

Réponse à l'APR GICC 2010

A.RECAPITULATIF DU PROJET

Titre du projet :

Paluclim: Impacts des facteurs climatiques sur la production des vecteurs du paludisme en zone rurale du Sahel *et stratégies d'adaptation* – *application* à la région de Nouna au Burkina-Faso.

Mots-clés :

Paludisme rural, climat, changement climatique, risque environnemental, adaptation, Nouna, Burkina-Faso, Sahel

Thème(s) de l'APR concerné(s) :

2. Le changement climatique et l'identification de ses effets
4. L'adaptation et la nécessaire descente d'échelle

Responsable/Coordinateur scientifique :

Cécile Vignolles

Titre : Ingénieur

Fonction : Coresponsable du programme télé-épidémiologie

Organisme: Centre National d'Études Spatiales (CNES), 18 avenue Edouard Belin, BPi 2902, 31401 Toulouse cedex 9

Tél: 05 61 24 33 45 Fax: 05 61 28 28 99

Mail: cecile.vignolles@cnes.fr

Organisme(s) / Laboratoire(s) impliqué(s) dans le projet :

- Centre national d'études spatiales (CNES), Toulouse, France
- Université d'Heidelberg, Allemagne
- Centre de Recherche en Santé de Nouna (CRSN), Nouna, Burkina Faso
- Météo-France, DCLIM/AVH, Toulouse, France
- Institut de Recherche Biomédicale des Armées IRBA, Marseille, France

Montant de l'aide (TTC) demandé au programme GICC (MEEDDM et/ou autres financeurs du programme) :

249 400 euros

Cofinancements assurés et/ou prévus (TTC) (y compris autres que nationaux) :

Durée :

30 mois

Résumé du projet de recherche et résultats attendus en termes de gestion environnementale

La production des cartes de risque sur la base des images satellitaires donne une nouvelle approche de télé-épidémiologie. Au Burkina Faso Soudano-Sahélien, dans la région de Nouna le paludisme est endémique mais dépendant du régime pluvial. Les cas de paludisme comportent une corrélation retardée avec les pluies, mais la répartition du risque spatial et temporel n'est pas encore étudié. Cette étude va pointer son focus d'une part sur la génération des cartes de risque et d'autre part sur des contre-mesures, testées dans des villages comparables. La création des cartes de risque suppose une étude sur la prévalence des larves des Anophèles dans les différentes gîtes naturelles et anthropogènes de la région. Avec l'affectation des risques potentiels reposant sur la prévalence des larves aux types des gîtes, une classification améliorée des images satellitaires dans les classes de risque sera possible. Les classes de risque générées dans cette phase du projet permettront le choix des villages pour d'une part la validation du risque avec des captures des moustiques adultes et d'autre part l'allocation et application des contre-mesures dans les villages avec un risque élevé. Avec l'implication du composant temporel, on trouvera une possibilité pour une prédiction pour le risque au cours d'une année. Ces cartes dynamiques peuvent être produites de façon opérationnelle quotidiennement à partir des données pluviométriques acquises en quasi temps réel par la mission TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) et encore plus précis sur la base des données fournies par les stations météorologiques dans la région, maintenu par le CRSN à Nouna. Le projet Paluclim se propose donc d'étudier l'impact de la variabilité du climat (du saisonnier jusqu'aux basses fréquences, comprenant les tendances et les changements climatiques) sur la pluviométrie et par conséquent sur la prévision du risque. Ainsi, une distribution statistique mensuelle à partir des événements pluvieux et de leurs incertitudes est prévue et sera disponible dans un bulletin mensuel où l'on retrouvera la prévision saisonnière, la fréquence de distribution des pluies ainsi que des cartes de risque de présence des vecteurs. A l'échelle régionale du changement climatique, des cartes de prévisions et tendances de la pluviométrie, incluant la composante anthropogéniques seront émises. La prévision des zones de risque pour la population peut alors permettre de mettre en place des stratégies d'adaptation afin d'atténuer les impacts du climat à l'échelle du jour, de la saison et du changement climatique. L'objectif est de montrer comment ces cartes de risque, peuvent contribuer à la mise en place de politique de veille sanitaire et être intégrées dans des systèmes d'alerte précoce. Avec l'implication des cartes de risque et par conséquent l'application des contre-mesures avec un but précis, des nouvelles méthodes pour la lutte contre le paludisme dans une manière très efficace de la coté de diminution du nombre des vecteurs mais aussi de la coté économique peuvent être établis.

B.DESSCRIPTIF DU PROJET

Justification du projet de recherche

Situation actuelle du sujet

Introduction : paludisme, vecteurs, climat, changement climatique

Le paludisme constitue toujours le principal problème de santé publique en Afrique et plus particulièrement dans sa partie subsaharienne. Le paludisme sévit dans de nombreux pays tropicaux où près de 2 milliards de personnes sont exposés. Annuellement l'incidence du paludisme dans le monde est estimée entre 300 et 500 millions de cas cliniques. Le nombre de décès causés par le paludisme se situe entre 1,1 et 2,7 millions dont 90% sont enregistrés en Afrique subsaharienne où environ 1 million d'enfants âgés de moins de 5 ans meurent du paludisme chaque année. Les conséquences économiques du paludisme dans les pays endémiques, également parmi les plus pauvres de la planète, sont considérables. Le paludisme est en effet la cause majeure de pauvreté de par ses coûts directs et indirects sur les revenus des familles et sur la croissance économique de ces pays.

La transmission du paludisme à Nouna est endémique perpétuelle mais avec des fluctuations saisonnières. Le complexe *Anophèles gambiae* est le vecteur prédominant, *A. funestus* a une importance mineure. La région est holo-endémique. Le taux d'inoculation entomologique (TIE) varie de 100 à 1000 par personne et par an. La moyenne d'incidence de cas de paludisme par enfant et par mois est de 0,21 pendant la saison de transmission élevée (Juillet-Décembre). La prévalence de *Plasmodium falciparum* est de 68 % en saison de basse transmission et de 83 % en saison de haute transmission. Sur la base des diagnostics des autopsies verbales, 45 % des décès des enfants sont liés au paludisme (Traoré, 2003)

Sur l'Afrique de l'ouest, **les résultats de modèles climatiques** couplés (océan-atmosphère) et utilisant les scénarios de la Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), indiquent la possibilité de modifications importantes de l'environnement physique local (pluviométrie, température, surfaces en eau, convergence d'humidité, végétation). Ces changements devraient affecter les écosystèmes, la biologie, l'écologie des moustiques/vecteurs (survie, compétence, prévalence etc.) et par conséquent le risque de transmission des maladies dites à vecteurs en général et le paludisme en particulier. Les deux principaux paramètres physiques qui sont impliqués dans l'écologie des vecteurs sont la pluviométrie (et indirectement l'advection de vapeur d'eau dans les basses couches) et la température. L'abondance de la pluviométrie et surtout la distribution spatio-temporelle des événements pluvieux (associée aux ondes d'est, lignes de grains et convection locale) vont conditionner la présence et la productivité des gîtes larvaires des vecteurs impliqués. L'augmentation de température, provoquera à la fois un accroissement de la longévité des vecteurs, une diminution du temps de digestion des repas et donc une durée plus courte du développement de l'agent pathogène dans l'organisme du vecteur. Par ailleurs, la variabilité et le changement du climat, pourraient conduire les vecteurs à 'coloniser' de nouveaux territoires.

Dans le cas du paludisme, les facteurs climatiques sont à la fois nécessaires pour déclencher la mise en eau, le développement **des gîtes larvaires et pour contrôler/moduler les cycles biologiques du moustique et de son parasite**. Parallèlement les variations climatiques de types basses fréquences (c.à.d. de quasi décennal à multi décennal) peuvent moduler l'intensité des pluies au Sahel (Tourre et al. 2010) ainsi que la fréquence et l'occurrence du paludisme dans les régions sahéennes. En effet, ces relations climat–environnement-paludisme, influencent la fréquence des réinfections et donc conditionnent l'immunité des populations. Finalement, la variabilité spatio-temporelle du régime pluviométrique, la multiplication des aménagements hydrauliques, l'accroissement des cultures irriguées augmentent à la fois la transmission du parasite et la vulnérabilité des hôtes (augmentation et concentration des populations humaines et animales).

Ainsi, l'analyse du risque d'émergence (réémergence) du paludisme possède non seulement une composante climat/environnement, mais aussi une forte composante anthropique. De nombreux paramètres anthropiques (mesures de protection, aménagement de l'espace, traitements agricoles aux insecticides etc.) modulent et rendent plus complexe la relation 'climat-environnement-paludisme'. **Dans le cadre de ce projet, nous faisons le choix d'étudier en détail la relation entre le climat, sa variabilité et son changement et le risque paludisme associé à l'exposition vectorielle.** A ce stade, l'impact des facteurs anthropiques peut être appréhendé par quelques hypothèses relatives à l'occupation et à l'organisation de l'environnement par les populations.

L'intérêt pour la santé publique des cartes spatio-temporelles identifiant des zones à haut risque de transmission est basé sur les observations suivantes :

1. Au Burkina Faso, comme dans la plupart des pays en voie de développement, la couverture en moyens de contrôle du paludisme est extrêmement limitée. Six pourcents de la population seulement disposent de moustiquaires imprégnées (Muller et al., 2008a) et environ 25 % de la population seulement a un accès au traitement (Pfeiffer et al., 2008a) antipaludique de première ligne adopté par l'OMS et par le Burkina Faso : les thérapies à base de dérivés de l'artémisinine (TCA). De plus, l'adhésion au traitement à la fois du côté des prestataires et du côté des patients est très insuffisante, ce qui relativise la disponibilité physique de médicaments efficaces dans les services de santé.

2. Il a été démontré que l'incidence du paludisme chez les enfants est associée au taux d'inoculation entomologique (Smith et al. 2005). Nous pensons donc que le TIE est un paramètre clé pour cibler les interventions.

3. Le TIE peut être estimé en utilisant la télédétection (Rogers et al., 2002; Dambach et al., 2009; Tourre et al., 2003.(Smith et al., 2005))

4. Le traitement par des insecticides gazeux est efficace sur la réduction du nombre de larves et du TIE. Malheureusement, la lutte anti larvaire au Burkina Faso, comme dans la plupart des pays en voie de développement est sporadique et n'assure pas une couverture complète du territoire. Aucune stratégie de lutte anti larvaire n'est appliquée dans la zone de recherche de Nouna.

Dans le même temps nous allons faire l'inventaire des coûts associés engendrés par les interventions de lutte anti larvaire. Un programme de management intégré de contrôle des vecteurs (integrated vector management programme, IVM) sera développé et mis en place. Ce programme sera basé sur l'utilisation de mesures biologiques non polluantes, essentiellement des agents biologiques *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti) et *Bacillus sphaericus* (Bsph). L'application va permettre de réduire l'utilisation des insecticides chimiques. L'exécution du programme IVM réduit le risque qu'une résistance du vecteur contre les pyrèthroïdes se développe.

1. L'approche conceptuelle du projet Paluclim

Le paludisme reste le problème majeur de santé publique au Burkina Faso. La région d'étude de Nouna est représentative d'un environnement rural dans lequel la plupart des habitants sont en contact avec des moustiques du genre *Anophèles*, vecteurs du paludisme. La lutte antipaludique souffre de l'absence d'information sur le fonctionnement des gîtes larvaires qui pourrait guider les interventions de la lutte anti-vectorielle. La compréhension de la dynamique vectorielle et la production de cartes du risque d'exposition de la population aux piqûres d'anophèles pourra participer à la prise de décision des acteurs de la santé en matière de lutte paludique.

Nous proposons donc de cibler des mesures intégrées de contrôle du paludisme sur les zones à haut risque. Ceci inclut la distribution active et gratuite des moustiquaires (en ligne avec une nouvelle politique nationale), la mise à disposition de TCA auprès des mères dans les zones à haut risque pour assurer le traitement précoce des enfants en période de transmission qui est également la période au cours de laquelle l'accès aux services de santé est difficile. L'outil le plus important, qui est la réponse logique au diagnostic d'habitat à haut risque de transmission, consiste en un traitement biologique des gîtes par une suspension de *Bacillus thuringiensis israeliensis*. Ce volet sera assuré par le Prof. Norbert Becker qui a une longue expérience dans la lutte anti-larvaire biologique en RFA (vallée du Rhin, KABS) en France (vallée du Rhône) et dans les pays en voie de développement. Ces expériences incluent la lutte anti-vectorielle contre les anophèles (Fillinger et al., 2003; Fillinger et al.,

2004; Rydzanicz et al., 2009). Dans un futur projet des mesures intégrées de lutte seront intégrées dans la lutte.

1.1 Zone d'étude

La zone d'étude de Nouna est située au Nord-Ouest du Burkina Faso à la frontière du Mali. Nouna est un département, situé dans la province de la Kossi (7324 km²). La ville de Nouna qui comprend 20.000 habitants environ en est le chef-lieu. Les 50.000 autres habitants du département se répartissent dans une soixantaine de villages. Chacune des scènes SPOT 5 utilisées dans cette étude, est centrée sur la ville de Nouna et couvre une zone de 60 km sur 60. La majeure partie de cette zone se situe à des altitudes comprises entre 150 et 200 mètres. Le nord de la zone, orienté vers le Sahel, est caractérisé par des sols sableux et une végétation moins dense tandis que le sud reçoit des précipitations plus élevées. Ainsi, la présence de sols argileux et limoneux allié à une plus forte pluviométrie favorise l'eau de surface. La région d'étude se trouve dans la zone Soudano-Sahélien où le paludisme est endémique mais dépendant du régime des pluies.

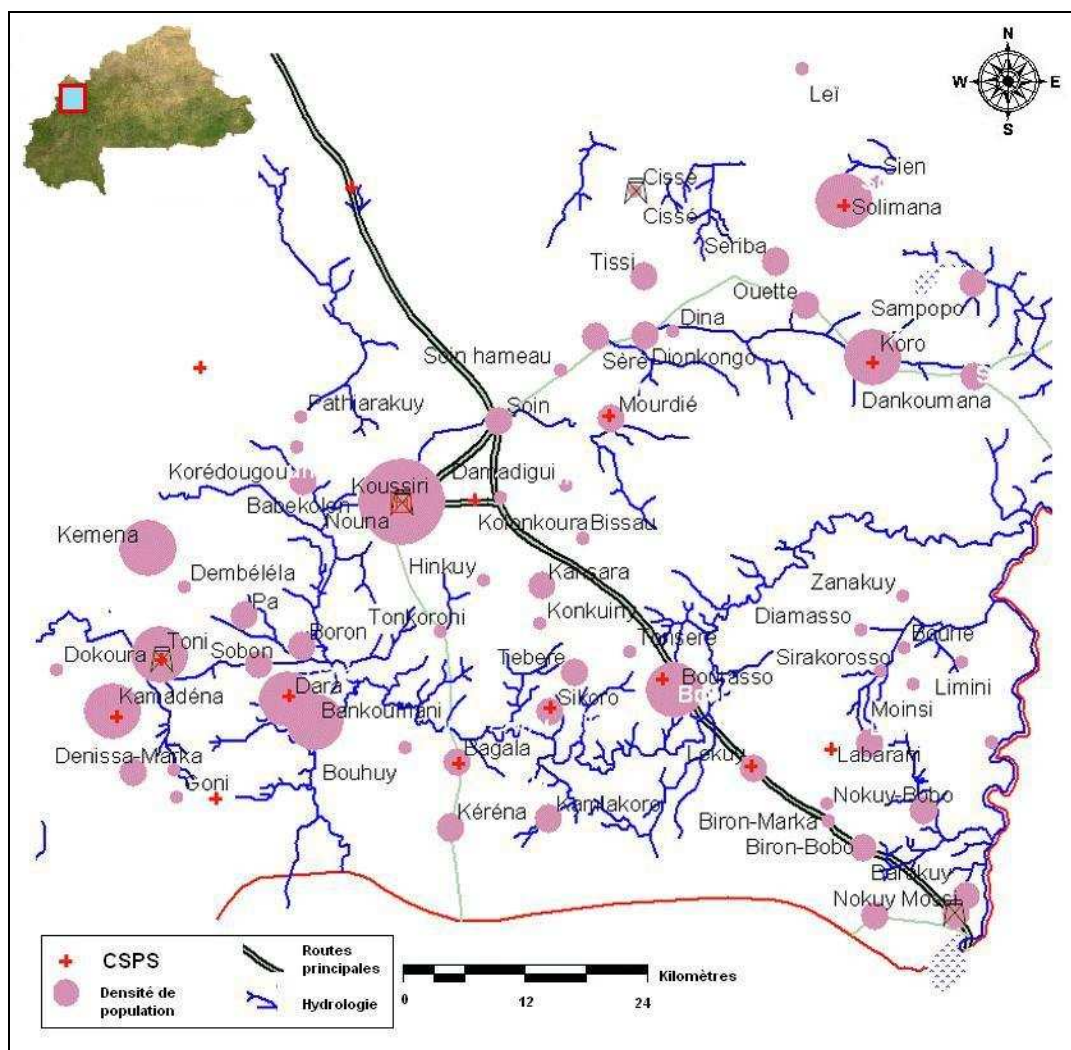


Fig. 1 Région de Nouna au Nord-Ouest du Burkina Faso. Villages, routes, hydrographie et densité de population. D'après Système géographique et démographique du CRSN, Nouna, 2009.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 817 mm par an et la température moyenne est de 27.8°C. La zone d'étude est soumise à un climat sahélien avec une mousson d'été (saison des pluies) allant de juin à septembre. De mars à mai, les températures sont plus élevées et peuvent arriver dépasser les 45° pendant les journées, tandis que la pluviométrie et par conséquent la végétation sont au

minimum. La majorité de la population vit en situation d'extrême pauvreté et 27,2 % de la population vit en dessous du seuil de pauvreté fixé à 1\$US par jour (World Bank, 2008). La grande majorité de la population dépend directement de l'agriculture. Les produits pour la nourriture ne peuvent être récoltés que pendant quelques mois et le stockage dans des greniers est contraignant. Le risque de perdre une récolte existe toujours à cause des sécheresses ou des inondations. Comme il n'y a pas d'assurance contre les défaillances économiques de sévères famines peuvent s'ensuivre. Pour la santé une assurance maladie à base communautaire (AMBC) a été fondée et couvre une partie des coûts liés aux maladies. Ce système délivre un potentiel pour diminuer les barrières financières et ainsi améliorer l'accès aux soins de santé et de contribuer ainsi à de meilleurs résultats en terme de santé.

1.2 Gîtes larvaires des anophèles, les différents écosystèmes de la zone potentiels producteurs d'anophèles, le classement des villages à risque

La prévalence de l'anophèle, vecteur du paludisme, en dehors de la saison pluvieuse est très rare en raison de la faible occurrence des gîtes larvaires. Pendant la saison sèche, il n'y a presque pas de gîtes larvaires excepté dans les zones où l'eau est pérenne (près des fleuves, dans les puits etc.). La situation palustre dans la région dépend plus des précipitations que des différences de températures, l'eau étant le facteur limitant pour le développement des moustiques. Par conséquent, la présence d'eau dans l'environnement, relié aux différents types de couverture du sol, peut être utilisée comme un indicateur du risque palustre. De plus, certains types d'occupation du sol sont plus favorables que d'autres à l'apparition et au maintien des moustiques et de leurs larves et donc à l'émergence potentielle de la maladie. Ainsi, le type d'occupation du sol et en particulier sa répartition spatiale ainsi que la qualité de l'eau de surface, jouent un rôle important pour estimer le risque palustre dans des régions rurales.

Dans une étude réalisée en 2008 (Dambach et al., 2009) la répartition géographique de l'occupation du sol a été étudiée pour estimer le risque environnemental palustre d'une trentaine de villages de la région. Une étude bibliographique sur la présence des anophèles dans différents types d'occupation du sol a été réalisée. Ainsi, un risque environnemental palustre a pu être identifié pour différents types d'occupation du sol. Chaque classe d'occupation du sol est ainsi classée en fonction de son risque d'être un habitat potentiel (gîtes larvaires) et donc producteur de moustiques. Une carte d'occupation du sol de la zone d'étude a ensuite été établie à partir de la classification supervisée d'une image haute résolution spatiale du satellite SPOT-5. Cette carte a permis d'identifier les types d'occupation du sol en présence et d'y associer un risque environnemental palustre. Quatre niveaux de risque, de faible à très fort ont été retenus (Fig. 1).

N°	Land cover classes	Risk level
1	sandy soil	Low
2	bare soil, laterite	Low
3	dry vegetation	Low
4	housings	Medium
5	wood-bush	Medium
6	crop field	High
7	water turbid	High
8	wet rice field	very high
9	herb-soil-submerged	very high
10	water with vegetation cover	very high

Fig. 2 : Classes d'occupation du sol et niveaux de risque associés

Des zones tampons ont été construites autour des 30 villages, choisis à la base pour leur répartition dans différentes régions écologiques, et dans chacune de ces zones le pourcentage de chaque classe de risque a été calculé. A partir de la distance de vol moyenne des anophèles (Costantini et al., 1996; Ejercito and Urbino, 1951), la zone tampon a été établie à 500 mètres autour des villages. Cette

zone tampon représente le bassin versant pour le vecteur. Pour chaque village, le risque de prévalence du vecteur dans l'environnement a été calculé en fonction des types d'occupation du sol présents dans la zone tampon (Minakawa et al., 1999; Munga et al., 2005; Mutuku et al., 2009). Pour les 30 villages inclus dans le système de surveillance démographique, la surface des occupations du sol à très fort risque (champ de riz immergé, étendues d'eau couvertes de végétation, zones d'herbe submergées) et fort risque (champs avec sol argileux, eau turbide) a été calculée dans chaque zone tampon. Le pourcentage des classes à risque élevé (à très haut risque + à haut risque) varie d'un facteur de presque 20 entre les villages (Fig. 3).

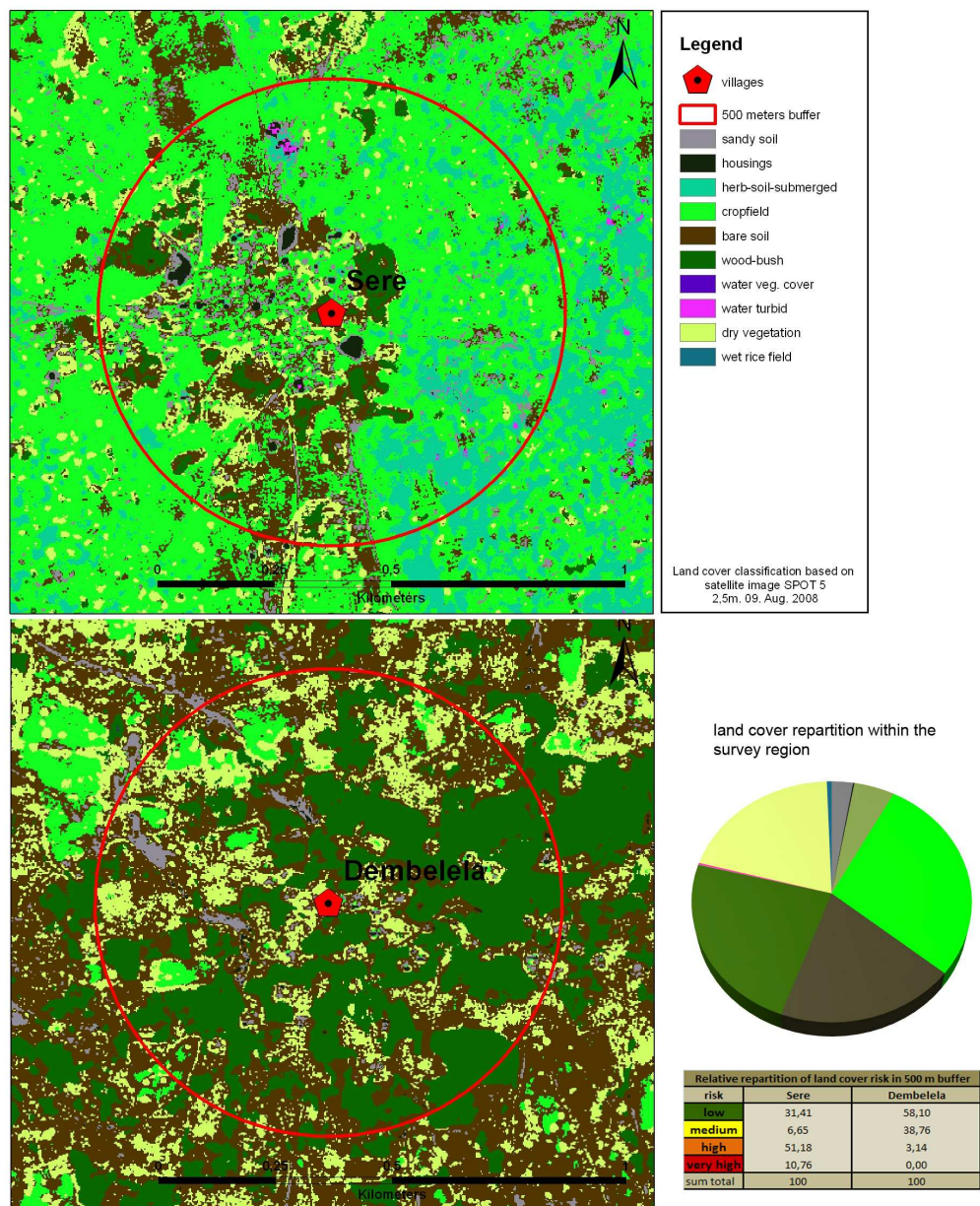


Fig. 3 Répartition de l'occupation du sol dans les zones tampon de 500 mètres autour des villages de Sere (risque le plus fort avec plus de 60%) et Dembelela (risque le plus faible avec près de 3%).

Les pourcentages de couvertures du sol à haut et très haut risque dans la zone tampon de chaque village ont été comparés (Fig. 3). L'analyse de ces pourcentage a permis de classer les villages en deux catégories (Fig 4) :

- Villages à faible risque palustre avec moins de 25 % de la zone tampon propice à l'apparition de gîtes larvaires,

- Villages à fort risque palustre avec plus de 25 % de la zone tampon propice à l'apparition de gîtes larvaires.

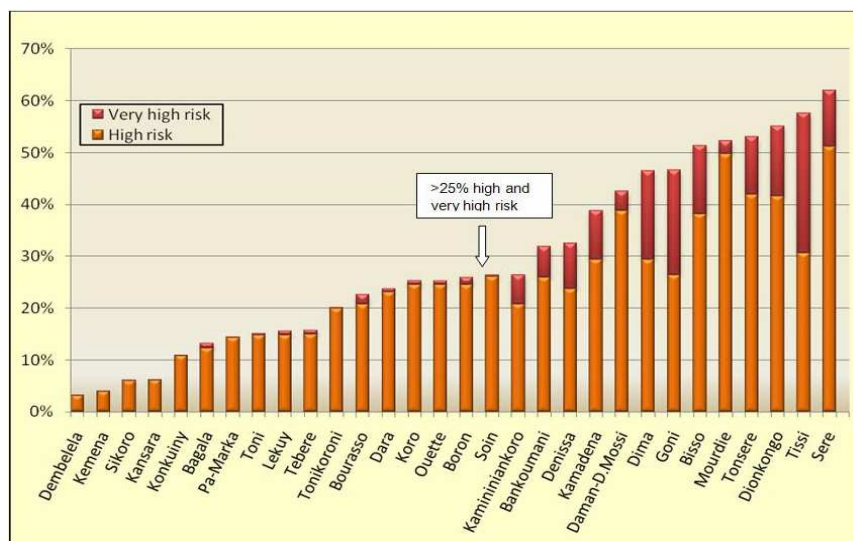


Fig. 4 : Pourcentage d'occupation du sol dans les zones tampons des villages de la zone d'étude présentant un risque environnemental palustre élevé

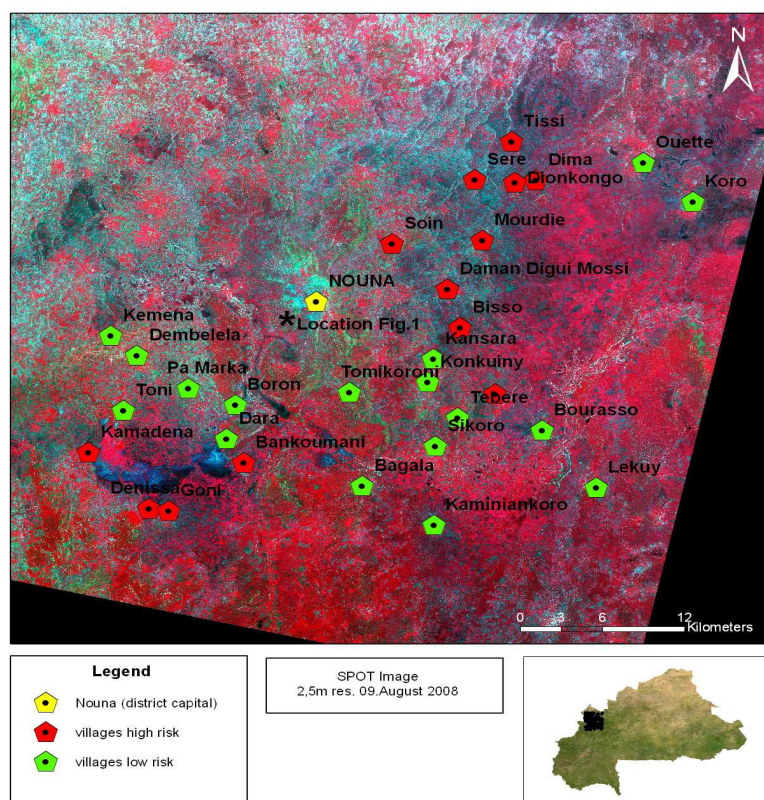


Fig. 5 : Représentation des villages à fort (en rouge) et faible (en vert) risque environnemental palustre dans la zone d'étude de Nouna sur fond d'image satellite Spot 5

Les sites expérimentaux de la future étude (villages avec leur zone tampon) seront choisis en se basant sur la présente classification.

1.3 Les bases de données disponibles à Nouna

Des enquêtes démographiques du système de surveillance démographique (DSS «Demographic Surveillance System») sont régulièrement conduites dans les 59 villages du DSS par le centre de Recherche en Santé de Nouna (CRSN), un organisme dépendant du ministère de la santé, pour rassembler des données démographiques et de santé sur une zone d'approximativement 1775 km² couvrant 76.000 ménages. Le centre fait partie d'un réseau international de surveillance démographique qui évalue en continu les tendances démographiques des personnes vivant dans ce secteur. Une autre source valable d'information est l'enquête ménage du district sanitaire de Nouna (NHDHS), qui a été établie dans le but de faciliter le développement de l'assurance maladie à base communautaire (AMBC) et une politique sanitaire nationale efficace. L'échantillon de l'enquête NHDHS est composé de 988 ménages répartis dans 41 villages et la ville de Nouna pour une population totale d'environ 16.000 individus (Souares et al., 2010; Wurthwein et al., 2001).

L'hôpital de Nouna sert de centre de référence pour les 35 centres de santé périphériques (Centre de Santé et de Promotion Sociale : CSPS) du district sanitaire et couvre une population d'environ 200.000 habitants. Les services de l'hôpital sont : la petite chirurgie, la médecine interne, la pédiatrie, la maternité, l'ophtalmologie, etc. Le nouveau service de laboratoire du CRSN a été intégré dans l'hôpital de district de Nouna en 2005.

Dix stations météorologiques équipées d'appareils de mesure « Digital Dataloggers » (THIES Datalogger, Meteolog TDL 14) sont réparties dans la région selon les types écologiques et couvrent toute la superficie du district sanitaire : c'est l'observatoire météorologique du CRSN, fonctionnelle depuis 2002. Les stations ont été donc placées à proximité des zones où les moustiques peuvent se nourrir et ont été installées à côté de villages (distance moyenne de 100 mètres), à l'exception d'une seule placée à 2.5 km pour des raisons écologiques particulières. Une unité météorologique se compose de trois capteurs (la température, l'humidité relative et les précipitations). Les deux premiers sont combinés en capteur hygro-thermique et le second est isolé à au moins 2.5 mètres des autres à une hauteur de 1.2 mètre du sol. La fréquence moyenne d'enregistrement est de 10 minutes, de même que celle des cumuls. Ce qui confère donc au SIG du CRSN une base longitudinale de données météorologiques très détaillées, données toutefois calibrées en rapport avec celles de la station synoptique de Dédougou (station nationale) située à 57 km.

Le Centre à travers sa section SIG et Cartographie dispose d'une base géoréférencée de toutes les Concessions (Ménages) de son aire de recherche. C'est une base érigée en trois étapes conformément aux étapes d'agrandissement de son entité géographique. De nos jours, l'indexation géographique concerne environ 74 000 ménages et cette base est mise à jour régulièrement compte tenu du dynamisme spatio-temporel des populations. Ainsi, pour toute approche de Ménage et ou de concession, toute approche qualitative et ou quantitative en rapport avec l'espace est spatialement analysable.

1.4 L'approche conceptuelle

La carte de risque présentée précédemment (Cf. Fig. 4) a été établie par analogie avec des données bibliographiques sur la présence de gîtes larvaires d'anophèles dans d'autres régions. Dix villages couvrant les différentes catégories de risque définis précédemment seront choisis pour réaliser la campagne de mesure (Dambach et al., 2009).

A partir de ce constat, l'approche conceptuelle suivante est proposée :

- réaliser une campagne de mesures in situ (entomologiques, météorologiques, occupation du sol etc.) dans la zone tampon de chaque village retenu pour l'étude. L'objectif de cette étape est de mieux comprendre les mécanismes d'apparition, de maintien et de production des gîtes (Yé 2005).
- mieux comprendre les mécanismes d'apparition, de maintien et de production des gîtes larvaires.
- mesurer l'agressivité des anophèles à l'intérieur des mêmes villages afin d'appréhender la relation hôtes vecteurs, avec des pièges lumineux et une pulvérisation de pyréthrinoides.

- produire une nouvelle carte de risque environnemental palustre validée par les mesures de terrain. Cette carte représente le risque potentiel de présence de gîtes larvaires autour de chacun des villages.
- produire une carte d'exposition de la population aux piqûres d'anophèles pour chaque village de l'étude en couplant les données sur le risque environnemental et les mesures in situ d'agressivité.

2. Etude de l'impact du climat sur la prévision du risque

Une relation existe entre la variabilité de la pluviométrie au Sahel, donc à Nouna, et la production et la dynamique des gîtes larvaires. Ceci semble particulièrement vrai dans les zones tampons autour des villages où la vulnérabilité de la population est maximum. L'agressivité des vecteurs dans les villages références est aussi fonction des écozones et surtout de la dynamique des gîtes. Comme expliqué précédemment, les facteurs déterminants dans l'élaboration des cartes de risque sont la pluviométrie et sa variabilité spatio-temporelle. Or, la variabilité naturelle et le changement climatique vont modifier les régimes pluviométriques à différentes échelles spatio-temporelles, du saisonnier à la basse fréquence (quasi-décennale à multi-décennale) en passant par le quasi-biennal à l'interannuel (Tourre et al. 2010). La variabilité de la dynamique des écozones associés devrait donc modifier la dynamique des gîtes larvaires et l'agressivité des vecteurs au niveau des villages. Par conséquent, on peut s'attendre à une variabilité des risques épidémiologiques du paludisme associé à la variabilité de l'environnement et des écosystèmes à proximité des villages. C'est ainsi que l'on va considérer trois échelles temporelles du climat et leurs liens possibles avec la variabilité pluviométrique (il est évident que des interactions et modulations existent entre ces échelles). Cette approche devrait permettre de comprendre le maintien potentiel de gîtes larvaires entre deux saisons, ainsi que leur déficit et/ou réactivation. Cette méthode de travail devrait déboucher sur une stratégie d'adaptation en intervenant à des moments clefs (système d'alertes précoces) au niveau des gîtes eux-mêmes.

2.1 Echelle régionale du changement climatique

Le modèle global couplé d'ARPEGE-Climat (METEO-France/CNRM) a une composante atmosphérique d'une résolution spatiale variable avec une maille de 70 km sur l'Afrique de l'Ouest. Dans le cadre de la régionalisation climatique à partir des derniers scénarios du GIEC, ce modèle permet d'effectuer une désagrégation au niveau régional. Les données sont obtenues à partir de 4 simulations couplées océan-atmosphère basse résolution (300 km) sur la période 1950-2100 (les forçages radiatifs sont ceux observés pour la période 1950-2000, et recommandés par le scénario A1B pour la période 2000-2100). Les simulations à partir du modèle ARPEGE-Climat sont utilisées en configuration dites « médias » (c.à.d, disponible et compréhensible par toutes les parties prenantes).

Les tendances pluviométriques dans la région du Sahel pourront donc être évaluées (Spagnoli et al. 2002). Ces simulations très récentes seront mises à disposition de ce projet (séries quotidiennes ou mensuelles de quelques paramètres météorologiques sur l'Afrique sur une période de 150 ans) et doivent permettre d'évaluer les impacts du changement climatique (y compris les incertitudes) sur le paramètre pluviométrie.

2.2 Du quasi-biennal aux basses fréquences, en passant par l'interannuel

Les conditions thermiques de l'Océan Atlantique, la variabilité spatio-temporelle du climat sur le bassin Atlantique et les liens avec les régimes pluviométriques (comprenant la variabilité du positionnement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) seront étudiés. Les phases des signaux basses fréquences directement liées à la position de la ZCIT (signal quasi-décennal, OQD ou 8-14 ans, et multi-décennal, OAM ou périodes d'au moins 40 ans vont avoir un rôle prépondérant sur l'agressivité des vecteurs du paludisme à moyen et long termes. Par exemple, une phase positive/négative de l'oscillation Atlantique multi-décennale (OAM) pourra être liée à une augmentation/diminution des pluies au Sahel (Tourre et al. 2006 ; Paz et al. 2008). Cette variabilité pourra être modulée par l'OQD comme cela a été le cas de la fin des années 60s au milieu des années 90s, période de la dernière sécheresse Sahélienne (Fig. 6, et Tourre et al. 2010). Cette variabilité naturelle se situe dans un contexte de changement climatique sur lequel vient se superposer la variabilité saisonnière. Les risques épidémiologiques devraient donc être directement impactés par toutes ces interactions.

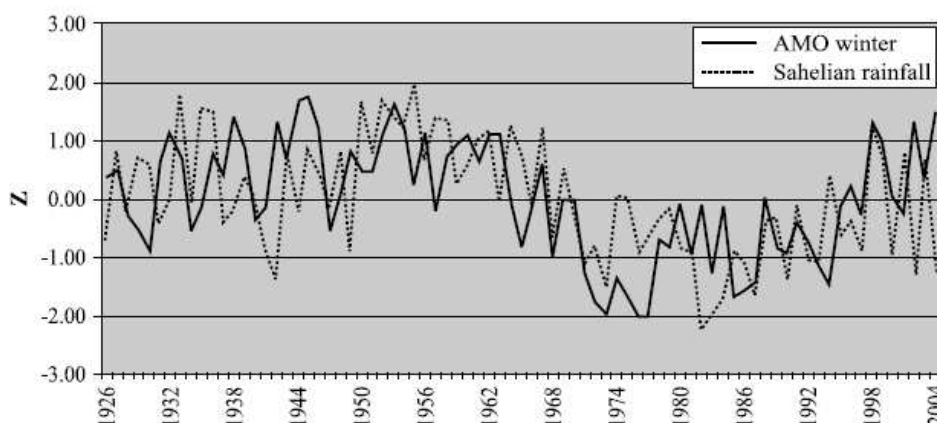


Fig. 6: Courbes des anomalies de température de l'océan Atlantique nord en hiver (ligne noire) et celle des pluies au Sahel de 1926 à 2004 (obtenues à l'université de Washington, ligne pointillée). On note la période de pluies supérieures à la normale pendant la phase positive de l'AMO et la grande période de sécheresse liée à la phase négative de l'AMO du milieu des années 1960 au milieu des années 1990, le tout modulé par le signal quasi décennal comme par exemple en 1970, 1979.

2.3 Echelle saisonnière

On entend par prévision saisonnière la probabilité de quantité de pluie pendant la mousson d'été (cumulée sur trois mois) et présentée sous forme de terciles (pourcentage de pluie normale, au-dessus ou au-dessous de la normale). Les risques (aléas + vulnérabilité) pourront donc être appréhendés en fonction des différentes échelles climatiques, y compris à l'échelle de la saison. Les produits climatiques saisonniers feront partie d'une panoplie de moyens qui permettront d'alimenter les systèmes d'alertes précoces (SAP) par les services d'information de santé publique. Les produits saisonniers seront aussi évalués à partir du réseau de stations météorologiques automatiques dans la région de Nouna qui a déjà 10 ans d'existence.

L'étude de l'impact du climat sur la prévision du risque sera donc effectuée à 3 échelles :

- l'échelle régionale suivant les scénarios du GIEC caractérisant le changement anthropique
- l'échelle temporelle basses fréquences (du quasi-décennal au multi-décennal) caractérisant la variabilité naturelle du climat
- l'échelle saisonnière caractérisant le fonctionnement intra-annuel du système de production des vecteurs du paludisme.

3. Utilisation des cartes de risque pour une meilleure prévention du paludisme : stratégie d'adaptation

Des modèles statistiques ont été employés pour examiner les associations entre le temps, les vecteurs et le paludisme (Hay et al., 2002; Kleinschmidt et al., 2001; Randolph and Rogers, 2000; Rogers et al., 2002). Cependant, il y a toujours un besoin de pouvoir prévoir l'impact des conditions changeantes sur l'occurrence du paludisme chez l'homme (Ye, 2005). Par conséquent, la modélisation utilisant des outils tels que les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection (RS) peuvent être importants pour des stratégies d'adaptation. Les cartes de risque issues de cette modélisation peuvent apporter une information utile quant à l'identification des secteurs géographiques à haut risque et mettre en évidence les variables environnementales les plus importantes pour la transmission du paludisme (Ye, 2005). Cette approche de modélisation spatiale du risque est une bonne manière de mieux comprendre les interactions entre les facteurs environnementaux et leur impact global sur le risque de paludisme (Ye et al., 2007).

Les SIG peuvent intégrer différents types d'information concernant le paludisme notamment les facteurs environnementaux, l'infrastructure et la démographie (Booman et al., 2003; Carter et al., 2000; Craig et al., 1999; Hassan et al., 2003; Hay et al., 2002; Kitron et al., 1994; Omumbo et al., 1998; Schellenberg et al., 1998; van der Hoek et al., 2003). En outre, les résultats de différents

scénarios de risque de paludisme chez les populations peuvent être utilisés pour développer des programmes d'interventions ciblées (Carter et al., 2000). Précédemment, des systèmes de surveillance basés sur des outils SIG ont été employés pour détecter précocement des cas de paludisme localisés permettant ainsi la mise en place rapide et efficace de mesures de contrôle (Kitron et al. 1994).

Dans ce contexte, les images satellites apportent des informations qui ne concernent pas directement les agents pathogènes (virus, bactéries, parasite etc.) responsables de la maladie, mais plutôt leur environnement (données géographiques, météorologiques, hydrologiques etc.). L'apport de l'imagerie satellitaire est de permettre la mesure des facteurs climatiques et/ou environnementaux favorables (ou non) à l'apparition de ces maladies infectieuses. Ainsi, l'imagerie satellitaire ainsi que les systèmes d'information géographique ont été utilisés pour étudier la distribution des moustiques autour de Delhi, en se basant sur la densité de moustiques (adulte et larvaire), les surfaces en végétation et en eau (Shukla et al., 2001; Srivastava et al., 1997). D'autres études ont également utilisé de tels outils pour examiner l'impact du caractère saisonnier (Hay et al., 1998; Thomson et al., 1999).

Ces cartes sont importantes pour extrapoler et donc prévoir le risque de la maladie dans des régions où les données ne sont pas toujours disponibles. Ceci est particulièrement adapté au cas du paludisme au Burkina Faso. L'intensité de transmission est marquée par de fortes variations locales. De ce fait, comprendre les conditions environnementales locales favorisant l'apparition des cas de paludisme est important. L'identification précise des zones de risque dépend, donc de la bonne connaissance des facteurs environnementaux et climatiques qui régissent la transmission du paludisme (Yé 2005, Craig et al. 1999). Dans la région de la Kossi au Burkina Faso, par exemple, des études ont prouvé que des fluctuations holo-endémiques et saisonnières affectent l'intensité de transmission du paludisme (Traoré 2003). De plus, il a été montré que l'intensité de transmission pouvait varier fortement entre les différents villages de l'étude suggérant ainsi que la composition de l'environnement local en terme d'occupation du sol (par exemple proximité ou non des fleuves) pouvait modifier le risque de transmission du paludisme dans ces zones (Traoré 2003). Néanmoins, peu d'efforts ont été faits pour explorer cette voie (Yé 2005).

Une base de données référencée spatialement et contenant toute les informations pertinentes servira de point de départ pour la collecte ultérieure des données et l'analyse. Cet élément spatial permet d'organiser par thème des couches d'information séparées (par exemple, les densités de population de certaines espèces, secteurs d'inondation, type de plante et de végétation, zones de maladies humaines) qui peuvent alors être analysées et montrées dans un contexte défini par l'utilisateur. La base de données sera utilisée pour la prévision temporelle et spatiale des activités de contrôle appropriées, basées sur des corrélations entre l'occurrence spatiale des événements déclencheurs pour le développement larvaire (par exemple, augmentation du niveau des eaux, secteurs d'inondation, données météorologiques locales, emplacements larvaires potentiels, et les résultats des enquêtes terrain). De plus la base de donnée servira à la préparation des cartes opérationnelles pour améliorer la logistique, pour calculer les quantités de matériaux et de main d'œuvre, pour calculer la durée et les coûts de traitements, pour l'enregistrement des gîtes larvaires antérieurs et les attributs liées à la prévision de l'emplacement des gîtes larvaires pour permettre la prévision de futurs gîtes suite à des événements déclencheurs. Des données GPS supporteront les activités de terrain et leur documentation numérique. Pour le travail de terrain des cartes thématiques précises, des graphiques et des tableaux peuvent être rapidement générées et imprimées à partir de la base de données et permettre ainsi une communication efficace entre le personnel gérant la base et les personnes sur le terrain. Les cartes de risque produites doivent être transformées dans une forme compréhensible pour les techniciens qui appliqueront les larvicides sur le terrain. Sur la base de ces cartes, qui vont montrer des marigots, des zones inondées, des rizières, le technicien sur le terrain sera capable de répandre la toxine.

La conception de la stratégie d'intervention est basée sur des conditions climatiques, la dynamique de la population de moustique, le taux de migration des moustiques, l'effet à long terme des produits (ordre des retraitements) et les phases de la transmission des parasites. L'intervention elle-même emploiera le *Bacille israelensis de thuringiensis* (Bti) et le *Bacille sphaericus* 2362 (Bsph) en tant qu'agents de bio-contrôle ne nuisant pas à l'environnement et limitant efficacement le développement des phases larvaires du moustique. L'avantage de ces agents est qu'ils n'affectent pas les organismes non-cibles et sont sûrs pour l'utilisateur. De nouvelles sous-espèces de *B. thuringiensis*

ont prouvé être fortement toxique pour les larves de la plupart des espèces de moustiques et les larves de mouches noires (*Simuliidae*).

De nouvelles sous-espèces de *B. sphaericus*, comme l'espèce 2362 isolée dans une mouche noire adulte au Nigéria (Weiser, 1984) sont beaucoup plus efficaces que les premiers isolats et sont particulièrement efficaces contre les larves de *Culex* et d'*An. gambiae*. Le potentiel élevé de BspH comme agent bactérien de contrôle tient à l'étendue de son efficacité et à sa capacité à persister dans la nature sous certaines conditions ce qui permet un contrôle à long terme (Becker, 2003; Becker and Ludwig, 1993). La durée entre les traitements peut être prolongée et les coûts de personnel sont ainsi réduits. Ces deux agents microbiens de contrôle ont été développés avec l'appui de l'industrie, des universités, et d'organismes nationaux et internationaux tels que le WHO. Après des essais d'inocuité et des études d'incidences sur l'environnement, les bacilles ont été utilisés. Les propriétés intéressantes de ces agents résident dans le fait qu'ils peuvent être produits facilement en série, qu'ils ont une grande efficacité, qu'ils ne nuisent pas à l'environnement, qu'ils sont faciles à manipuler, stables une fois stockés, rentables, et appropriés aux programmes de gestion intégrés basés sur la participation de la communauté. En outre, les coûts pour le développement et l'enregistrement de ces agents (US\$ 500.000) sont largement inférieurs à ceux des insecticides chimiques conventionnels (US\$ 20 millions). Le risque de résistance quand Bti est employé est de beaucoup inférieur à celui des insecticides conventionnels.

Les stratégies efficaces et rapides de lutte contre le paludisme se fondent sur le dépistage précoce et le traitement, soulignant ainsi l'importance d'identifier les zones à risque et les populations en danger. Dans ce contexte, les cartes de risque représentent un nouvel outil d'aide à la prise de décision pour les acteurs de la santé en matière de lutte paludique (Sauerborn and Karam 2000). Dans le cadre de ce projet, une étude sur les stratégies d'adaptation face au risque paludique sera conduite et l'apport des cartes de risque obtenues selon l'approche conceptuelle précédemment décrite sera évalué.

Projets ou collaborations conduits par les demandeurs sur le même sujet, notamment dans le contexte européen

Collaboration entre l'Université de Heidelberg et le Centre de Recherche en Santé de Nouna (CRSN).

Une collaboration existe entre les deux instituts depuis des années avec pour axe principal la compréhension et la lutte contre les maladies infectieuses. Ci-dessous un bref aperçu :

- **Projet Modélisation du risque palustre** : réalisé sur une cohorte prospective de 867 enfants âgés de 6 à 59 mois et recrutés par sélection aléatoire de ménages à partir de la population de 3 villages (Goni, Cissé and Kodougou) et de la ville de Nouna. Une détection active des cas de paludisme a été faite et des variables d'exposition telles que les facteurs météorologiques (température, précipitation, et humidité relative), la couverture du sol, et le nombre de piqure de moustiques ont été évaluées localement.
- **Projet Morbidité et biomasse** : étude considérant la part de morbidité due à la combustion de biomasse pour l'usage domestique. La charge de morbidité exprimée en DALYs a été calculée à partir de la mortalité prématurée (exprimée en années de vie perdues, YLL) et des années vécues avec une morbidité (YLD). Des charges de morbidité ont été établies localement pour 20 états de santé dans 7 communautés dans la région de Nouna. La part de la morbidité attribuable à la combustion de biomasse fut calculée et la fraction attribuable à la charge des infections respiratoires chez les enfants de moins de 5 ans exposés à la combustion de biomasse fut estimée.
- **Projet Cartes de risques palustre** : Construction de cartes de risque pour le paludisme dans une zone Soudano-Sahélienne au Nord-Ouest de Burkina Faso. Risque environnemental sur la base des cartes de l'occupation du sol.

- Projet Biomasse et paludisme : étude cas-contrôle à Nouna Burkina Faso liant l'exposition à la fumée provenant de la combustion de biomasse et le risque palustre au niveau domestique. Les facteurs considérés incluaient l'habitat, le comportement des personnes, la présence de moustiques, la concentration de particules (PM₁₀) et de monoxyde de carbone.
- Projet intervention à base communautaire pour le traitement du paludisme : Evaluation par un essai randomisé de l'efficacité du traitement par chloroquine (CQ) administrée par les mères et supporté par les leaders des groupements féminins. Mesure de l'efficacité *in vivo* de la CQ
- Projet sur les performances des agents de santé : évaluation de la qualité des performances des personnels de santé concernant le diagnostic et le traitement des accès palustres. Evaluation de l'auto-médication par la chloroquine (CQ) avant et après consultation au poste de santé.

Collaboration entre le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et Météo-France.

Les partenaires participent actuellement à plusieurs projets sur l'étude des maladies infectieuses dont la liste est donnée ci-après :

- Projet MATE (Monitoreo Argentino de Tele-Epidemiologia) : projet ayant pour objectif l'étude de la dengue en Argentine en collaboration avec l'agence spatiale argentine (CONAE)
- Projet PALUSAT : projet ayant pour objectif l'étude du paludisme urbain à Dakar, réalisé en collaboration avec l'Institut de Médecine Tropicale du Service de Santé des Armées (IMTSSA)
- Projet AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine), où le Centre de Suivi Ecologique, l'Institut Pasteur de Dakar, la DIREL et le CNES participent au WP 3.4 (*Health Impacts*)
- GICC-AdaptFVR (Impacts du changement climatique sur l'émergence des vecteurs de la fièvre de la vallée du Rift au Sénégal : adaptation et stratégie pour une meilleure gestion du pastoralisme au Sahel) en collaboration avec le CSE, la DSV, l'Institut Pasteur de Dakar et Météo-France

Plan de recherche détaillé

Objectifs généraux

Le projet Paluclim propose d'étudier l'impact de la variabilité du climat sur le risque vectoriel première étape biologique du risque palustre et d'en analyser les conséquences sur les prévisions du risque.

Les principaux objectifs sont les suivants :

- produire et valider des cartes de risque environnemental palustre et des cartes dynamiques des risques d'exposition de la population des villages ruraux aux piqûres des anophèles, vecteurs du paludisme,
- évaluer la part anthropique du risque vectoriel en recensant les pratiques humaines qui favorisent la création de gîtes larvaires (rizières inondées, briqueterie....)
- étudier l'impact de la variabilité du climat (du saisonnier jusqu'aux basses fréquences, comprenant les tendances et les changements climatiques) sur la prévision des risques
- étudier l'efficacité des stratégies de lutte anti-larvaire comme adaptation aux risques paludiques

Ce projet est organisé en six tâches détaillées ci-après :

Tâche 1 : coordination du projet

Le Centre National d'Etudes Spatiales assurera la **coordination du projet**.

(i) Il organisera les réunions et ateliers thématiques inhérents au projet :

- le kick-off meeting (à Nouna au Burkina Faso)
- la réunion d'avancement intermédiaire à Heidelberg, Allemagne
- la réunion finale de restitution à Paris, France

(ii) Il assurera aussi la collecte des informations nécessaires à la rédaction des rapports intermédiaire et final.

Les missions inhérentes aux événements cités ci-dessus seront organisées et prises en charge par le CNES, elles se détaillent comme suit :

- pour le kick-off meeting, il est prévu une mission pour 6 personnes à Nouna (Burkina Faso) pour un budget total de 15k€.
- pour la réunion intermédiaire, il est prévu une mission pour 5 personnes à Heidelberg (Allemagne) pour un budget total de 7k€
- pour la réunion de restitution, il est prévu une mission pour 3 personnes à Paris (France) pour un budget total de 4k€

Tâche	HD	CRSN	CNES	MetéoF	IRBA
1. Coordination			+		
2. Collecte et traitement des mesures in-situ	+	+			+
3. Production et validation des cartes dynamiques de risque	+		+		
4. Etude du risque en fonction de la variabilité spatio-temporelle du climat				+	
5. Stratégie d'adaptation au risque paludique	+ (public health & zoology)	+			+
6. Valorisation	+	+	+	+	+

Fig. 7 : Distribution des expertises entre les partenaires.

De plus, un comité scientifique sera mis en place. Il aura un rôle décisionnaire dans la mise en place, le suivi et le contrôle des différentes phases du projet afin de s'assurer que tous les objectifs décrits dans le projet soient atteints.

Ce comité sera composé comme suit :

- Rainer Sauerborn (Université d'Heidelberg) en tant que Président
- Cécile Vignolles (CNES),
- Norbert Becker (Université d'Heidelberg),
- Yves Tourre (Météo-France) ,
- Ali Sié (CRSN),
- Christophe Rogier (IRBA).

Ce comité pourra être complété par d'autres experts si nécessaire.

Tâche 2 : Collecte et traitement des mesures in-situ

1. Données environnementales

Mesures entomologiques de terrain

La campagne de mesures entomologiques aura pour but d'identifier les différentes espèces de moustiques du genre *Anophèles*, leur abondance et leur taux d'infection par le parasite du paludisme. Des moustiques seront capturés en utilisant les deux méthodes décrites ci-dessous. Les captures seront réalisées mensuellement pendant la saison des pluies, de juin à octobre 2011.

Capture par pièges lumineux

Des pièges lumineux du *Center for Disease Control* (CDC) (Model 512, John W. Hock Company, Gainesville, Floride) avec ampoules incandescentes seront employés pour capturer les moustiques dans les chambres à coucher des ménages choisis dans les villages d'étude. Chaque piège se compose d'une lumière et d'un ventilateur actionnés par une batterie rechargeable qui attire les moustiques dans un sac de collecte en nylon.

Le piège sera suspendu au-dessus du sol, près du lit des participants mais en dehors des moustiquaires si celles-ci sont utilisées. Les participants seront encouragés à maintenir leurs moyens quotidiens habituels de lutte contre les moustiques. Des techniciens du Centre de Nouna, expérimentés en entomologie, viendront dans chaque habitation (vers 18h) pour installer le piège lumineux et pour le brancher. À minuit approximativement, les techniciens changeront la batterie. Le matin suivant (vers 06h), ils récupéreront le piège et les moustiques capturés. Les sacs de collecte seront alors transportés au CRSN où les moustiques seront stockés dans les récipients adéquats étiquetés. La date et l'heure de début et de fin de capture seront enregistrées. Les moustiques capturés seront alors comptés et l'espèce sera identifiée par examen morphologique.

Collecte de la faune matinale résiduelle par pulvérisation de pyréthrinoides

La collecte de la faune matinale résiduelle par pulvérisation de pyréthrinoides sera également réalisée dans la même chambre à coucher après la collecte par piège lumineux, car toutes les populations de moustiques ne sont pas attirées par les pièges lumineux. Des draps blancs seront fixés sur les planchers et un insecticide localement disponible sera appliqué aux murs, aux meubles et au toit approximativement une minute après la fermeture des portes et des fenêtres. Après 15 minutes, les techniciens retourneront dans la pièce et récupéreront les draps avec les moustiques qui y seront tombés. Les moustiques seront alors stockés dans des récipients adéquats datés et ils seront transportés au laboratoire du CRSN. La date et l'heure de début et de fin de capture seront enregistrées. Les moustiques capturés seront comptés et identifiés.

Les résultats de ces captures permettront de connaître l'agressivité anophélienne selon les villages, c'est-à-dire le nombre de piqûres d'anophèles reçues par la population humaine par unité de temps (en général, par nuit).

Un échantillon de moustiques collectés selon les 2 types de capture sera envoyé au Centre National de Recherche et de Formation sur le Paludisme à Ouagadougou (CNRFP) afin de réaliser une analyse entomologique plus poussée. Les moustiques seront analysés par la technique ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay) afin d'obtenir le taux de moustiques infectés par le parasite du paludisme. Ceci permettra d'établir les taux d'inoculation entomologique pour chaque village (TIE), c'est à dire le nombre de piqûres infectées reçues par la population humaine, par unité de temps.

Collecte des larves / paramètres hydrauliques

Comme la présence et la densité des larves sont fonction de la taille d'un gîte les deux paramètres peuvent à être analysés selon la même procédure. Les différents types d'habitats nécessitent différentes techniques de capture des larves. Pour les grandes étendues d'eau que l'on peut voir directement par satellite, on procède à des échantillonnages ponctuels. Les agrégations non homogènes des micro-habitats demandent la construction d'une zone caractéristique. Cette nouvelle

idée travaille avec la construction d'une zone de par exemple 200x200 mètres au moins et compter la surface en eau dans cette zone et déterminer le nombre relatif des larves pour chaque micro-habitat. Les zones vont être visitées plusieurs fois pour connaître la dynamique temporelle de chaque type de gîte. Ça va permettre de calculer un nombre moyen pour la présence des larves dans la période de l'observation. Les paramètres à mesurer sont la température, le pH, la conductivité, la turbidité et ceux qui influencent la qualité d'un gîte pour la reproduction des larves comme les algues, les prédateurs etc. La densité larvaire va être mesurée avec une louche utilisée de façon standardisée. Les habitats plus larges avec une répartition non homogène des larves demandent une collection de larves à plusieurs endroits. La turbidité va être mesurée avec un appareil dérivé du principe du disque-Secchi. Ça va permettre de mesurer aussi dans des eaux assez profondes. De plus, des plantes, des algues et des prédateurs sont à saisir. Les autres paramètres comme la couleur, la pollution et l'ombrage sont inclus dans la description des habitats. Les données saisies pendant le travail au terrain permettront une attribution d'un prévalence caractéristique des larves aux paramètres environnementaux distinguables par satellite.

2. Données climatiques

Des données climatiques dont la pluviométrie, la température, la direction et la vitesse du vent, l'humidité, l'ensoleillement sont mesurées de façon permanente au moyen de dix stations météorologiques qui se trouvent à Nouna et dans différents villages. La répartition de ces stations prend en compte la variabilité des différentes écozones concernant leur climat, leur proximité aux cours d'eau etc. Les données sont collectées une fois par mois dans chaque station météorologique. La résolution temporelle des paramètres mesurés est très haute avec plusieurs mesures par heure.

3. Données socio-économiques

Le CRSN dispose d'une grande base de données socioéconomiques. Depuis une dizaine d'années des données sur l'économie, la santé et le niveau de vie des individus et des ménages sont collectés. Ces données incluent les cas de maladie, l'affiliation à l'assurance maladie à la base communautaire (AMBC), les naissances, mariages, décès etc. Comme expliqué sous le point 1.3 les données socioéconomiques sont récoltées constamment au niveau du DSS, CSPS, et de NHDHS (enquête ménage), par conséquent une collecte supplémentaire n'est pas nécessaire. Pour cette étude l'utilisation de la densité de la population va permettre d'obtenir une vue d'ensemble du risque. Pour de futures études l'ensemble des données collectées au niveau du CRSN permettront d'effectuer des analyses plus détaillées.

Tâche 3 : Production et validation des cartes dynamiques de risque

L'analyse des mesures in situ autour des villages expérimentaux de la zone d'étude va permettre d'acquérir une meilleure compréhension des mécanismes d'émergence, de transmission et de propagation du paludisme. A partir de cette connaissance des principaux mécanismes en jeu, deux types de cartes vont être produites :

1. Cartes de risque environnemental palustre dynamique

Rappelons que la carte de risque environnemental palustre représente le risque potentiel de présence de gîtes larvaires dans un périmètre de 500 mètres autour des villages, cette distance correspondant au rayon de vol des Anophèles.

Les résultats attendus de cette campagne de mesures sont notamment une meilleure connaissance du fonctionnement et de la dynamique des gîtes larvaires présents dans les zones tampon (500m) autour des 10 villages de l'étude.

L'étude de la présence de gîtes larvaires en fonction du type d'occupation du sol autour des 10 villages de l'étude va permettre de mettre à jour le niveau de risque associé à chaque type d'occupation du sol établi lors de l'étude 2008 dans cette région (voir 1.2).

L'analyse des 10 villages servira d'apprentissage pour analyser tous les villages de la zone d'étude. La méthodologie présentée au 1.2 sera ensuite appliquée à tous les villages de la zone d'étude afin d'obtenir une carte de risque environnemental palustre sur l'ensemble de notre zone d'étude.

Ainsi, une nouvelle cartographie de l'occupation du sol de la zone d'étude sera établie à partir de la classification supervisée d'images haute résolution spatiale du satellite SPOT-5. Cette carte permettra

d'identifier les types d'occupation du sol en présence et d'y associer un risque environnemental palustre. L'analyse ensuite de la couverture de l'occupation du sol dans la zone tampon autour des villages permettra de classer les villages selon les 2 catégories définies précédemment à savoir "village à faible risque palustre", "village à fort risque palustre". Cette classification donnera la possibilité de mettre en place des contre-mesures dirigées de façon à réduire les coûts d'intervention.

Une analyse de l'évolution de l'occupation du sol et la dynamique des gîtes en fonction de la distribution des pluies sera aussi réalisée afin d'accéder à un risque dynamique. Pendant une même année plusieurs cartes de risque seront réalisées et permettront une distinction entre des zones en risque pas seulement par selon le lieu mais aussi en fonction du temps. Alors que certaines régions sont déjà touchées par le risque palustre au début de la saison pluvieuse, d'autres ont besoin plus des précipitations pour faire fonction de gîte environnemental. Ces cartes dynamiques permettront de prédire l'apparition du risque de façon temporelle et de mettre en place des mesures adaptés au moment nécessaire.

2. Carte d'exposition de la population aux piqûres d'anophèles

L'obtention de la carte d'exposition de la population aux piqûres d'anophèles repose sur le couplage des données sur le risque environnemental, les mesures in situ de l'agressivité des vecteurs du paludisme (nombre de piqûres d'anophèles femelles/ individu / nuit) et les cartes sur la distribution de la population disponible dans le système d'information démographique-géographique du CRSN.

Ainsi, un autre résultat attendu de la campagne de mesures in situ est une meilleure connaissance de l'agressivité des anophèles dans les 10 villages de l'étude.

Il s'agira ensuite d'établir la relation entre la production des gîtes larvaires et l'agressivité des moustiques dans les villages.

A partir de cette relation, des cartes de risque d'exposition de la population aux piqûres d'anophèles seront réalisées en tenant compte de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol autour des villages, différents niveaux de risque d'exposition, de faible à très fort seront retenus.

L'analyse des 10 villages servira ici aussi d'exemple pour l'analyse de tous les villages de la zone d'étude.

Les cartes de risque vont être validées par des mesures de la présence du vecteur dans l'environnement. Les captures des Anophèles adultes avec différentes méthodes (voir 3) vont permettre de lier le risque modelé sur la base des images satellites et la prévalence des larves avec le risque effectif dans les villages.

Tâche 4 : Etude du risque en fonction de la variabilité spatio-temporelle du climat

Pour bien évaluer les risques de présence des gîtes larvaires et des vecteurs du paludisme, une interprétation des produits de type climat va être nécessaire. Jusqu'à présent, on s'était contenté de prévision saisonnière des pluies (qualitative ou non). Ce qui est important ici n'est pas l'événement pluvieux mais plutôt la distribution des pluies sur une à deux semaines pour comprendre la dynamique des gîtes larvaires et l'agressivité des vecteurs dans les villages voisins, mais avec des écosystèmes différents. Ceci pourra être accompli en utilisant les produits probabilistes (51 runs) en ligne sur la prévision mensuelle issue du Centre Européen de Prévision (CEPMMT) en complément des prévisions saisonnières.

Cette tâche 4 visera également à analyser les trois échelles de temps (saison, interannuel, changement climatique). Les scénarios développés par le CNRM pour l'étude des impacts des changements climatiques à l'échelle régionale seront utilisés dans le cadre de ce projet pour fournir des données désagrégées et des informations statistiques pour le Burkina Faso).

Ce travail sera suivi conjointement par le CNRM et la Direction de la Climatologie pour éviter des duplications inutiles et bénéficier de tout l'environnement de production de Météo-France (documentation, supervision, etc.). Il est aussi envisagé d'utiliser les produits sur les tendances pluviométriques à partir de la version la plus récente d'ARPEGE-Climat (v4) et d'avoir des simulations régionales non biaisées.

- **Echelle mensuelle et saisonnière.** Le travail va d'abord consister à fournir des prévisions saisonnières pour le Sahel et le Burkina Faso en particulier à partir du programme EUROSIP¹, dans lequel participent Météo-France (CNRM et la Division de la Climatologie), le UK Met-Office et le Centre Européen (ECMWF). Ainsi à partir de 41 simulations du climat par les trois centres du projet EUROSIP, des produits ayant subi un traitement probabilistique par le Centre Européen seront produits. Une première prévision saisonnière pour la pluviométrie sera réalisée pour les mois de juin-juillet-août suivants. Des paramètres physiques d'humidité et des prévisions probabilistes sous forme de quantiles (en %) et pour des anomalies de quantité de pluie seront disponibles. Les sorties du modèle numérique sont sur une grille de 2.5x2.5 degrés avec une climatologie testée sur les 30 dernières années. De plus, les champs météorologiques pourront être accessibles à des échelles temporelles plus fines (jusqu'à 6 heures) à partir de la banque de données d'EUROSIP. Certains produits ont aussi été utilisés avec succès dans le cadre des ateliers PRESAO en Afrique de l'Ouest. Les produits de la prévision mensuelle seront utilisés en complément de la prévision saisonnière pour préciser la probabilité de précipitation sur les quatre prochaines semaines mais aussi en tant qu'outil de post processing pour sélectionner les scénarios de prévision saisonnière dont les premières échéances sont compatibles avec la prévision mensuelle. Les différents traitements seront menés en cohérence avec les développements en cours pour l'ACMAD (African Centre For Meteorological Application for Development) et viseront à être réutilisables sur d'autres territoires (DOM, Métropole).
- **Echelle régionale du changement climatique.** Le changement climatique sera évalué à partir d'ARPEGE-Climat (v4) utilisé pour 3 scénarios du GIEC (A1B, A2, B2) désagregés à partir de 2 méthodes statistiques de descente d'échelle (quantile/quantiles et types de temps). Des cartes de prévisions et tendances de la pluviométrie sur le Sahel incluant la composante anthropogénique, seront émises pour les prochaines 150 années, y compris avec les incertitudes associées.
- **Du quasi-biennal aux basses fréquences, en passant par l'interannuel.** La contribution de la variabilité pluviométrique naturelle quasi-biennale, interannuelle et basses fréquences (type OAM et OQD) feront l'objet d'une étude en parallèle dans le domaine des fréquences (continuation des travaux de Tourre et al., 2010). Une partie conjointe avec celle de la variabilité du couvert végétal (à partir du NDVI) pour les 20 dernières années, sera développée en suivant le modèle de Jarlan et al. (2005).
- **Analyse des données.** Un bulletin saisonnier sera réalisé comprenant les prévisions mensuelles et saisonnières sur la fréquence de distribution des pluies au Burkina Faso. En dehors du produit à l'échelle mensuelle et saisonnière qui fournira l'outil amont qui pourra être inclus dans un système opérationnel, les tendances climatiques seront analysées. Ainsi, une étude permettra d'estimer l'impact de la variabilité du climat aux différentes échelles spatio-temporelles (changement climatique anthropique, du quasi-biennal aux basses fréquences en passant par l'interannuel, c'est à dire influence de l'ENSO global) et sur la distribution des écosystèmes en fonction de données hydro-météorologique de surface. Tous les résultats de cette tâche seront communiqués au responsable des tâches 5 et 6 sur la stratégie d'adaptation et la valorisation des produits et méthodes.

Tâche 5 : Stratégie d'adaptation au risque paludique

Un des buts de ce projet est de favoriser le développement de stratégies de santé publique et environnementales locales d'adaptation pour la réduction du risque de paludisme. Globalement, le paludisme est un problème majeur ; cependant, sa transmission est en grande partie déterminée par des conditions locales (Yé 2005). De ce fait la connaissance des facteurs environnementaux locaux est une partie essentielle pour les stratégies visant la réduction des risques. Comme suggéré par Yé (2005), le développement des outils de prévision et de détection précoce peut être une partie d'une stratégie complète pour aborder cette question.

¹ Programme EUROSIP : <http://cosmos.enes.org/uploads/media/TStockdale.pdf>

Tout d'abord, des modèles peuvent être employés en tant que systèmes de détection précoce pour la mise en œuvre de précautions et de mesures adéquates (Teklehaimanot et al., 2004). La préparation des centres de santé de référence pour faire face à un plus grand nombre de cas de paludisme, l'instauration de la détection active et la délivrance des traitements appropriés peuvent être des manières efficaces de réduire la morbidité et la mortalité due au paludisme. Deuxièmement, la modélisation contribue à une meilleure compréhension de la transmission de paludisme et des facteurs environnementaux importants, en particulier à l'échelle locale (Yé 2005). Troisièmement, cartographier permet d'identifier les zones à risques particuliers de paludisme et les facteurs de risque environnementaux significatifs. Quatrièmement, des cartes de risque peuvent également être employées pour identifier des régions où l'éducation sanitaire est nécessaire pour réduire les gîtes larvaires créés par l'activité humaine. Finalement, les cartes et modèles peuvent servir à évaluer les mesures environnementales locales et les effets de l'incidence du paludisme.

Plus spécifiquement, les cartes de risque palustre peuvent être utilisées pour produire des programmes de contrôle de vecteur efficaces par exemple par applications périodiques d'insecticide sur des gîtes larvaires ciblés. La composante temporelle des modèles en association avec les cartes de risque produites par ce projet sera également importante pour identifier le moment propice pour de telles interventions, un élément primordial pour le contrôle des vecteurs. Par exemple, des études antérieures ayant prouvé que la transmission de paludisme est relativement basse pendant la saison sèche dans cette région, il apparaît que les efforts d'adaptation seront plus efficaces pendant la saison des pluies (Yé 2005). Cependant, l'irrégularité des facteurs climatiques tels que les précipitations, la température, le vent, l'humidité et autres peut considérablement influencer l'efficacité de telles interventions. Les facteurs environnementaux peuvent également avoir un impact significatif sur le développement larvaire des moustiques responsable du paludisme (Yé 2005). En conséquence, les cartes de risque peuvent être un outil rentable et précis pour aider à identifier de façon optimale où et quand entreprendre des interventions de contrôle larvaire.

D'excellents résultats ont été obtenus en appliquant les agents microbiens de contrôle basés sur *Bacille israelensis* de *thuringiensis* (Bti) et *Bacille sphaericus* (Bsph) pour le contrôle larvaire, en Europe, Australie, Amérique sans nuire à l'environnement (Becker, et al. 2003). L'efficacité contre les moustiques et la sûreté environnementale sont parmi les caractéristiques les plus remarquables de ces méthodes. Les applications à grande échelle de Bti et de Bsph sont en cours dans quelques régions de l'Afrique (Fillinger, et al. 2003, 2004). Dans ce projet, les experts locaux et internationaux mettront en place un programme de gestion intégré du paludisme comprenant les agents microbiens de contrôle (Bti et Bsph) pour réduire la mortalité et la morbidité paludéennes en réduisant les populations de vecteur. Les gîtes larvaires seront également éliminés dans la mesure du possible par altération physique des points d'eau provisoires par drainage et/ou remplissage. Les approches environnementales de contrôle visent à modifier l'environnement pour priver la population du vecteur cible de ses conditions de survie (principalement se reproduire, se reposer et s'alimenter). Il s'agit de réduire le contact humain-vecteur et rendre les conditions moins favorables à la transmission de la maladie.

1) Intervention de santé publique à court terme

Les cartes de risque développées au cours de ce projet visent à reconnaître les zones à haut risque identifiées grâce aux paramètres environnementaux et qui peuvent prédire la distribution et la densité des gîtes larvaires des Anophèles. Il s'agit ici de développer et de tester une intervention en santé publique originale pour le contrôle du paludisme en s'attaquant à l'état larvaire du développement du moustique. L'intervention se concentrera sur les zones qui ont été identifiées comme zones à haut risque de transmission.

Design de l'étude:

Etape 1. Identification des zones potentiellement occupées par des moustiques (ZPOMs)² et à haute densité de population humaine

Les cartes de zone à risque larvaire seront superposées aux cartes de densité de population pour identifier les zones à haut risque environnemental où il y a une densité élevée de population. Cela sera possible grâce au système de surveillance démographique du CRSN qui est associé à une cartographie détaillée par SIG.

Etape 2. Unités d'échantillonnage

Parmi les zones d'intersection entre les zones à haut risque, similaires aux Z-POMs (Tourre et al. 2008) et les foyers de population (généralement les villages ou secteurs de la ville de Nouna), 5 unités d'intervention et 5 unités contrôle seront sélectionnées.

Etape 3. Préparation des interventions larvicides

La première année Norbert Becker effectuera une étude préparatoire pour optimiser la préparation du BTI et les quantités nécessaires par surface à traiter. Pendant la saison sèche de la deuxième année le personnel de terrain sera recruté et formé, les images satellite seront converties en cartes opérationnelles locales qui pourront être comprises et utilisées par les équipes sanitaires. En réponse à la quantité de pluie et à sa distribution dans le temps durant la saison des pluies de la deuxième année, le personnel de terrain traitera tous les points d'eau dans les zones d'intervention.

Etape 4. Evaluation entomologique

Les moustiques adultes seront capturés à intervalle régulier par piège lumineux et collectés après pulvérisation et seront comptés pour comparaison entre les zones d'intervention et les zones contrôle. Le taux d'inoculation entomologique sera calculé et comparé. Cette mesure sera la valeur de référence de l'étude.

Etape 5. Analyse statistique

Une analyse statistique en bonne et due forme sera effectuée suivant les méthodes appropriées.

2) Intervention de santé publique contre le paludisme à long terme

Des prévisions de risque paludique à moyen et long terme seront générées au niveau spatial et temporel dans la zone d'étude. Ces informations seront présentées dans un document pour décisions politiques et dans un atelier où des représentants du Ministère de la Santé et du district seront conviés. Le rôle de l'équipe de recherche sera d'aider à l'interprétation des résultats et à leur utilisation dans la planification d'interventions. L'idée maîtresse est d'utiliser la télédétection pour prévoir les zones de distribution du paludisme et de contribuer au contrôle du paludisme en ajoutant une approche larvicide aux mesures de contrôle actuelles. Les résultats de la recherche pourront être utilisés au niveau du district et du Ministère de la Santé pour prendre des décisions d'intervention.

Tâche 6 : Valorisation

Les produits développés à l'occasion de ces travaux feront l'objet d'une valorisation :

- par la diffusion de l'information auprès des utilisateurs locaux, par le biais des acteurs de la santé publique qui mettent en place les politiques de gestion de la santé vétérinaire et animale ainsi que par l'African Centre of Meteorological Application for Development (ACHMAD) et le programme CLIM/Dev/Africa pour les analyses climatiques (prévision saisonnière, changement climatique) liées au risque.

² ZPOM = Zone potentiellement occupées par les moustiques

- par le biais de publications,
- par l'organisation de colloques et /ou de journées thématiques,
- en mettant à disposition de la communauté scientifique les résultats de ces travaux (bulletins de campagne et bulletin spécial climat) sur le site Internet d'information sur les maladies ré-émergentes RedGems (<http://www.redgems.org/>)
- par une rétro-information des résultats aux participants à l'étude et également aux autorités sanitaires (district médical, Ministère de la santé)

Le site d'information RedGems. Ce site Internet a pour objectif d'être l'interface entre différentes équipes travaillant sur un même projet. Mais, c'est aussi un outil de communication vers l'extérieur. L'internaute peut y chercher des informations par mots clefs ou par thème : nom des maladies, localisation géographique, utilisation des techniques spatiales, enjeux climatiques et environnementaux, ou encore par le nom d'un projet. De nombreux liens permettent de passer d'un thème à l'autre, et d'approfondir le sujet.

Pour chaque projet intégré dans ce site, trois articles de bases sont créés décrivant les objectifs et déroulement du projet, les partenaires, et le lien avec l'utilisation des outils spatiaux. D'autre part, chaque projet dispose systématiquement de deux rubriques sur :

- les premiers résultats et publications,
- les sites expérimentaux, avec les métadonnées des différents acteurs.

Ponctuellement peuvent être ajoutés des résultats, images satellites et autres documents que les membres du projet souhaitent partager.

Sous la responsabilité du Cnes, ces différentes actions de valorisation sur ce support se feront en collaboration avec les différents acteurs de ce projet.

Résultats attendus

Les livrables suivants seront fournis :

- Rapport intermédiaire comprenant les résultats de l'analyse de la campagne de mesures in situ ainsi que l'analyse de la prévision climatique saisonnière,
- Cartes de risque environnemental palustre,
- Cartes d'exposition de la population aux piqûres d'anophèles,
- Rapport final comprenant les résultats de l'étude sur les stratégies d'adaptation au risque paludique et les résultats l'étude de l'impact du climat sur la prévision du risque,
- Rapport sur la portabilité du système intégré sur le territoire Métropolitain, les DOM-TOM et les centres de production locaux.

Expérience et moyens des équipes dans le domaine considéré.

Université de Heidelberg, Institut de Santé Publique

L'Institut de Santé Publique (<http://www.klinikum.uni-heidelberg.de/Institute-of-Public-Health>) (antérieurement appelé : Département d'Hygiène Tropicale et de Santé Publique) est impliqué depuis 20 ans dans la recherche sur le paludisme, ceci sur plusieurs angles : 1) le développement et la validation de nouveaux médicaments antipalustres par des essais cliniques (Muller et al., 2004), 2) l'efficacité et l'effectivité de différentes politiques à base communautaire pour la distribution des moustiquaires imprégnées (Muller et al., 2008b), 3) la qualité de la prise en charge du paludisme par les infirmiers (Pfeiffer et al., 2008b; Sauerborn et al., 1991), 4) l'auto-médication et les comportements d'adhésion des populations aux traitements prescrits (Souares et al., 2009), 5) la modélisation de la transmission en incluant dans le modèle des variables météorologiques mesurées de façon continue (Ye, 2005), et finalement 6) l'utilisation d'images satellitaires pour la détection des zones à haut risque de transmission du paludisme (Dambach et al. 2009). Nous avons par ailleurs une longue collaboration avec le groupe du Prof. Norbert Becker à l'Institut de Zoologie, qui a développé et évalué scientifiquement une nouvelle stratégie de lutte anti-larvaire en utilisant des formulations basées sur le bacille *Thurengensis israeliensis* (BTI) (Becker, 2003; Becker and Ludwig, 1993).

L'équipe de l'institut est composée d'épidémiologistes, de biostatisticiens, d'économistes et de médecins de santé publique. Le premier axe de recherche porte sur la mesure du fardeau des maladies, utilisant principalement les données des systèmes de surveillance démographique (Becher et al., 2008). Le second axe de recherche étudie les facteurs liés à la qualité des soins et l'accès aux soins des patients (Sauerborn et al., 1991) et l'impact d'interventions visant à renforcer la prise en charge des patients et leur accès à des soins de qualité. .

Références bibliographiques :

Dambach P, Sié A, Lacaux JP, Vignolles C, Machault V, Sauerborn R. (2009). Using high spatial resolution remote sensing for risk mapping of malaria occurrence in the Nouna district, Burkina Faso. *Glob Health Action*. 11;2.

Müller O, De Allegri M, Becher H, Tiendrebogo J, Beiersmann C, Ye M, Kouyate B, Sie A, Jahn A. (2008). Distribution systems of insecticide-treated bed nets for malaria control in rural Burkina Faso: cluster-randomized controlled trial. *PLoS One*. 3(9): e3182.

Müller O, Traoré C, Kouyaté B, Yé Y, Frey C, Coulibaly B, Becher H. (2006). Effects of insecticide-treated bednets during early infancy in an African area of intense malaria transmission: a randomized controlled trial. *Bull World Health Organ*. 84(2):120-6.

Ramroth H, Ndugwa RP, Müller O, Yé Y, Sié A, Kouyaté B, Becher H. (2009). Decreasing childhood mortality and increasing proportion of malaria deaths in rural Burkina Faso. *Glob Health Action*. 15;2.

Yamamoto, S., V. R. Louis, A. Sie, and R. Sauerborn, 2010, Household risk factors for clinical malaria in a semi-urban area of Burkina Faso: a case-control study: *Trans.R.Soc.Trop.Med.Hyg.*, v. 104, no. 1, p. 61-65.

Le Centre national d'études spatiales (CNES)

Depuis plusieurs années, le Centre national d'études spatiales (CNES) (<http://www.cnes.fr/web/CNES-en/7114-home-cnes.php>) souhaite promouvoir et démocratiser l'utilisation des outils spatiaux. Cette volonté se traduit par son soutien au développement d'applications utilisant des techniques spatiales pour répondre à des besoins sociétaux. C'est ainsi que des projets mettant les outils spatiaux au service de la santé publique ont vu le jour dans de nouveaux domaines comme ceux de la téléconsultation, la télé-éducation, ou encore la télé-épidémiologie.

Le CNES assurera la **coordination du projet**.

(i) Il organisera les réunions et ateliers thématiques inhérents au projet :

- le kick-off meeting à Nouna, Burkina Faso
- la réunion d'avancement intermédiaire à Heidelberg, Allemagne
- la réunion finale de restitution à Paris, France

(ii) Il assurera aussi la collecte des informations nécessaires à la rédaction des rapports intermédiaire et final.

De part son expertise en télé-épidémiologie, le CNES apportera une assistance en ce qui concerne la **production** des cartes de risque en liaison avec l'analyse des données issues de la campagne de terrain.

Le CNES participera comme l'ensemble des partenaires à la valorisation des résultats de cette étude (notamment via le site Internet d'information sur les maladies ré-émergentes RedGems).

Références bibliographiques :

Tourre, Y. M., Lacaux, J-P., Güell, A., Sabatier, P., and Braak, L. (2008). Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health Health and Climate, Series: *Advances in Global Change Research* , Vol. 30 , Thomson, Madeleine C.; Garcia-Herrera, Ricardo; Beniston, Martin (Eds.) chapter 10.

Tourre, Y. M., Lacaux, J-P., Vignolles, C., Ndione, J-A., and Lafaye, M. (2008). Mapping Zones Potentially Occupied by Mosquitoes (ZPOMs) *Aedes vexans* and *Culex poicilipes*, the Main Vectors of Rift Valley Fever in Senegal. Accepted in *Journal of Geospatial Health*.

Lacaux, J-P., Tourre, Y.M., Vignolles, C., Ndione, J-A., and Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106, 66-74.

Tourre, Y. M., Fontannaz, D., Vignolles, C., Ndione, J.A., Lacaux, J-P., and Lafaye, M. (2007). GIS and High-Resolution Remote Sensing Improve Early Warning Planning for Mosquito-Borne Epidemics, *HealthyGIS Newsletter*, ESRI-Summer 2007, 1-3.

Gauthier, H., Lacaux, J-P., Tourre, Y.M., Vignolles, C., Güell, A., Lafaye, M., Sabatier, P., Coiffier, E., et Braak L. (2008). Le système d'information 'RedGems' : Climat, environnement et santé publique. Space Show 08. Space Applications, Toulouse, avril 2008

Vignolles C., J-P. Lacaux, Y. M. Tourre, G. Bigeard, J-A. Ndione, and M. Lafaye, (2009): Rift Valley Fever (RVF) in a Zone Potentially Occupied by *Aedes vexans* in Senegal: Dynamics, Mapping and Risks, *Geospatial Health*, 3(2), 210-220.

Machault, V., L. Gadiaga, C. Vignolles, F. Jarjaval, S. Bouzid, C. Sokhna, J-P. Lacaux, J-F. Trape, C. Rogier and F. Pagès, (2009): Highly focused anopheline breeding sites and malaria transmission in dakar, *Malaria Journal*, 8, 138

Tourre, Y.M., J-P. Lacaux, C. Vignolles, and M. Lafaye, (2009): Climate impacts on environmental risks evaluated from space:

The case of the Rift Valley Fever and its conceptual approach, *Global Health Action*, DOI: 10.3402/gha.v2i0.2053

Météo-France

Météo-France a une grande expertise sur les problèmes liés aux changements climatiques et a participé au GIEC. D'une manière générale, la version la plus récente d'ARPEGE-Climat (v4 développée par Michel Déqué et son équipe du CNRM sera utilisée dans le cadre du GICC pour évaluer les tendances pluviométriques et avoir des simulations régionales non biaisées.

L'action du RETIC « Impact des changements climatiques à l'échelle régionale » pourra fournir dans le cadre du projet des données désagrégées et des informations statistiques au niveau du Burkina Faso (Action RETIC : <http://intra.cnrm.meteo.fr/retic/pg2C.php>).

D'autre part l'expertise de Météo-France se trouve aussi au niveau de l'AVH mis en place au début 2010. L'AVH a un rôle d'études et de conseil, et répond aux demandes faites par les services de DCLIM (Météo-France) où travaille Yves M. Tourre et Jean-Michel Soubeyroux.

L'expertise de DCLIM/BD dirigée par Philippe Dandin et Jean-Pierre Céron permettra d'éviter des duplications inutiles et bénéficier de tout l'environnement BDCLIM (documentation, supervision, etc.).

Références bibliographiques :

Paz, S., Tourre, Y.M, and Brolley, J. (2008). Multi-temporal climate variability over the Atlantic Ocean and Eurasia: Linkages with Mediterranean and West African Climate. *Atmos. Sci. Lett.*, Royal Met. Soc., 9, 196-201.

Tourre, Y. M., Lacaux, J-P., Vignolles, C., Ndione, J-A., and M. Lafaye (2008). Mapping of Zones Potentially Occupied by Mosquitoes (ZPOMs) *Aedes vexans* and *Culex poicripiles*, the Main Vectors of Rift Valley Fever in Senegal. *Journal of Geospatial Health.*, 3, 211-220.

Tourre, Y.M., Jarlan, L., Lacaux, J-P., Rotela, C.H., and Lafaye, M. (2008). Spatio-Temporal Variability of NDVI-Precipitation over Southernmost South-America: Linkages with Climate Signals and Epidemics. *Environmental Research Letters-IOP.*, 3, 044008 (9pp) doi: 10.1088/1748-9326/3/4/044008

Tourre, Y. M., Paz, S., Kushnir, Y., and White, W. B. (2010) Low-frequency climate variability in the Atlantic basin during the 20th century. To appear in *Atmos. Sci. Lett.*, Royal Met. Soc. (Wiley Interscience Publisher, March 2010).

Céron, J-P. (2006). Research Needs for Intraseasonal, Seasonal and Interannual Prediction, including the Application of these Predictions
<http://www.wmo.ch/pages/prog/wcp/ccl/opags/documents/ET3.1TeleconfReportOct2006.pdf>.

Tourre, Y.M., Paz, S., Cassou, C., and Kutiel, K. (2006). Atmospheric dynamics over Northwest Africa and linkages with Sahelian rainfall. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 33, No. 14, L1480810.1029/2006GL026695.

Jarlan, L, Tourre, Y. M., Mougin, E., Philippon, N., and Mazzega, P. (2005). Dominant Patterns of AVHRR NDVI Interannual Variability over the Sahel and Linkages with Key Climate Signals (1982-2003). *Geophys. Res. Lett.*, 32, L04701, doi:10.1029/2004GL021841.

Spagnoli, S., Planton, S., Déqué, M., Mestre, O., and Moisselin, J. M. (2002). Detecting climate change at a regional scale: The case of France. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 90-1,90-4.

Le Centre de Recherche en Santé de Nouna (CRSN)

Les aspects environnementaux de la santé sont de plus en plus reconnus. L'impact du changement climatique et de l'environnement sur la transmission du paludisme fait partie de l'agenda de recherche. Le CRSN (<http://www.crsn-nouna.bf/>) a travaillé sur plusieurs projets de recherche sur les thèmes environnement et climat. Ces projets ont comporté notamment la collecte et l'évaluation de données entomologiques, parasitologiques, météorologiques, épidémiologiques, de population, avec l'utilisation des SIG, de la télédétection, et de cartes de risque. Un choix de publications appropriées est inclus ci-dessous.

Références bibliographiques :

Yé Y, Hoshen M, Kyobutungi C, Louis VR, Sauerborn R. (2009). Local scale prediction of Plasmodium falciparum malaria transmission in an endemic region using temperature and rainfall. *Glob Health Action.* 11;2.

Zoungana A, Coulibaly B, Sié A, Walter-Sack I, Mockenhaupt FP, Kouyaté B, Schirmer RH, Klose C, Mansmann U, Meissner P, Müller O. (2008). Safety and efficacy of methylene blue combined with artesunate or amodiaquine for uncomplicated falciparum malaria: a randomized controlled trial from Burkina Faso. *PLoS One*. 3(2).

Kouyaté B, Sie A, Yé M, De Allegri M, Müller O. (2007). The great failure of malaria control in Africa: a district perspective from Burkina Faso. *PLoS Med*. 4(6):e127.

Yé Y, Louis VR, Simboro S, Sauerborn R. (2007). Effect of meteorological factors on clinical malaria risk among children: an assessment using village-based meteorological stations and community-based parasitological survey. *BMC Public Health*. 8;7:101.

Yé Y, Kyobutungi C, Louis VR, Sauerborn R. (2007). Micro-epidemiology of *Plasmodium falciparum* malaria: Is there any difference in transmission risk between neighbouring villages? *Malar J*. 19;6:46.

Yé Y, Hoshen M, Louis V, Séraphin S, Traoré I, Sauerborn R. (2006). Housing conditions and *Plasmodium falciparum* infection: protective effect of iron-sheet roofed houses. *Malaria J*. 1;5:8.

L'Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA)

L'IRBA, Institut de Recherche Biomédicale des Armées, ex-MTSSA (Institut de Médecine tropicale du Service de Santé des Armées).

Fondé en 1905, l'Institut de médecine tropicale du Service de santé des armées (IMTSSA) devenu à présent l'antenne de Marseille de l'IRBA contribue au soutien sanitaire des forces militaires, notamment des 20 000 hommes déployés en opérations extérieures en zone tropicale. Il est situé au Pharo, à Marseille. Il sert de centre d'enseignement, de recherche et d'expertise en médecine tropicale. Il est aussi l'Institut de spécialisation pour les médecins de l'armée de terre. Le centre conduit notamment des études épidémiologiques et entomologiques sur le risque de paludisme et sur la lutte contre cette maladie.

De part son expertise en épidémiologie et entomologie, l'IRBA apportera un appui scientifique et technique tout au long du projet et plus particulièrement pour la réalisation de la tâche 2 « Campagne de mesures et analyse des mesures in situ ». L'IRBA par l'intermédiaire du professeur Christophe Rogier interviendra dans le projet en participant aux différentes réunions du comité scientifique. De part sa grande expérience dans des études similaires, il mettra sa connaissance des mécanismes d'émergence et de transmission du paludisme au service du partenariat notamment pour la mise en œuvre de la stratégie expérimentale entomologique.

Références bibliographiques :

Carnevale P., Robert V., Manguin S., Corbel V., Fontenille D., Garros C. & Rogier C. Les anophèles. Biologie, transmission du *Plasmodium* et lutte antivectorielle. IRD Editions, Marseille, 2009, 391p.

Rogier C, Henry MC, Rowland M, Carnevale P, Chandre F, Corbel V, Curtis C, Hougard JM. [Guidelines for phase III evaluation of vector control methods against malaria]. *Med Trop (Mars)*. 2009;69:173-84.

Rogier C, Henry MC, Luxemburger C. [Methods for the phase IV evaluation of malaria vector control interventions: a case-control study of the effectiveness of long lasting impregnated bed nets after their deployment in Benin]. *Med Trop (Mars)*. 2009;69:195-202.

Orlandi-Pradines E, Rogier C, Koffi B, Jarjaval F, Bell M, Machault V, Pons C, Girod R, Boutin JP, Pages F. Major variations in malaria exposure of travellers in rural areas: an entomological cohort study in western Cote d'Ivoire. *Malar J*. 2009;8.

Machault V, Gadiaga L, Vignolles C, Jarjaval F, Bouzid S, Sokhna C, Lacaux JP, Trape JF, Rogier C, Pages F. Highly focused anopheline breeding sites and malaria transmission in Dakar. *Malar J*. 2009;8.

Baragatti M, Fournet F, Henry MC, Assi S, Ouedraogo H, Rogier C, Salem G. Social and environmental malaria risk factors in urban areas of Ouagadougou, Burkina Faso. *Malar J.* 2009;8.

Pages F, Texier G, Pradines B, Gadiaga L, Machault V, Jarjaval F, Penhoat K, Berger F, Trape JF, Rogier C, Sokhna C. Malaria transmission in Dakar: A two-year survey. *Malar J.* 2008;7.

Machault V, Orlandi-Pradines E, Michel R, Pages F, Texier G, Pradines B, Fusai T, Boutin JP, Rogier C. Remote sensing and malaria risk for military personnel in Africa (Reprinted). *Journal of Travel Medicine.* 2008;15:216-20.

Orlandi-Pradines E, Almeras L, de Senneville LD, Barbe S, Remoue F, Villard C, Cornelié S, Penhoat K, Pascual A, Bourgouin C, Fontenille D, Bonnet J, Corre-Catelin N, Reiter P, Pages F, Laffite D, Boulanger D, Simondon F, Pradines B, Fusai T, Rogier C. Antibody response against saliva antigens of *Anopheles gambiae* and *Aedes aegypti* in travellers in tropical Africa. *Microbes and Infection.* 2007;9:1454-62.

Orlandi-Pradines E, Penhoat K, Durand C, Pons C, Bay C, Pradines B, Fusai T, Josse R, Dubrous P, Meynard JB, Durand JP, Migliani R, Boutin JP, Druilhe P, Rogier C. Antibody responses to several malaria pre-erythrocytic antigens as a marker of malaria exposure among travelers. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene.* 2006;74:979-85.

Girod R, Orlandi-Pradines E, Rogier C, Pages F. Malaria transmission and insecticide resistance of *Anopheles gambiae* (Diptera : Culicidae) in the French military camp of Port-Bouet, Abidjan (Cote d'Ivoire): Implications for vector control. *Journal of Medical Entomology.* 2006;43:1082-7.

Henry MC, Assi SB, Rogier C, Dossou-Yovo J, Chandre F, Guillet P, Carnevale P. Protective efficacy of lambda-cyhalothrin treated nets in *Anopheles gambiae* pyrethroid resistance areas of Cote d'Ivoire. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene.* 2005;73:859-64.

Sissoko MS, Dicko A, Briet OJT, Sissoko M, Sagara I, Keita HD, Sogoba M, Rogier C, Toure YT, Doumbo OK. Malaria incidence in relation to rice cultivation in the irrigated Sahel of Mali. *Acta Tropica.* 2004;89:161-70.

Henry MC, Rogier C, Nzeyimana I, Assi SB, Dossou-Yovo J, Audibert M, Mathonnat J, Keundjian A, Akodo E, Teuscher T, Carnevale P. Inland valley rice production systems and malaria infection and disease in the savannah of Cote d'Ivoire. *Tropical Medicine & International Health.* 2003;8:449-58.

Trape JF, Pison G, Spiegel A, Enel C, Rogier C. Combating malaria in Africa. *Trends in Parasitology.* 2002;18:224-30.

Fontenille D, Lochouart L, Diatta M, Sokhna C, Dia I, Diagne N, Lemasson JJ, Ba K, Tall A, Rogier C, Trape JF. Four years' entomological study of the transmission of seasonal malaria in Senegal and the bionomics of *Anopheles gambiae* and *A. arabiensis*. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene.* 1997;91:647-52.

Fontenille D, Lochouart L, Diagne N, Sokhna C, Lemasson JJ, Diatta M, Konate L, Faye F, Rogier C, Trape JF. High annual and seasonal variations in malaria transmission by anophelines and vector species composition in Dielmo, a holoendemic area in Senegal. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene.* 1997;56:247-53.

Trape JF, Rogier C. Combating malaria morbidity and mortality by reducing transmission. *Parasitology Today.* 1996;12:236-40.

Calendrier prévisionnel

Le projet se déroulera sur 30 mois. Il se décompose en six tâches (T1 à T6) de durée variable comme indiqué dans la figure ci-dessous.

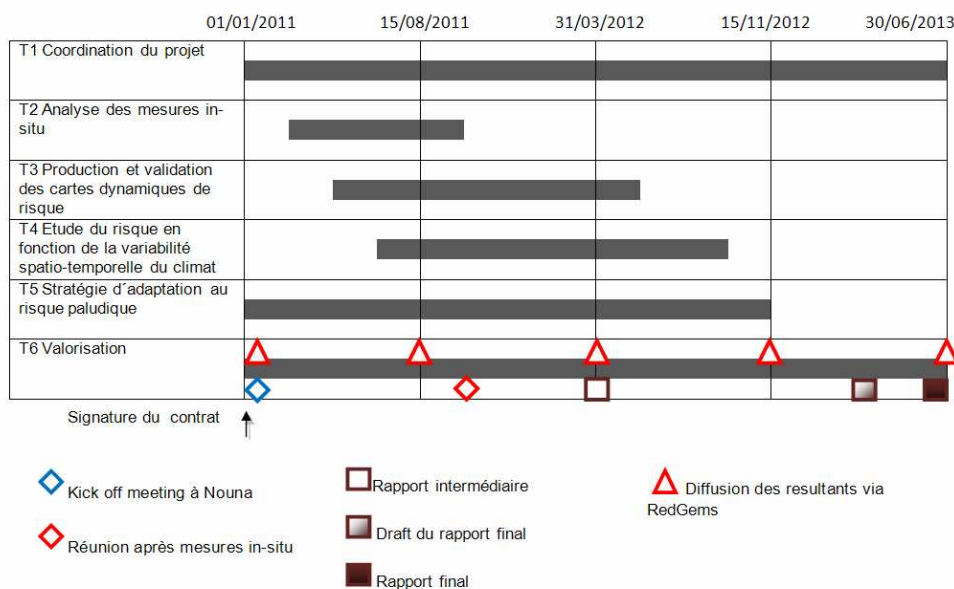


Fig. 8 : Calendrier prévisionnel

Ressources humaines

N°	Responsable	Appartenance	Personnels impliqués	Activité (en %)	Mois-Homme	Tâches
1	Rainer Sauerborn	Université d'Heidelberg	Rainer Sauerborn Olaf Mueller Heiko Becher Hengjin Dong Peter Dambach, Shelby Yamamoto Valérie Louis Norbert Becker	20% 20% 20% 20% 75% 15% 15% 15%	3 0.9 0.9 0.9 22 3 3 5	T2, T3, T5, T6
2	Ali Sié	CRSN	Séraphin Simboro Saidou Ouédraogo François Gonro 2 Enquêteurs 10 Enquêteurs	50% 100% 100% 100% 20%	12 24 24 20 4	T2, T5, T6
3	Cécile Vignolles	CNES	Cécile Vignolles	13%	3.1	T1, T3, T6
4	Michel Dégué	Météo-France	Yves Tourre Michel Dégué J-M Soubeyroux J-P Céron CDD	15% 5% 5% 5% 100%	3 1 1 1 9	T4, T6
TOTAL MOIS-HOMME					140.8	

Budget prévisionnel

Equipe Nature	Dépenses globales (TTC)	Cofinancement (TTC)	Subvention demandée (TTC)
--------------------------------	--------------------------------	----------------------------	----------------------------------

Tâche 1 : Coordination du projet

CNES organisation des réunions / ateliers thématiques Rédaction des rapports	27k€		27k€
TOTAL T1	27k€		27k€

Tâche 2 : Campagne de mesures et analyse des mesures in situ

Université d'Heidelberg personnel matériel et transport	37.5k€ 7.3k€	7.5k€ 1.5k€	30k€ 5.8k€
CRSN personnel matériel et transport	20k€ 10.6k€		20k€ 10.6k€
TOTAL T2	75.4k€	9k€	66.4k€

Tâche 3 : Production et validation des cartes de risque

Université d'Heidelberg Production des cartes de risque	18.8k€	3.8k€	15k€
CNES Assistance et expertise pour la production des cartes	37.5k€	7.5k€	30k€
TOTAL T3	56.3k€	11.3k€	45k€

Tâche 4 : Étude du risque en fonction de la variabilité spatio-temporelle du climat

Météo-France Etude impact du climat Post-Doc (9 mois) Equipement	68k€	23k€	45k€
TOTAL T4	68k€	23k€	45k€

Tâche 5 : Stratégie d'adaptation au risque paludique

Université d'Heidelberg	28.8k€	5.8k€	23k€
CRSN	18k€		18k€
TOTAL T5	46.8k€	5.8k€	41k€

Tâche 6 : Valorisation

Université d'Heidelberg	5k€		5k€
CRSN	5k€		5k€
Météo-France	5k€		5k€
CNES Site RedGems	10k€		10k€
TOTAL T6	25k€		25k€

TOTAL	298.5k€	49.1k€	249.4k€
--------------	----------------	---------------	----------------

ANNEXE 1 : Références bibliographiques

Becher, H., G. Kynast-Wolf, A. Sie, R. Ndugwa, H. Ramroth, B. Kouyate, and O. Muller, 2008, Patterns of malaria: cause-specific and all-cause mortality in a malaria-endemic area of west Africa: *Am.J.Trop.Med.Hyg.*, v. 78, no. 1, p. 106-113.

Becker, N., 2003, Ice granules containing endotoxins of microbial agents for the control of mosquito larvae--a new application technique: *J.Am.Mosq.Control Assoc.*, v. 19, no. 1, p. 63-66.

Becker, N., and M. Ludwig, 1993, Investigations on possible resistance in *Aedes vexans* field populations after a 10-year application of *Bacillus thuringiensis israelensis*: *J.Am.Mosq.Control Assoc.*, v. 9, no. 2, p. 221-224.

Booman, M., B. L. Sharp, C. L. Martin, B. Manjate, J. J. La Grange, and D. N. Durrheim, 2003, Enhancing malaria control using a computerised management system in southern Africa: *Malar.J.*, v. 2, p. 13.

Carter, R., K. N. Mendis, and D. Roberts, 2000, Spatial targeting of interventions against malaria: *Bull.World Health Organ*, v. 78, no. 12, p. 1401-1411.

Costantini, C., S. G. Li, A. DellaTorre, N. Sagnon, M. Coluzzi, and C. E. Taylor, 1996, Density, survival and dispersal of *Anopheles gambiae* complex mosquitoes in a West African Sudan savanna village: *Medical and Veterinary Entomology*, v. 10, no. 3, p. 203-219.

Craig, M. H., R. W. Snow, and D. le Sueur, 1999, A climate-based distribution model of malaria transmission in sub-Saharan Africa: *Parasitology Today*, v. 15, no. 3, p. 105-111.

Dambach, P., A. Sie, J. P. Lacaux, C. Vignolles, V. Machault, and R. Sauerborn, 2009, Using high spatial resolution remote sensing for risk mapping of malaria occurrence in the Nouna district, Burkina Faso: *Glob.Health Action.*, v. 2.

Ejercito, A., and M. Urbino, 1951, Flight range of gravid and newly emerged *Anopheles*: *Bulletin of the World Health Organisation*, no. 3, p. 663-671.

Fillinger, U., B. G. Knols, and N. Becker, 2003, Efficacy and efficiency of new *Bacillus thuringiensis* var *israelensis* and *Bacillus sphaericus* formulations against Afrotropical anophelines in Western Kenya: *Trop.Med.Int.Health*, v. 8, no. 1, p. 37-47.

Fillinger, U., G. Sonye, G. F. Killeen, B. G. Knols, and N. Becker, 2004, The practical importance of permanent and semipermanent habitats for controlling aquatic stages of *Anopheles gambiae* sensu lato mosquitoes: operational observations from a rural town in western Kenya: *Trop.Med.Int.Health*, v. 9, no. 12, p. 1274-1289.

Hassan, A. N., M. A. Kenawy, H. Kamal, A. A. Abdel Sattar, and M. M. Sowilem, 2003, GIS-based prediction of malaria risk in Egypt: *East Mediterr.Health J.*, v. 9, no. 4, p. 548-558.

Hay, S. I., J. Cox, D. J. Rogers, S. E. Randolph, D. I. Stern, G. D. Shanks, M. F. Myers, and R. W. Snow, 2002, Climate change and the resurgence of malaria in the East African highlands: *Nature*, v. 415, no. 6874, p. 905-909.

Hay, S. I., R. W. Snow, and D. J. Rogers, 1998, From predicting mosquito habitat to malaria seasons using remotely sensed data: Practice, problems and perspectives: *Parasitology Today*, v. 14, no. 8, p. 306-313.

- Kitron, U., H. Pener, C. Costin, L. Orshan, Z. Greenberg, and U. Shalom, 1994, Geographic information system in malaria surveillance: mosquito breeding and imported cases in Israel, 1992: *Am.J.Trop.Med.Hyg.*, v. 50, no. 5, p. 550-556.
- Kleinschmidt, I., J. Omumbo, O. Briet, N. van de Giesen, N. Sogoba, N. K. Mensah, P. Windmeijer, M. Moussa, and T. Teuscher, 2001, An empirical malaria distribution map for West Africa: *Trop.Med.Int.Health*, v. 6, no. 10, p. 779-786.
- Minakawa, N., C. M. Mutero, J. I. Githure, J. C. Beier, and G. Y. Yan, 1999, Spatial distribution and habitat characterization of anopheline mosquito larvae in Western Kenya: *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, v. 61, no. 6, p. 1010-1016.
- Muller, O., A. M. De, H. Becher, J. Tiendrebo, C. Beiersmann, M. Ye, B. Kouyate, A. Sie, and A. Jahn, 2008a, Distribution systems of insecticide-treated bed nets for malaria control in rural Burkina Faso: cluster-randomized controlled trial: *PLoS.One.*, v. 3, no. 9, p. e3182.
- Muller, O., A. M. De, H. Becher, J. Tiendrebo, C. Beiersmann, M. Ye, B. Kouyate, A. Sie, and A. Jahn, 2008b, Distribution systems of insecticide-treated bed nets for malaria control in rural Burkina Faso: cluster-randomized controlled trial: *PLoS.One.*, v. 3, no. 9, p. e3182.
- Muller, O., C. Traore, and B. Kouyate, 2004, Efficacy of pyrimethamine-sulfadoxine in young children with uncomplicated falciparum malaria in rural Burkina Faso: *Malar.J.*, v. 3, p. 10.
- Munga, S., N. Minakawa, G. F. Zhou, O. O. J. Barrack, A. K. Githeko, and G. Y. Yan, 2005, Oviposition site preference and egg hatchability of *Anopheles gambiae*: Effects of land cover types: *Journal of Medical Entomology*, v. 42, no. 6, p. 993-997.
- Mutuku, F. M., M. N. Bayoh, A. W. Hightower, J. M. Vulule, J. E. Gimnig, J. M. Mueke, F. A. Amimo, and E. D. Walker, 2009, A supervised land cover classification of a western Kenya lowland endemic for human malaria: associations of land cover with larval *Anopheles* habitats: *Int.J.Health Geogr.*, v. 8, no. 1, p. 19.
- Omumbo, J., J. Ouma, B. Rapuoda, M. H. Craig, S. D. le, and R. W. Snow, 1998, Mapping malaria transmission intensity using geographical information systems (GIS): an example from Kenya: *Ann.Trop.Med.Parasitol.*, v. 92, no. 1, p. 7-21.
- Pfeiffer, K. et al., 2008a, Clinical diagnosis of malaria and the risk of chloroquine self-medication in rural health centres in Burkina Faso: *Trop.Med.Int.Health*, v. 13, no. 3, p. 418-426.
- Pfeiffer, K. et al., 2008b, Clinical diagnosis of malaria and the risk of chloroquine self-medication in rural health centres in Burkina Faso: *Trop.Med.Int.Health*, v. 13, no. 3, p. 418-426.
- Randolph, S. E., and D. J. Rogers, 2000, [Satellite data and disease transmission by vectors: the creation of maps for risk prediction]: *Bull.Soc.Pathol.Exot.*, v. 93, no. 3, p. 207.
- Rogers, D. J., S. E. Randolph, R. W. Snow, and S. I. Hay, 2002, Satellite imagery in the study and forecast of malaria: *Nature*, v. 415, no. 6872, p. 710-715.
- Rydzanicz, K., E. Lonc, and N. Becker, 2009, Current procedures of the integrated urban vector-mosquito control as an example in Cotonou (Benin, West Africa) and Wroclaw area (Poland): *Wiad.Parazytol.*, v. 55, no. 4, p. 335-340.
- Sauerborn, R., D. S. Shepard, M. B. Ettling, U. Brinkmann, A. Nougara, and H. J. Diesfeld, 1991, Estimating the direct and indirect economic costs of malaria in a rural district of Burkina Faso: *Trop.Med.Parasitol.*, v. 42, no. 3, p. 219-223.
- Schellenberg, J. A., J. N. Newell, R. W. Snow, V. Mung'ala, K. Marsh, P. G. Smith, and R. J. Hayes, 1998, An analysis of the geographical distribution of severe malaria in children in Kilifi District, Kenya: *Int.J.Epidemiol.*, v. 27, no. 2, p. 323-329.

- Shukla, R. P., S. N. Sharma, V. K. Kohli, N. Nanda, V. P. Sharma, and S. K. Subbarao, 2001, Dynamics of malaria transmission under changing ecological scenario in and around Nanak Matta Dam, Uttaranchal, India: *Indian J.Malariol.*, v. 38, no. 3-4, p. 91-98.
- Smith, D. L., J. Dushoff, R. W. Snow, and S. I. Hay, 2005, The entomological inoculation rate and *Plasmodium falciparum* infection in African children: *Nature*, v. 438, no. 7067, p. 492-495.
- Souares, A., R. Lalou, I. Sene, D. Sow, and J. Y. Le Hesran, 2009, Factors related to compliance to anti-malarial drug combination: example of amodiaquine/sulphadoxine-pyrimethamine among children in rural Senegal: *Malar.J.*, v. 8, p. 118.
- Souares, A., G. Savadogo, H. Dong, D. Parmar, A. Sie, and R. Sauerborn, 2010, Using community wealth ranking to identify the poor for subsidies: a case study of community-based health insurance in Nouna, Burkina Faso: *Health Soc.Care Community*.
- Srivastava, I. K., H. Rottenberg, and A. B. Vaidya, 1997, Atovaquone, a broad spectrum antiparasitic drug, collapses mitochondrial membrane potential in a malarial parasite: *J.Biol.Chem.*, v. 272, no. 7, p. 3961-3966.
- Teklehaimanot, H. D., J. Schwartz, A. Teklehaimanot, and M. Lipsitch, 2004, Weather-based prediction of *Plasmodium falciparum* malaria in epidemic-prone regions of Ethiopia II. Weather-based prediction systems perform comparably to early detection systems in identifying times for interventions: *Malar.J.*, v. 3, p. 44.
- Thomson, M. C., S. J. Connor, U. D'Alessandro, B. Rowlingson, P. Diggle, M. Cresswell, and B. Greenwood, 1999, Predicting malaria infection in Gambian children from satellite data and bed net use surveys: The importance of spatial correlation in the interpretation of results: *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, v. 61, no. 1, p. 2-8.
- Traoré, C., 2003, Epidemiology of malaria in a holoendemic area of rural Burkina Faso, Inaugural dissertation to obtain the degree of Dr. med.at the Medical Faculty of the Ruprecht-Karls-University Heidelberg, Heidelberg.
- van der Hoek, W., F. Konradsen, P. H. Amerasinghe, D. Perera, M. K. Piyaaratne, and F. P. Amerasinghe, 2003, Towards a risk map of malaria for Sri Lanka: the importance of house location relative to vector breeding sites: *Int.J.Epidemiol.*, v. 32, no. 2, p. 280-285.
- Weiser, J., 1984, A mosquito-virulent *Bacillus sphaericus* in adult *Simulium damnosum* from northern Nigeria: *Zentralbl.Mikrobiol.*, v. 139, no. 1, p. 57-60.
- World Bank. (2008) Burkina Faso data profile [WWW document]. URL <http://devdata.worldbank.org/external/CCProfile.aspx?PTYPE=CP> [accessed on 31 July 2009]
- Wurthwein, R., A. Gbangou, R. Sauerborn, and C. M. Schmidt, 2001, Measuring the local burden of disease. A study of years of life lost in sub-Saharan Africa: *Int.J.Epidemiol.*, v. 30, no. 3, p. 501-508.
- Ye, Y., 2005, Incorporating Environmental factors in Modelling Malaria Transmission in under five children in Rural Burkina Faso, Inaugural Dissertation to attain the degree of Doctor scientiarum humanarum (Dr. Sc. Hum.) at the Medical Faculty of Ruprecht-Karls-University Heidelberg
- Ye, Y., V. R. Louis, S. Simboro, and R. Sauerborn, 2007, Effect of meteorological factors on clinical malaria risk among children: an assessment using village-based meteorological stations and community-based parasitological survey: *BMC.Public Health*, v. 7, p. 101.