiana by Using Remote Sensing and Meteorological Data. *PLoS ONE, Public Library of Science*, 2016, 11 (10).
- Bourzac, K. Infectious disease: Beating the big three. *Nature*, 2014, 507, S4.
- Catry, T., Li, Z., Roux, E., Herbreteau, V., Gurgel, H., Mangeas, M., Seyler and Dessay, N. Wetlands and Malaria in the Amazon: Guidelines for the Use of Synthetic Aperture Radar Remote-Sensing. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2018, 15, 468; doi:10.3390/ijerph15030468.
- Dobson, M.C.; Ulaby, F.T.; Pierce, L.E.; Sharik, T.L.; Bergen, K.M.; Kellndorfer, J.; Kendra, J.R.; Li, E.; Lin, Y.C.; Sarabandi, K.; et al. Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1995, 33, 877-895.
- Ferguson, H. M., Dornhaus, A., Beeche, A., Borgemeister, C., Gottlieb, M., Mulla, M. S., ...& Killeen, G. F. Ecology: a prerequisite for malaria elimination and eradication. *PLoS medicine*, 2010, 7(8), e1000303.
- Girod, R.; Roux, E.; Berger, F.; Stefani, A.; Gaborit, P.; Carinci, R.; Issaly, J.; Carme, B.; Dusfour, I. Unravelling the relationships between *Anopheles darlingi* (diptera: Culicidae) densities, environmental factors and malaria incidence: Understanding the variable patterns of malarial transmission in french guiana (south america). *Ann Trop Med Parasitol* 2011, 105, 107-122, 10.1179/136485911X12899838683322.

- Hiwat, H.; Bretas, G. Ecology of *Anopheles darlingi* Root with respect to vector importance: A review. *Parasites Vectors* 2011, 4, 177.
- Hostache, R., Puech, C., & Raclot, D. (2007). Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Kasischke, E.S.; Bourgeau-Chavez, L.L. Monitoring South Florida wetlands using ERS-1 SAR imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1997, 63, 281–291.
- Li, Z., Roux, E., Dessay, N., Girod, R., Stefani, A., Nacher, M., ... & Seyler, F. Mapping a knowledge-based malaria hazard index related to landscape using remote sensing: Application to the cross-border area between French Guiana and Brazil. *Remote Sensing*, 2016, 8(4), 319.
- Machault, V., Vignolles, C., Borchi, F., Vounatsou, P., Briolant, S., Lacaux, J. P., & Rogier, C. The use of remotely sensed environmental data in the study of malaria. *Geospatial Health*, 2011, 5(2), 151-168.
- Moua, Y., Roux, E., Girod, R., Dusfour, I., De Thoisy, B., Seyler, F., & Briolant, S. Distribution of the habitat suitability of the main malaria vector in French Guiana using maximum entropy modeling. *Journal of medical entomology*, 2016, 54(3), 606-621.
- Mouchet J., Biodiversité du paludisme dans le monde, John Libbey Eurotext, 2004.
- Peiter, P.C. Living conditions, health status and health services availability along the brazilian border: A geographical approach. *Cad Saúde Pública* 2007, 23, 237-250, 10.1590/S0102-311X2007001400013.
- Proisy, C. Apport des données radar à synthèse d'ouverture pour l'étude de la dynamique des écosystèmes forestiers (Doctoral dissertation, Toulouse 3, 1999).
- Rosa-Freitas, M.G.; Tsouris, P.; Peterson, A.T.; Honorio, N.A.; de Barros, F.S.M.; de Aguiar, D.B.; Gurgel, H.D.; de Arruda, M.E.; Vasconcelos, S.D.; Luitgards-Moura, J.F. An ecoregional classification for the state of roraima, brazil. The importance of landscape in malaria biology. *Mem I Oswaldo Cruz* 2007, 102, 349-357, Doi 10.1590/S0074-02762007005000052.
- Sinka, M.E.; Bangs, M.J.; Manguin, S.; Coetzee, M.; Mbogo, C.M.; Hemingway, J.; Patil, A.P.; Temperley, W.H.; Gething, P.W.; Kabaria, C.W.; et al. The dominant *Anopheles* vectors of human Malaria in the Americas: Occurrence data, distribution maps and bionomic précis. *Parasites Vectors*, 2010, 3, 117.
- Stefani, A.; Hanf, M.; Nacher, M.; Girod, R.; Carme, B. Environmental, entomological, socioeconomic and behavioural risk factors for malaria attacks in amerindian children of camopi, french guiana. *Malaria journal* 2011a, 10, 246, 10.1186/1475-2875-10-246.
- Stefani, A.; Roux, E.; Fotsing, J.M.; Carme, B. Studying relationships between environment and malaria incidence in camopi (french guiana) through the objective selection of buffer-based landscape characterisations. *Int J Health Geogr* 2011b, 10, 65, 10.1186/1476-072X-10-65.
- Stefani, A.; Dusfour, I.; Correa, A.P.; Cruz, M.C.; Dessay, N.; Galardo, A.K.; Galardo, C.D.; Girod, R.; Gomes, M.S.; Gurgel, H., et al. Land cover, land use and malaria in the amazon: A systematic literature review of studies using remotely sensed data. *Malaria journal* 2013, 12, 192, 10.1186/1475-2875-12-192.
- Tadei, W.P.; Rodrigues, I.B.; Rafael, M.S.; Sampaio, R.T.M.; Mesquita, H.G.; Pinheiro, V.C.S.; Zequi, J.A.C.; Roque, R.A.; dos Santos, J.M.M. Adaptive processes, control measures, genetic background, and resilience of malaria vectors and environmental changes in the amazon region. *Hydrobiologia* 2016, 10.1007/s10750-016-2960-y.

Vittor, A.Y.; Gilman, R.H.; Tielsch, J.; Glass, G.; Shields, T.; Lozano, W.S.; Pinedo-Cancino, V.; Patz, J.A. The effect of deforestation on the human-biting rate of *Anopheles darlingi*, the primary vector of *Plasmodium falciparum* malaria in the Peruvian Amazon. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 2006, 74, 3-11.

Vittor, A.Y.; Pan, W.; Gilman, R.H.; Tielsch, J.; Glass, G.; Shields, T.; Sanchez-Lozano, W.; Pinedo, V.V.; Salas-Cobos, E.; Flores, S., et al. Linking deforestation to malaria in the Amazon: Characterization of the breeding habitat of the principal malaria vector, *Anopheles darlingi*. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 2009, 81, 5-12.

Wang, Y.; Davis, F.W.; Melack, J.M.; Kasischke, E.S.; Christensen, N.L., Jr. The effects of changes in forest biomass on radar backscatter from tree canopies. *Remote Sens.* 1995, 16, 503-513.

RESUMOS

A distribuição dos mosquitos vetores da malária é controlada por vários fatores, como clima, tipos de cobertura do solo ou uso da terra, ou atividades humanas. Na região amazônica, persistem focos endêmicos de malária, particularmente na fronteira entre a Guiana Francesa e o Estado do Amapá no Brasil. Esta área, com mais de 300 km de extensão, apresenta muitas dificuldades na coleta de informações necessárias para a gestão da saúde das populações presentes. Neste tipo de contexto geográfico com poucos dados isolados e transfronteiriços, uma metodologia baseada na exploração de imagens de sensoriamento remoto é particularmente apropriada. Dados de sensoriamento remoto têm ampla cobertura espacial e uma grande variedade de resoluções espaciais. Aqui nós apresentamos uma abordagem combinando alta resolução e alta resolução espacial e dados de satélite óptico e RADAR. Nosso método possibilita mapear os diferentes tipos de cobertura do solo no contexto das fronteiras tropicais da Guiana Francesa - Brasil, caracterizado por um forte aproveitamento. Os resultados mostram que a complementaridade dos sensores ópticos e RADAR possibilita resolver, em grande parte, a questão da persistente nebulosidade. As classificações dos vários tipos de cobertura do solo obtidos permitem construir indicadores espacializados em relação aos espaços favoráveis à existência de criadouros e áreas de descanso do vetor da malária. Através de uma discussão sobre a aplicação de classificações da cobertura do solo compostas para a avaliação do risco de exposição à malária em várias escalas, este estudo de caso ilustra o interesse das abordagens de sensoriamento remoto por satélite para caracterizar os elementos da paisagem e a cobertura da terra, o que pode explicar a distribuição das populações de vetores em conexão com a transmissão de arbovírus.

La distribution des moustiques vecteurs du paludisme est contrôlée par divers facteurs comme le climat, les types d'occupation du sol, ou les activités humaines. Dans la région amazonienne, des foyers endémiques de paludisme subsistent, notamment à la frontière entre la Guyane française et l'état d'Amapá au Brésil. Cette zone, longue de plus de 300 km, présente de nombreuses difficultés dans la collecte des informations nécessaires à la gestion sanitaire des populations présentes. Dans ce type de contexte géographique bénéficiant de peu de données, isolé et transfrontalier, une méthodologie fondée sur l'exploitation d'images de télédétection est particulièrement adaptée. Les données de télédétection présentent une large couverture spatiale, et une gamme importante de résolutions spatiales. Nous présentons ici une approche combinant des données satellite optiques et RADAR à haute et très haute résolution spatiale. Notre méthode permet de cartographier les différents types d'occupation du sol dans le contexte tropical frontalier Guyane française - Brésil, caractérisé par un fort ennuagement. Les résultats montrent que la complémentarité des capteurs optiques et RADAR permet de résoudre en grande partie la

question de l'ennuagement persistant. En particulier, les classifications des différentes occupations du sol obtenues permettent de construire des indicateurs spatialisés en lien avec les espaces favorables à l'existence de gîtes larvaires et de zones de repos du vecteur du paludisme. A travers une discussion sur l'application de ces classifications composites à l'estimation du risque d'exposition vectoriel considéré à différentes échelles, ce cas d'étude illustre l'intérêt d'approches de télédétection satellite pour caractériser des éléments du paysage et l'occupation des sols, susceptibles de rendre compte de la distribution des populations vectorielles en lien avec la transmission d'arbovirus.

The distribution of mosquito vectors of malaria is controlled by various factors such as climate, land cover and land use, or human activities. In the Amazon region, endemic foci of malaria persist, particularly on the border between French Guiana and Amapa State in Brazil. This area, long by 300 km, presents many difficulties in collecting informations necessary for the health management of the local populations. In this type of geographical context, with few, isolated and cross-border data, a methodology based on the exploitation of remote sensing images is particularly appropriate. Remote sensing data have wide spatial coverage, and a large range of spatial resolutions. Here we present an approach combining high resolution and very high spatial resolution optical and SAR satellite data. Our method makes it possible to map the different types of land cover in the tropical border context French Guiana - Brazil, characterized by a persistent cloud cover. The results show that the complementarity of optical and RADAR sensors allows the production of multi-scale mapping of land use/land cover (LULC) independently from cloud cover. In particular, we produced LULC classifications to generate spatialized indicators and characterize the relationship between suitable habitats for malaria vectors and environmental factors. Through a discussion on the application of composite LULC classifications for the assessment of malaria exposure risk at various scales, this case study illustrates the interest of satellite remote sensing approaches to characterize landscape elements and land cover, which can account for the distribution of vector populations in connection with arboviruses transmission.

ÍNDICE

Palavras-chave: Malária, determinantes ambientais, cobertura do solo, sensoriamento remoto, combinação óptica-SAR.

Índice geográfico: fronteira Guyane française – Brésil

Keywords: Malaria, environmental determinants, land cover, remote sensing, optical-SAR combination.

Mots-clés: Paludisme, déterminants environnementaux, occupation du sol, télédétection, combinaison optique-SAR.

AUTORES

THIBAUT CATRY

ESPACE-DEV, UMR228 IRD/UM/UR/UG/UA, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), France, thibault.catry@ird.fr

AURÉA POTTIER

ESPACE-DEV, UMR228 IRD/UM/UR/UG/UA, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), France ; aurea.pottier@gmail.com

RENAUD MARTI

ESPACE-DEV, UMR228 IRD/UM/UR/UG/UA, Institut de Recherche pour le Développement (IRD),
France, renaud.marti@gmail.com

ZHICHAO LI

Laboratory for Earth System Modeling, Department of Earth System Science, Tsinghua
University, Beijing, China, zhichaoli@mail.tsinghua.edu.cn

EMMANUEL ROUX

ESPACE-DEV, UMR228 IRD/UM/UR/UG/UA, Institut de Recherche pour le Développement (IRD),
France ; emmanuel.roux@ird.fr

VINCENT HERBRETEAU

ESPACE-DEV, UMR228 IRD/UM/UR/UG/UA, Institut de Recherche pour le Développement (IRD),
France ; vincent.herbretreau@ird.fr

MORGAN MANGEAS

ESPACE-DEV, UMR228 IRD/UM/UR/UG/UA, Institut de Recherche pour le Développement (IRD),
France ; morgan.mangeas@ird.fr

LAURENT DEMAGISTRI

ESPACE-DEV, UMR228 IRD/UM/UR/UG/UA, Institut de Recherche pour le Développement (IRD),
France, laurent.demagistri@ird.fr

HELEN GURGEL

LAGAS, Departamento de Geografia, Universidade de Brasília (UnB), Brasil, helengurgel@unb.br

NADINE DESSAY

ESPACE-DEV, UMR228 IRD/UM/UR/UG/UA, Institut de Recherche pour le Développement (IRD),
France ; nadine.dessay@ird.fr