

## TÉLÉ-ÉPIDÉMIOLOGIE DES MALADIES DIARRHÉIQUES DANS LES ZONES RURALES TROPICALES OUEST-AFRICAINES

### RESUME :

Les diarrhées sont responsables de 1,57 million de décès. L'Afrique subsaharienne est la région la plus touchée. De plus, les changements climatiques devraient avoir un impact sur les ressources en eau à la fois en termes de quantité et de qualité, et augmenter potentiellement la présence, la dissémination et la transmission d'agents pathogènes. La thèse propose 1) d'étudier les déterminants environnementaux jouant un rôle majeur sur le risque bactériologique pour la santé dans les lacs et étangs des zones rurales tropicales en Afrique de l'Ouest (Burkina Faso, Niger), 2) d'évaluer le potentiel des données satellitaires pour suivre cet aléa sanitaire d'origine bactérienne afin de concevoir des méthodes de surveillance environnementale dans un contexte de changements climatiques et d'usages des terres, et enfin 3) de mettre en évidence dans quelle mesure l'environnement joue un rôle dans la dynamique des cas de diarrhée.

**Mots clés :** lien santé/environnement, télédétection, eaux de surface, aléa sanitaire, changements climatiques

### ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL/UNITE DE RECHERCHE :

Unité de recherche : UMR LETG 6554, <https://letg.cnrs.fr/>

Equipe d'accueil : LETG-Nantes, Université de Nantes, Bâtiment IGARUN, Chemin de la Censive du Tertre BP 81227, 44312 NANTES Cedex 3

Directeur HDR : Marc Robin

Encadrante scientifique : Elodie Robert ([elodie.robert@univ-nantes.fr](mailto:elodie.robert@univ-nantes.fr))

Co-financement : ANR JCJC MAMIWATA (responsable Elodie Robert)

Contact : Elodie ROBERT, [elodie.robert@univ-nantes.fr](mailto:elodie.robert@univ-nantes.fr), tel. : +33(0)2.53.48.76.52

La thèse sera encadrée par E. Robert (encadrante scientifique) et M. Robin (HDR) du LETG-Nantes. Elle s'intégrera dans l'axe « environnements continentaux », notamment le thème « risques et adaptation », et dans l'axe « télédétection et géomatique ». Impliqué dans l'ANR MAMIWATA, le/la doctorant(e) bénéficiera de multiples collaborations, notamment avec J. Perez-Saez (Université de Genève, expert des liens épidémiologie/environnement pour la modélisation des maladies diarrhéiques) et B. Funtasu (LETG-Nantes, pour son expertise en climatologie) ainsi qu'avec des chercheurs de l'UMR 5563 GET (M. Grippa, L. Kergoat) et plus largement avec les autres partenaires (Univ. Michigan aux Etats-Unis, Univ. Ki-Zerbo au Burkina Faso, Univ. Abdou Moumouni au Niger). Enfin, des interactions avec les projets portant sur les vulnérabilités (TELESSAO-2 et VALO, CNES) seront menées ainsi qu'avec Yasmina Karambiri qui a commencé sa thèse (« Contamination des eaux, maladies diarrhéiques et vulnérabilités socio-sanitaires au Burkina Faso ») en avril 2022. La complémentarité de ces 2 thèses permettra une compréhension globale du risque sanitaire dans la région ouest africaine.

### CONTEXTE, POSITIONNEMENT Et OBEJECTIFS de MAMIWATA :

En 2017, les maladies diarrhéiques étaient responsables de 1,57 million de décès (Roth et al. 2018). Cinq facteurs principaux expliquent cette situation : 1) la forte pollution des eaux de surface par les micro-organismes provenant des excréments d'animaux et d'humains, 2) l'utilisation généralisée des eaux de surface non traitées à des fins domestiques, de lavage, de jardinage et de loisirs, 3) une hygiène déficiente, 4) le manque des infrastructures d'assainissement et de santé de proximité, et 5) d'infrastructures de surveillance environnementale et sanitaire faibles ou inexistantes. Le fardeau sanitaire le plus élevé se produit en Afrique subsaharienne (Figure 1) où 85 millions de personnes,

dont la grande majorité vit dans des zones rurales, utilisaient encore de l'eau de surface non filtrée comme source d'eau potable et domestique. En 2019, les maladies diarrhéiques représentaient la 4<sup>ème</sup> cause et la 1<sup>ère</sup> cause de décès respectivement au Burkina Faso et au Niger (Murray et al. 2020). Par ailleurs, le changement climatique devrait avoir un impact sur les ressources en eau à la fois en terme de quantité et de qualité et augmenter potentiellement la présence, la dissémination et la transmission d'agents pathogènes (Carlton et al. 2014, 2016). L'impact résultant du changement climatique devrait augmenter le risque relatif de maladies diarrhéiques dans les régions tropicales et subtropicales : de 8 % à 11 % d'ici 2010-2039, et de 22 % à 29 % d'ici 2070-2099 (Kolstad & Johansson, 2011). De plus, l'extension des zones cultivées favorise le ruissellement de surface qui augmente la présence de matières en suspension (MES) et potentiellement d'agents pathogènes microbiens dans les eaux de surface (Rochelle-Newall et al. 2017 ; Cecchi et al. 2020). Enfin, l'Afrique subsaharienne connaît des mutations majeures en termes de croissance démographique notamment en milieu rural (Mercandalli & Losch, 2018) et d'insécurité politique. Tous ces facteurs remettent en cause l'accès à l'eau potable et aux soins.

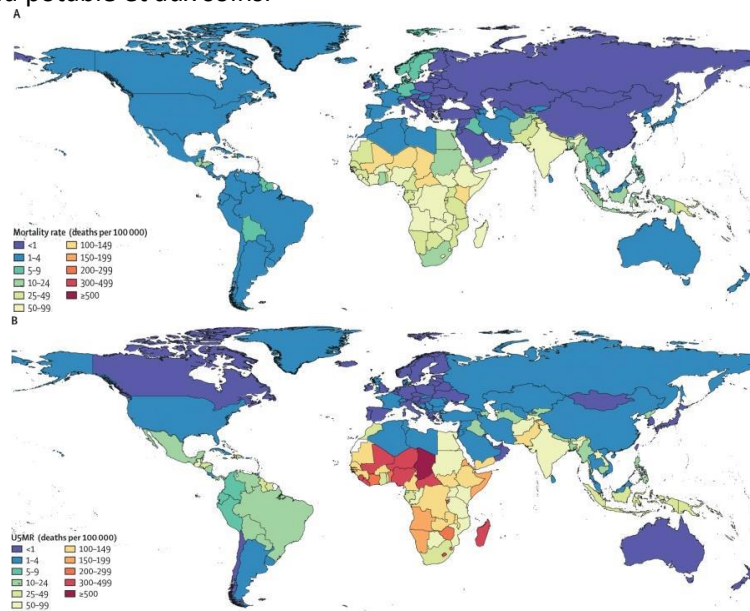


Figure 1. Mortalité diarrhéique en 2016 (a) tous les âges, (b) pour les enfants de moins de 5 ans (GBD 2016, Reiner et al. 2018)

Les maladies diarrhéiques les plus courantes sont causées par la présence de micro-organismes dans les eaux de surface. L'*Escherichia coli* (*E. coli*) est considérée comme le meilleur indicateur bactériologique de contamination fécale - ICF (Edberg et al. 2000; Kay et al. 2004) en zone tempérée, et elle est recommandée par l'Organisation mondiale de la santé pour évaluer la contamination de l'eau et le risque associé de maladies diarrhéiques. Cependant, peu d'études ont porté sur la dynamique de l'*E. coli* dans les eaux de surface, ses liens avec les déterminants hydro-météorologiques et son rôle en tant que ICF dans les régions tropicales et particulièrement en Afrique de l'Ouest. Nos premières mesures ont montré des corrélations positives significatives entre *E. coli* et les précipitations et les MES in situ dans la région de Kaporé (Burkina Faso, Robert et al. 2021). De fortes intensités de précipitations convectives dans cette zone, lorsque la végétation n'est pas encore complètement développée et lorsque des matériaux érodables sont présents, créent un ruissellement de surface susceptible de transporter des MES ainsi que des bactéries vers les eaux de surface. Un objectif majeur de MAMIWATA sera de caractériser plus précisément l'environnement d'*E. coli* et ses liens avec les variables météorologiques et les MES à une échelle temporelle plus fine, mais aussi d'aller plus loin en étudiant le couvert végétal, les paramètres physico-chimiques, le Carbone organique dissous (COD) et le carbone organique particulaire (COP). En outre, MAMIWATA traitera différents types d'eaux de surface (lac, étang) sur deux régions éco-climatiques différentes (Burkina Faso et Niger).

De plus, les études qui ont examiné les liens entre les déterminants environnementaux et les maladies diarrhéiques en Afrique subsaharienne sont rares (Levy et al. 2016). Nos premiers résultats au Burkina Faso mettent en évidence que les maladies diarrhéiques étaient fortement corrélées avec *E. coli*, les précipitations liées à la mousson, les MES in situ, le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) et la bande Proche Infra-Rouge (PIR) (Robert et al. 2021). Un objectif majeur de MAMIWATA est de vérifier ces liens sur plusieurs années et sur différents sites pour exposer dans quelle mesure l'environnement joue un rôle dans les cas de diarrhée d'origine bactérienne.

Enfin, la télé-épidémiologie apparaît comme un outil puissant pour étudier les relations climat-environnement-santé et pour comprendre et prédire la distribution spatio-temporelle des pathogènes par l'utilisation de données satellitaires. Ce type d'approche a été développé notamment pour le paludisme (Kabaria et al. 2016 ; Vignolles et al. 2016), la Dengue (Machault et al. 2014), le fièvre de la vallée du Rift (Guilloteau et al. 2014), la méningite (Thomson et al. 2006 ; Martiny et al. 2013), le choléra (Jutla et al. 2015), Ebola (Peckman et al. 2017), mais pas encore pour les maladies diarrhéiques en zones tropicales. Ainsi, la réalisation d'une thèse en télé-épidémiologie intégrant des variables environnementales, microbiologiques et épidémiologiques représentera un atout majeur dans les régions où les mesures in situ sont rares et où les impacts du changement climatique se font le plus fortement sentir (Niang et al. 2014). Nous avons récemment réalisé des études sur la surveillance de la turbidité de l'eau et des MES, et leurs liens avec les déterminants environnementaux à l'aide de données satellitaires (Robert et al. 2016a, b, 2017 ; Faye et al. 2020 ; Moussa et al. en rev. ; Grippa et al. en préparation). Enfin nous avons étudié la dynamique de *E. coli*, des maladies diarrhéiques et des déterminants environnementaux à l'aide de la télédétection. Nous avons constaté que la variabilité saisonnière de *E. coli* et des maladies diarrhéiques pouvait être prédite à l'aide des précipitations estimées par satellite (produit IMERG), de la réflectance Sentinel2 dans la bande PIR et des MES extraites à partir de Sentinel2 ainsi que des MES in situ (Robert et al, 2021). Ces résultats impliquent que l'utilisation des données satellitaires pourrait fortement améliorer le suivi de la qualité de l'eau. L'équipe impliquée dans MAMIWATA poursuivra l'évaluation des paramètres environnementaux estimés par satellite (température, DOC, POC) et construira un modèle de prédiction robuste de *E. coli* et des cas de diarrhée liés à l'environnement. L'un des objectifs majeurs de MAMIWATA et de la thèse est donc d'utiliser les données satellitaires pour surveiller indirectement la qualité de l'eau (aléa sanitaire) et révéler les facteurs environnementaux favorables à l'émergence de situations sanitaires critiques en modélisant la dynamique des agents pathogènes et des cas de diarrhée grâce à une approche innovante combinant épidémiologie et études environnementales déjà développées par l'équipe (Lemaitre et al. 2019 ; Perez-Saez et al. 2019).

#### **OBJECTIFS ET HYPOTHESES DE LA THESE:**

L'objectif principal de cette thèse est d'évaluer le potentiel des données satellitaires pour surveiller l'aléa sanitaire bactériologique en milieu rural tropical afin de concevoir des méthodes de surveillance environnementale dans un contexte de changements climatiques et d'usages des terres. Pour atteindre cet objectif, la thèse s'appuiera sur une collection unique de données radiométriques, de déterminants environnementaux in-situ et satellitaires, de mesures d'*E. coli*, et de données épidémiologiques sur 4 sites ruraux au Burkina Faso et au Niger collectées dans le cadre de plusieurs projets TELESSAO (CNES), SANTELLITE (CNRS) et MAMIWATA (ANR JCJC). La thèse repose sur 2 principales hypothèses :

- Dans un contexte d'utilisation des eaux de surface, l'environnement joue un rôle important dans la dynamique des cas de diarrhée. La télé-épidémiologie peut être un outil efficace pour caractériser l'environnement des pathogènes et indirectement l'incidence des cas de diarrhée.
- Les changements environnementaux en cours (hausse des températures, changements d'usages des terres, etc.) laissent présager une augmentation des risques sanitaires et donc éventuellement des cas de diarrhée.

#### **STRUCTURE DE LA THÈSE :**

L'objectif est de montrer que la variabilité saisonnière de l'*E. coli* et des maladies diarrhéiques peut être prédite à l'aide de données environnementales estimées par satellite (précipitations, MES, NDVI, température, COP, COD). Cette analyse sera appliquée sur 4 sites en considérant un gradient climatique afin d'obtenir un modèle statistique de prédiction de la dynamique des maladies diarrhéiques. Le programme de travail sera alors décomposé en trois temps :

- 1) des algorithmes seront d'abord évalués et développés pour estimer les paramètres environnementaux (MES, NDVI, température, COP, COD) par satellite principalement avec Sentinel2 ainsi que Landsat8 et Sentinel3.
- 2) Puis ces paramètres seront mis en regard avec les données d'*E. coli* et les cas de diarrhées collectés sur les 4 sites entre 2020 et 2023 afin d'obtenir un modèle statistique de prédiction de la dynamique d'*E. coli* et des maladies diarrhéiques en tenant compte des associations spatiales et de leurs dynamiques temporelles. Il s'agira de tester l'association causale entre ces facteurs et la contamination et la dynamique épidémiologique à l'aide de régression PLS (Partial Least Square) et de modèles dynamiques. Des cartes d'aléa sanitaire seront produites.
- 3) Enfin, l'identification des principaux paramètres clés à l'origine de l'aléa sanitaire sera utilisée pour tester des scénarios de l'impact du changement climatique et de l'usage des terres sur la qualité de l'eau et les risques pour la santé. La 1<sup>ère</sup> étape sera de réaliser une revue de la littérature pour identifier et examiner les évolutions futures des différents paramètres environnementaux (NDVI, température, pluviométrie, etc.) jouant un rôle dans le développement de l'*E. coli* et indirectement dans la dynamique des maladies diarrhéiques. Puis il s'agira de réaliser des tests de sensibilité à l'aide de modèles statistiques et de mettre en évidence d'éventuels changements sur l'aléa sanitaire et indirectement sur les cas de diarrhée.

#### **RESULTATS ATTENDUS et IMPACTS SCIENTIFIQUES :**

Les résultats de cette recherche auront un impact scientifique immédiat en raison de la nouveauté de l'utilisation des images satellites pour prédire la présence d'*E. coli* (aléa sanitaire) et la dynamique des cas de diarrhée. L'objectif à moyen terme est de créer des indices d'aléa sanitaire utilisables par les acteurs de santé publique d'abord en Afrique de l'Ouest. Ce travail bénéficiera à l'amélioration de la santé de la population en Afrique de l'Ouest dans le cadre des Objectifs de Développement Durable des Nations Unies (i.e. ODD 3 ; Bonne santé et bien-être).

#### **PROFIL SOUHAITE POUR LE CANDIDAT :**

Le (la) candidat(e) doit être titulaire d'un master dans le domaine de la géographie, ou d'un diplôme d'une école d'ingénieur en environnement. Il ou elle devra avoir acquis des compétences en télédétection et en statistiques. Il ou elle devra maîtriser un langage de programmation. Des connaissances en modélisation seraient un plus.

Il ou elle devra être dynamique, autonome, apte à travailler en équipe, avoir un intérêt pour l'interdisciplinarité.

#### **Références :**

- Carlton EJ, Eisenberg J.N.S, Goldstick J, Cevallos W, Trostle J, Levy K. Heavy Rainfall Events and Diarrhea Incidence: The Role of Social and Environmental Factors. *American Journal of Epidemiology*. 2014; 179, 3: 344–52. <https://doi.org/10.1093/aje/kwt279> PMID: 24256618
- Carlton E.J, Woster A.P, DeWitt P, Goldstein R.S, Levy K. A Systematic Review and Meta-Analysis of Ambient Temperature and Diarrhoeal Diseases. *International Journal of Epidemiology*. 2016; 45, 1: 117–30. <https://doi.org/10.1093/ije/dyv296>
- Cecchi P, Forkuor G, Cofie O, Lalanne F, Poussin J-C, Jamin J-Y. Small Reservoirs, Landscape Changes and Water Quality in Sub-Saharan West Africa. *Water*. 2020; 12, 7: 1967. <https://doi.org/10.3390/w12071967>.
- Edberg S.C., Rice E.W, Karlin R.J, Allen M.J. Escherichia Coli: The Best Biological Drinking Water Indicator for Public Health Protection. *Journal of Applied Microbiology*. 2000; 88, S1: 106S–116S., <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2000.tb05338.x>
- Faye C., Grippa M., Kergoat L., Robert E. « Investigating the Drivers of Total Suspended Sediment Regime in the Senegal River Basin Using Landsat 8 Satellite Images ». *Journal of Environmental Geography* 13, 1-2, 2020
- Grippa M., Robert E., Abdourhamane Touré A., Morin G., Boubacar Moussa M., Kergoat L. *Suspended particulate matter and water color in the Sahel: perspectives for high resolution optical satellite sensors (in prep., Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation)*.

Guilloteau C., Gosset M., Vignolles C., Acoba M., Tourre Y.M., Lacaux J-P. "Impacts of Satellite-Based Rainfall Products on Predicting Spatial Patterns of Rift Valley Fever Vectors", *J. of hydrometeorological*, 15, 2014.

Jutla A., Aldaach H., Bilian H., Akanda A., Huq A., Colwell R. "Satellite based assessment of hydroclimatic conditions related to cholera in Zimbabwe". *PLoS ONE*, 10 (9), 2015

Kay D, Bartram J, Prüss A, Ashbolt N, Wyer M.D, Fleisher J.M, et al. Derivation of Numerical Values for the World Health Organization Guidelines for Recreational Waters. *Water Research*. 2004; 38, 5: 1296–1304. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.11.032>

Kabaria C.W., Molteni F., Mandike R., Chacky F., Noor A.M., Snow R.W., Linard C. "Mapping intra-urban malaria risk using high resolution satellite imagery: a case study of Dar es Salaam". *Int. J. Health Geogr.* 15 (1), 26, 2016

Kolstad E.W, Johansson K.A. Uncertainties Associated with Quantifying Climate Change Impacts on Human Health: A Case Study for Diarrhea. *Environmental Health Perspectives*. 2011; 119, 3: 299–305. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002060>

Lemaitre J., Pasetto D., Perez-Saez J., Sciarra C., Wamala J.F., Rinaldo A. « Rainfall as a Driver of Epidemic Cholera: Comparative Model Assessments of the Effect of Intra-Seasonal Precipitation Events ». *Acta Tropica* 190, 2019.

Levy K, Woster A.P, Goldstein R.S, Carlton E.J. Untangling the Impacts of Climate Change on Waterborne Diseases: A Systematic Review of Relationships between Diarrheal Diseases and Temperature, Rainfall, Flooding, and Drought. *Environmental Science & Technology*. 2016; 50, 10: 4905–22. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06186>.

Machault V., Yébakima A., Etienne M., Vignolles C., Palany P., Tourre Y.M., Guérécheau M., Lacaux J-P. "Mapping Entomological Dengue Risk Levels in Martinique Using High-Resolution Remote-Sensing Environmental Data", *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 3, 2014 doi:10.3390/ijgi3041352

Martiny N., Chiapello I "Assessments for the impact of mineral dust on the meningitis incidence in West Africa". *Atmospheric Environment*, 70, 2013

Mercandalli S. & Losch B., eds. 2018. Une Afrique rurale en mouvement. Dynamiques et facteurs des migrations au sud du Sahara. Rome, FAO et CIRAD. 60 p.

Moussa B.M., Abdourhamane Touré A., Kergoat L., Lartiges B., Rochelle-Newall E., Gosset M., Alkali Tahinoum B., Grippa M. "Spatio-temporal dynamics of suspended particulate matter in the middle Niger River using in-situ and satellite radiometric measurements". *Journal of Hydrology: Regional Studies. En révision*

Murray et al. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019

Niang et al. Chapter 22 Africa. In *Clim. Change 2014 : Impact Adap. And Vuln. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Peckham R., Sinha R. Satellites and the New War on Infection: Tracking Ebola in West Africa. Geoforum*, 80, 2017

Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014

Perez-Saez J., M., Zongo D., Rinaldo A. « Comparative Analysis of Time-Based and Quadrat Sampling in Seasonal Population Dynamics of Intermediate Hosts of Human Schistosomes ». *PLoS Neg. Trop. Dis.* 13, 2019

Robert E, Grippa M, Kergoat L, Pinet S, Gal L, Cochonneau G, et al. Monitoring Water Turbidity and Surface Suspended Sediment Concentration of the Bagre Reservoir (Burkina Faso) Using MODIS and Field Reflectance Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2016; 52: 243–51. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.016>.

Robert E, Grippa M, Kergoat L, Martinez J-M, Pinet S, Somdecoste T, et al. Monitoring inland water turbidity: contribution of Spot5 Take5 to health hazard monitoring in West Africa (Bagre Lake, Burkina Faso). *Proc. Int. Conf., Living Planet Symposium 2016, ESA, 9–14 mai 2016, 7 pp Available from: https://www.researchgate.net/publication/303471854\_MONITORING\_INLAND\_WATER\_TURBIDITY\_CONTRIBUTION\_OF\_SPOT5\_TAKE5\_TO\_HEALTH\_HAZARD\_MONITORING\_IN\_WEST\_AFRICA\_BAGRE\_LAKE\_BURKINA\_FASO.*

Robert E, Kergoat L, Soumaguel N, Merlet S, Martinez J-M, Diawara M, et al. Analysis of Suspended Particulate Matter and Its Drivers in Sahelian Ponds and Lakes by Remote Sensing (Landsat and MODIS): Gourma Region, Mali. *Remote Sensing*. 2017; 9, 12: 1272. <https://doi.org/10.3390/rs9121272>.

Robert E, Grippa M, Nikiema DE, Kergoat L, Koudougou H, Auda Y, et al. (2021) Environmental determinants of *E. coli*, link with the diarrheal diseases, and indication of vulnerability criteria in tropical West Africa (Kapore, Burkina Faso). *PLoS Negl Trop Dis* 15(8): e0009634. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0009634>

Rochelle-Newall E, Pierret A, Boithias L, Ribolzi O, Robert E. « Accès à l'eau, usages des terres et dégradation des sols: un triptyque qui favorise l'émergence des maladies diarrhéiques », in *Désertification et système terre: De la (re)connaissance à l'action*, Editor: Liaison Energie-Francophonie numéro 105 - 2ème trimestre 2017, Publisher: Jean-Pierre Ndoutoum, Editors: Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD), 2017. pp.83-85.

Roth G.A, Abate D, Abate K.H, Abay S.M, Abbafati C, Abbasi N, et al. Global, Regional, and National Age-Sex-Specific Mortality for 282 Causes of Death in 195 Countries and Territories, 1980–2017: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*. 2018; 392, 10159: 1736–88. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32203-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32203-7).

Thomson M.C., Molesworth A.M., Djingarey M.H., Yameogo K.R., Belanger F., Cuevas L.E., "Potential of environmental models to predict meningitis epidemics in Africa". *Trop. Med. Int. Health*, 11 (6), 2006

Vignolles C., Sauerborn R., Dambach P., Viel C., Soubeyroux J-M , Sié A., Rogier C., Tourre Y.M "Re-emerging Malaria vectors in rural Sahel (Nouna, Burkina Faso): The Paluclim project". *The Int. Arch. of the Phot., Rem. Sens. & Spat. Inf. Sci.*, 2016